



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ
COORDENAÇÃO DO CURSO DE LICENCIATURA PLENA EM FÍSICA
CÁSSIO RENATO DA GLÓRIA PEREIRA DOS SANTOS

Análise do princípio básico de funcionamento do STM

Macapá

2010

CÁSSIO RENATO DA GLÓRIA PEREIRA DOS SANTOS

Análise do princípio básico de funcionamento do STM

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao colegiado de Física da Universidade Federal do Amapá como requisito para a obtenção do grau de graduação em Licenciatura Plena em Física sob orientação do Prof. Dr. Henrique Duarte da Fonseca Filho.

Macapá

2010

CÁSSIO RENATO DA GLÓRIA PEREIRA DOS SANTOS

Análise do princípio básico de funcionamento do STM

AVALIADORES

Prof. Dr. Henrique Duarte da Fonseca Filho

Universidade Federal do Amapá - UNIFAP

Prof. Dr. Robert Ronald Maguiña Zamora

Universidade Federal do Amapá - UNIFAP

Prof. Dr. Rafael Martinez Rodriguez

Universidade Federal do Amapá - UNIFAP

Avaliado em: ____/____/____

Macapá

2010

A meus pais.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Henrique Duarte da Fonseca Filho, por aceitar guiar este trabalho de conclusão de curso, pela paciência, críticas, correções e sugestões feitas. O que o torna um verdadeiro orientador.

Aos meus pais, Renato Maciel e Maria José da Glória, por todo apoio, incentivo e confiança depositada em mim.

À Soraia Santana e Aelson Nascimento, pela amizade e por sempre poder contar com eles.

À minha namorada Elayne Batista, pelo incentivo e confiança.

À Marcell dos Santos Silva, pela amizade e ajuda na elaboração deste trabalho.

Aos amigos que já conhecia e aos que fiz na UNIFAP.

Ao colegiado do Curso de Física e a UNIFAP, pela oportunidade.

“Queira! Basta ser sincero e desejar profundo. Você será capaz de sacudir o mundo.”

Raul Seixas

RESUMO

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso é apresentar uma aplicação muito útil do fenômeno quântico conhecido como efeito túnel ou tunelamento. Trata-se do Microscópio de Varredura por Tunelamento, STM (do inglês *scanning tunneling microscope*), inventado em 1981 pelo alemão Gerd Binnig juntamente com o suíço Heinrich Rohrer. Essa invenção garantiu aos dois o Prêmio Nobel de Física em 1986. O STM faz parte de um grupo de instrumentos utilizados para analisar superfícies conhecido como Microscópios de Ponta de Prova, SPM (do inglês *scanning probe microscope*). Em geral, esses microscópios são dotados de uma ponta muito fina (que pode ter sua extremidade composta por um único átomo), que é usada para sondar a superfície que se quer analisar, para obter não somente imagens com resolução atômica como também manipular átomos sobre uma superfície. Por isso, o STM contribuiu para a miniaturização de circuitos eletrônicos que está intimamente ligado ao avanço tecnológico atual. Assim, neste trabalho também será discutida a necessidade da inserção do estudo de Física Moderna no Ensino Médio, pois o STM é uma aplicação de um efeito quântico e os avanços tecnológicos atuais estão intimamente ligados à essa parte da Física.

Palavras chave: STM; efeito túnel; microscopia; ensino de Física Moderna.

ABSTRACT

The objective of this ending course work is to show a useful application of the quantum phenomenon known as tunnel effect or tunneling. It's about the STM (scanning tunneling microscope), invented in 1981 by the German Gerd Binnig together with the Swiss Heinrich Rohrer. This invention brought for both the Nobel Prize in physics in 1986.

The STM is part of a group of instruments that are used to analyze surfaces known as the SPMs (*scanning probe microscopes*). In general, these microscopes have a very sharp tip (that must have its tip composed by a single atom), that is used to explore the surface that has to be analyzed, to obtain not only pictures with atomic resolution but to manipulate atoms on a surface. Therefore, the STM contributed for the miniaturization of electronic circuits that are intimately linked to the present technological advances. So in this work the necessity of insertion of Modern Physics studies in the elementary education is also discussed, because the STM is an application of a quantum effect and to the present technological advances are intimately linked to this part of Physics.

Keywords: STM; tunnel effect; microscopy; Modern Physics teaching.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I

- 1. OBJETIVOS GERAIS 10
- 1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 10

CAPÍTULO II

- 2. INTRODUÇÃO 11

CAPÍTULO III

- 3. TEORIA E INSTRUMENTAÇÃO 22
- 3.1. EFEITO TÚNEL 22
- 3.2. INSTRUMENTAÇÃO 31

CAPÍTULO IV

- 4. APLICAÇÕES DO STM 35

CAPÍTULO V

- 5. O ESTUDO DE FÍSICA MODERNA (FM) NO ENSINO MÉDIO (EM) 45

CAPÍTULO VI

- 6. CONCLUSÕES 53

REFERÊNCIAS 55

APÊNDICE 58

CAPÍTULO I

1. OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo dar uma visão geral do princípio básico de funcionamento do Microscópio de Varredura por Tunelamento (STM, do inglês *Scanning Tunneling Microscope*), explicitando que este é uma aplicação do efeito túnel e descrevendo o modo de funcionamento de cada um de seus principais componentes. Ao apresentar o histórico da microscopia – descrevendo os microscópios ópticos e eletrônicos, com suas respectivas limitações – pretende-se deixar claro para o leitor a principal vantagem do STM sobre dos demais microscópios e ainda evidenciar a importância da Física Moderna nos avanços tecnológicos atuais, para finalmente fazer uma breve análise do ensino desta parte da Física no Ensino Médio, tomando como base os textos de pesquisas recentes e orientações feitas pelos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNs).

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fazer a contextualização histórica do Microscópio de Varredura por Tunelamento a partir do surgimento das limitações dos microscópios óptico e eletrônico;
- Mostrar o coeficiente de transmissão através de uma barreira de potencial para partículas com energia E menor que o potencial V_0 da barreira por meio da resolução da equação de Schrödinger independente do tempo;
- Descrever o modo de funcionamento de cada um dos componentes do STM;
- Analisar o ensino de Física Moderna no Ensino Médio baseando-se em tendências atuais do ensino.

CAPÍTULO II

2. INTRODUÇÃO

O microscópio de varredura por tunelamento, STM (do inglês *Scanning Tunneling Microscope*), foi inventado em 1981 pelo alemão Gerd Binnig e o suíço Heinrich Rohrer, e representou uma das maiores invenções já proporcionadas pela ciência. Com este equipamento foi possível, pela primeira vez na história, obter imagens reais de superfícies em nível atômico e foi a partir dele que foram desenvolvidos outros microscópios de varredura com sonda, SPM (do inglês *Scanning Probe Microscope*).

Antes da invenção do STM, os principais instrumentos utilizados para investigação de estruturas invisíveis ao olho humano eram os microscópios ópticos e posteriormente os microscópios eletrônicos.

Data do ano de 721 A.C. um relato de um cristal de rocha recortado que tinha propriedades de ampliação. Este cristal de rocha recortado já era um tipo rudimentar de lente. No entanto, as lentes passaram a ser conhecidas e terem aplicações efetivamente a partir do ano 1280, com a invenção dos óculos na Itália. A popularização das lentes ocorreu de forma rápida, culminando assim com a invenção do microscópio óptico composto [1]. Mas antes deste, eram utilizados os microscópios ópticos simples que eram compostos por uma única lente.

A invenção do microscópio óptico composto é atribuída ao holandês Zacharias Jansen que os montava e distribuía para a realeza por volta do ano de 1595. No entanto, no início, a microscopia não passava de um passatempo que utilizava os microscópios para ver objetos muito pequenos [1].

Curiosamente a palavra microscópio (do grego *micros*, pequeno, e *skopein*, ver) foi oficializada no século XVII pelos membros da Academia dei Lincei. Datam deste século também, as primeiras mudanças significativas feitas nos microscópios, com destaque para Robert Hooke e Antoni Van Leeuwenhoek na realização destes aprimoramentos. Usando um

microscópio bastante sofisticado para a época, com um aumento de até 30 vezes, Hooke analisou finas fatias de cortiça e pode observar pela primeira vez, pequenas estruturas compartimentadas, como uma colméia, sendo que foi ele quem usou pela primeira vez a palavra “célula” para estas pequenas estruturas. A figura 1.1 é uma ilustração do microscópio utilizado por Hooke em seus trabalhos.



Figura 1.1 – O microscópio de Robert Hooke [2]

Robert Hooke ainda produziu imagens de seres e objetos do cotidiano como uma pulga, a ponta de uma agulha, entre outros, sendo que estas imagens foram publicadas no ano de 1667 em uma pequena obra de sua autoria, intitulada *Micrographia*. A figura 1.2 apresenta uma destas imagens feitas por Hooke.

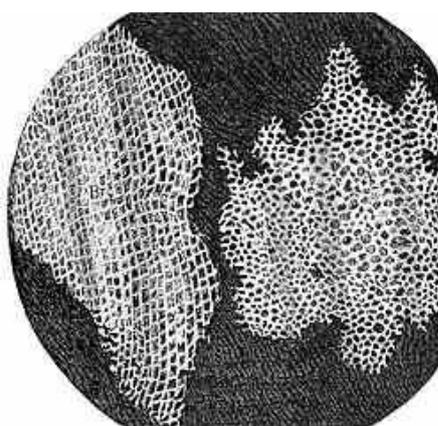


Figura 1.2 – Uma fatia fina de cortiça, com suas células, em um desenho feito por Robert Hooke, em seu livro *Micrographia* [2].

Leeuwenhoek, com uma lente apenas, construiu um microscópio simples, mas que era 10 vezes mais potente que o de Hooke, e com isso ele pode observar protozoários,

espermatozóides e também “animaizinhos” na água da chuva. Leeuwenhoek afirmava que estes “animais” eram “dez mil vezes menores que as moscas de água” vistas por Swammerdan [1].

A figura 1.3 mostra uma réplica do microscópio utilizado por Leeuwenhoek.



Figura 1.3 – Réplica do microscópio de Leeuwenhoek [2].

Os microscópios mais potentes de Leeuwenhoek chegavam a fazer aumentos de até 270 vezes, mas a instabilidade do instrumento era um empecilho para investigações mais detalhadas.

No século XVIII prosseguiram as séries de melhorias feitas no microscópio óptico. Os instrumentos ganharam maior estabilidade e as técnicas de construção de lentes estavam em constante aprimoramento nesta época. Embora já houvesse algumas publicações que citavam o uso do microscópio, a microscopia ainda era considerada uma atividade de amadores e curiosos que nada tinham a contribuir [2].

A partir do século XIX, os microscópios foram sendo aprimorados de forma fantástica com o desenvolvimento e aplicação de lentes que evitavam distorções na imagem causadas pela aberração esférica e a decomposição de cores (aberração cromática), problemas estes que eram causados pelas lentes primitivas.

O desenvolvimento da mecânica de precisão com botões de focalização e o uso de fontes de luz mais poderosas deram ao microscópio óptico maior poder de resolução. Por resolução de um instrumento óptico entende-se a capacidade que ele tem de distinguir individualmente os pontos adjacentes de um objeto. Por exemplo, uma amostra pode ser

considerada como uma fonte luminosa extensa composta de várias fontes pontuais. Quanto menor for a separação entre duas fontes pontuais adjacentes vistas com esse instrumento óptico e quanto menor for o diâmetro dessas fontes, melhor será sua resolução. Essas melhorias fizeram o microscópio se tornar um equipamento científico muito importante a partir esta época.

Ainda no final do século XIX os espelhos esféricos foram adaptados ao microscópio óptico com o intuito de melhorar a capacidade de foco destes instrumentos e também foi alcançado o limite de resolução de 200 nm, que é o limite que permanece até hoje para a microscopia que utiliza luz visível como fonte de iluminação da amostra.

O limite de 200 nm é uma consequência imposta pelo comprimento de onda da luz visível dada pelo critério de difração de Rayleigh [3]. Em seus estudos, Rayleigh analisou os diagramas de difração de duas fontes pontuais e observou que um sistema óptico só é capaz de resolver essas fontes se seus respectivos diagramas de difração estiverem suficientemente separados por uma distância mínima $(\Delta\varphi)_{min}$ dada por

$$(\Delta\varphi)_{min} = \frac{1,22\lambda}{D}$$

Onde $(\Delta\varphi)_{min}$ é a separação angular entre as fontes pontuais, λ é o comprimento de onda da luz visível e D , no caso do microscópio óptico, é o diâmetro da lente objetiva.

Além de disso, ele concluiu também que as fontes apenas serão distinguidas se o máximo principal do diagrama de difração de uma coincide com o primeiro mínimo da outra [4] (ver apêndice A).

Calculando numericamente, chega-se ao valor de que só podem ser resolvidos objetos de 200 a 350 nm, que é a metade do comprimento de onda da luz visível [3]. Como são usados feixes de luz visível para iluminar a amostra, essa limitação foi um grande problema para os pesquisadores que dependiam dos microscópios ópticos em seus trabalhos. A figura 1.4 mostra um microscópio óptico e um esquema de seus componentes básicos.

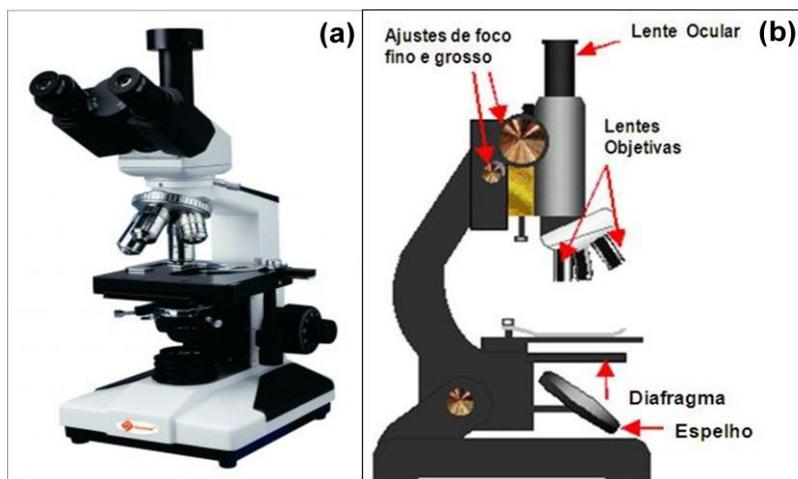


Figura 1.4 – Na figura (a) um microscópio óptico moderno modelo **Q711H** do fabricante **Quimis** [5] e na figura (b) um desenho esquemático dos principais componentes de um microscópio óptico [6].

Mas em decorrência desta era de grande avanço tecnológico, os pesquisadores têm necessidade de observar, analisar e explicar fenômenos em escalas cada vez menores [7]. Dada a necessidade de observação e as limitações dos microscópios ópticos, em 1931 o físico alemão Ernst Ruska apresentou o microscópio eletrônico que hoje é capaz de ampliar imagens de moléculas orgânicas em até 500 mil vezes [8]. A diferença básica do microscópio óptico para o eletrônico é que o primeiro utiliza um feixe de luz para obter imagens enquanto o segundo utiliza um feixe de elétrons.

No microscópio eletrônico são aproveitadas as características ondulatórias de elétrons dadas pela relação de de Broglie

$$\lambda = h/p$$

Quanto maior o momento p dos elétrons, menor será o valor do comprimento de onda λ associado aos mesmos, o que permite que sejam alcançados comprimentos de onda de até 0,1 nm [9].

Basicamente o que ocorre em um microscópio eletrônico é que uma diferença de potencial acelera um feixe de elétrons (gerado pelo canhão de elétrons através de emissão termoiônica) na direção da amostra a ser analisada, estes elétrons são direcionados por lentes eletromagnéticas que na verdade são bobinas através das quais flui uma corrente elétrica que cria o campo magnético que é usado para direcionar o feixe. Emissão termoiônica é a emissão de elétrons da superfície de um metal quando este é aquecido a elevadas temperaturas, ou seja, é fornecida energia térmica que aumenta a energia cinética dos elétrons, sendo que

escaparão da superfície aqueles que tiverem energia suficiente para superar a função trabalho do metal.

Existem dois tipos principais de microscópios eletrônicos: o microscópio eletrônico de transmissão (MET) e o microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os componentes destes são praticamente os mesmos. A diferença está na forma como cada um destes instrumentos opera.

No MET as amostras devem ser finas de forma que permitam a passagem do feixe de elétrons que formará a imagem em um filme fotográfico ou em um anteparo recoberto com material que fluoresce quando irradiado com elétrons [10]. Já no MEV podem ser analisadas amostras de qualquer espessura obtendo-se imagens com elevada profundidade de foco e podendo ser combinadas análises microestruturais com análises químicas [7] graças principalmente a espessura do feixe de elétrons empregados no MEV que é muito mais fino que o empregado no MET.

O feixe de elétrons do MEV é varrido pela superfície da amostra para frente e para trás, este feixe produz vários efeitos na amostra, mas o principal e que interessa para a construção deste aparelho é que o feixe de elétrons também provoca a emissão de elétrons da amostra. Os elétrons emitidos da amostra são captados por um detector e em seguida forma-se a imagem da superfície através de softwares de computador adequados para tal. Na prática, o MET fornece aumentos de 1.000 a cerca de 200.000 vezes, enquanto que no MEV os aumentos variam de 10.000 a 900.000 vezes [7,10].



Figura 1.5 – Microscópio eletrônico de transmissão [11].

Com o advento dos microscópios eletrônicos algumas estruturas subcelulares que não eram possíveis de serem analisadas com um microscópio óptico passaram ser visíveis como, por exemplo, o orifício do núcleo e a membrana dupla da mitocôndria [12].

Entretanto, a microscopia eletrônica possui algumas limitações que são de grande relevância tanto para a construção do instrumento como para os resultados obtidos nas análises. São elas: quando analisadas por um MET as imagens obtidas são, na verdade, projeções dos elementos da amostra sobre o anteparo usado para produzi-la. Isto porque ela é formada pela transmissão de elétrons através da amostra, que em geral é uma lâmina fina, e isso requer atenção na hora de analisar os dados, pois a imagem fornecida será bidimensional [13], com pouca profundidade de foco, ou seja, é revelado bem pouco da topografia da amostra.

O feixe de elétrons ainda funciona como radiação ionizante que danifica a amostra e o instrumento só opera em faixa de pressões abaixo de 10^{-6} Torr e outro fator importante é consequência do próprio poder de resolução do instrumento, pois como a resolução é da ordem de 2 a 5 nm, qualquer vibração nessa escala afeta a produção da imagem. Dessa forma a obtenção de uma boa imagem requer também a construção de microscópios robustos para minimizar os efeitos das vibrações do ambiente e exige habilidade de quem manuseia o aparelho. A figura 1.6 é uma imagem feita com um microscópio eletrônico, mais precisamente um MEV. Nota-se que a imagem tem aspecto tridimensional, o que não ocorreria se esta fosse gerada por um MET.

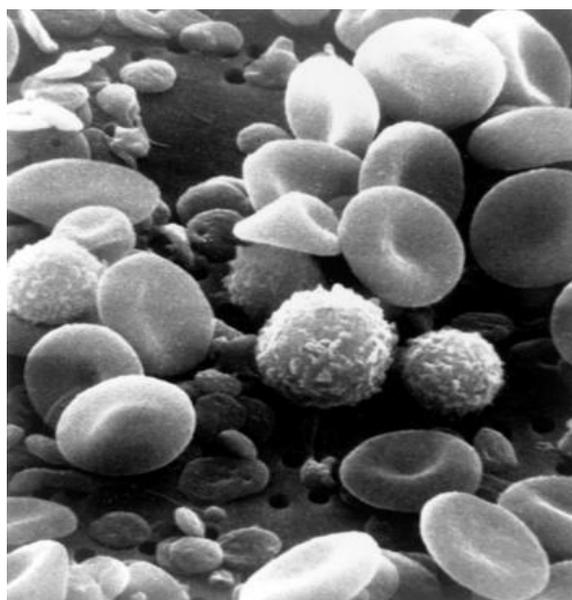


Figura 1.6 – Imagem de célula do sangue feita com um microscópio eletrônico de varredura [14].

Mas com a invenção do STM, em 1981, por Gerd Binnig e Heinrich Rohrer a microscopia deu um grande salto, pois se tornou possível não só gerar imagens 3D de superfícies com resolução atômica (o microscópio eletrônico não alcança esta resolução) como também manipular átomos de superfícies, com a vantagem principal de provocar danos mínimos à amostra e ainda operar tanto em meio líquido, gasoso ou também em faixa de pressões abaixo de 10^{-6} Torr. O STM faz parte da família de SPMs. O componente essencial de um SPM é a sonda que é utilizada para gerar imagens de superfícies obtendo grandes magnificações, permitindo que sejam medidas distâncias de até 0,1 angstroms.

Outros importantes microscópios de varredura por sonda são: o microscópio de força atômica, AFM (do inglês *atomic force microscope*), microscópio de força magnética, MFM (do inglês *magnetic force microscope*), microscópio de força eletrostática, EFM (do inglês *electrostatic force microscope*), o microscópio óptico de campo próximo, SNON (do inglês *scanning near-field optical microscope*), entre outros [3]. Neste trabalho será tratado apenas o STM, cuja invenção garantiu o Prêmio Nobel de Física em 1986 a seus inventores que dividiram a honraria com Ernst Ruska, considerado o pai do microscópio eletrônico.

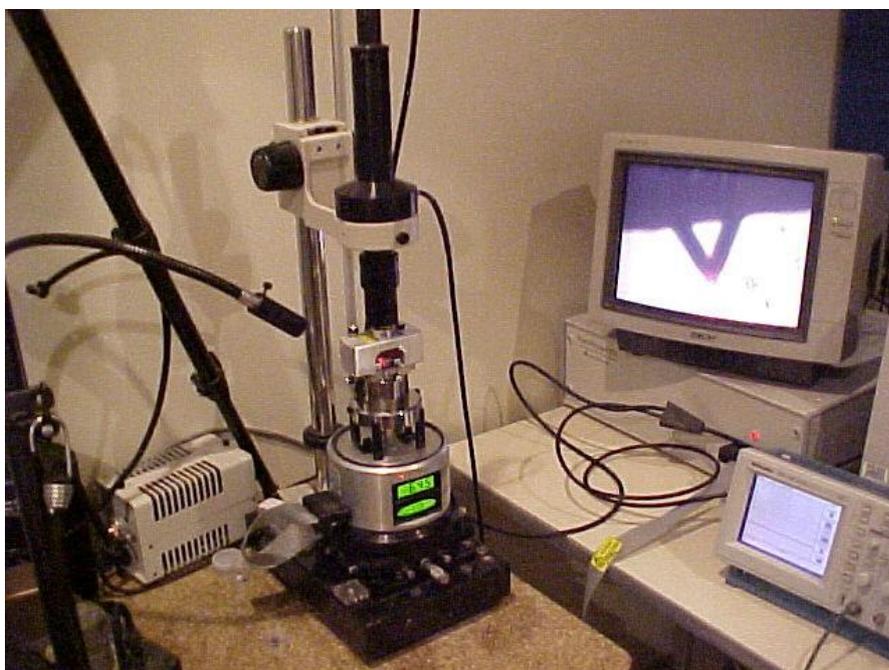


Figura 1.7 – Imagem de um AFM modelo *MultiMode*, equipado com o controlador IIIa, da Veeco que também funciona como um microscópio de varredura por tunelamento [15].

Em um STM, como o da figura 1.7, o que permite fazer a leitura da superfície da amostra e conseqüentemente a formação da imagem, é a corrente elétrica que surge entre a ponta (sonda) e a amostra quando é aplicada uma diferença de potencial de alguns volts entre

as duas. Essa corrente é chamada corrente de tunelamento. Para entender esta corrente de tunelamento se faz necessário compreender alguns princípios de física quântica, dentre eles o principal é o fenômeno de **penetração de barreiras** (efeito túnel ou tunelamento) por partículas com energia E menor que o potencial V de uma barreira.

Outro elemento importante de um STM são as cerâmicas piezoelétricas que tem a propriedade de contrair ou expandir ao serem submetidas a uma diferença de potencial. Estas cerâmicas dão ao STM a precisão de movimento necessário a ele durante o processo de varredura da superfície da amostra.

Entretanto, o STM não serve apenas para gerar imagens de superfícies com resolução atômica. A ponta de um STM pode ser usada também para testar circuitos eletrônicos, pois com a miniaturização destes circuitos, torna-se necessário que os equipamentos de testes acompanhem essa miniaturização. Dessa forma, o STM é útil para realizar estes testes porque com ele é possível medir voltagens locais bem como servir de fonte de corrente [16]. Outra aplicação útil do STM é na nanolitografia, pois esta técnica possibilita estimular processos químicos, e assim, induzir mudanças na estrutura química da amostra. A figura 1.8 apresenta uma ilustração do esquema de funcionamento básico de um STM.

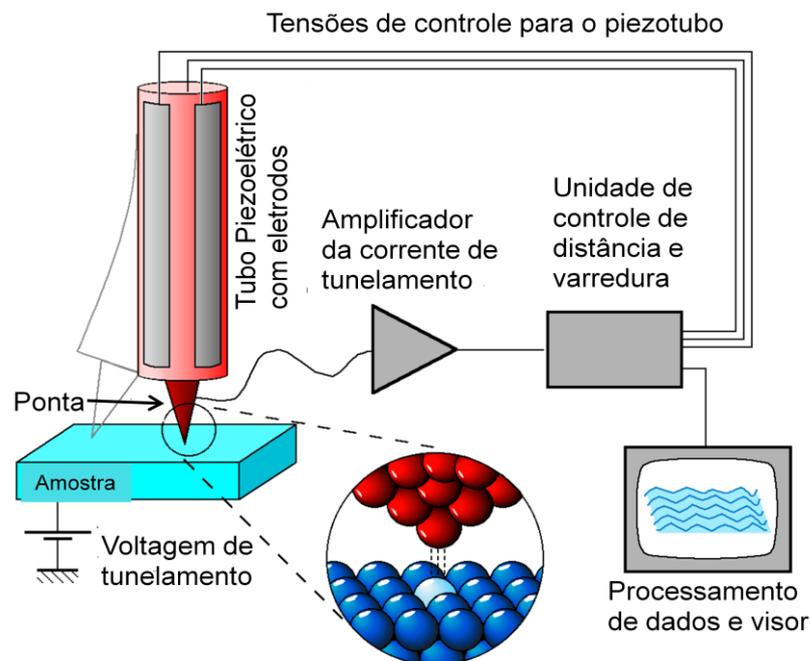


Figura 1.8 – Esquema de funcionamento de um STM. Os átomos da extremidade da ponta interagem com os da amostra fazendo surgir a corrente de tunelamento devido a diferença de potencial entre as duas. Essa corrente é amplificada e processada por softwares de computador adequados, formando assim a imagem da topografia da superfície [17].

Em 1990, Eigler e Schweizer utilizaram um STM para manipular trinta e cinco átomos de xenônio sobre uma superfície de níquel em condições de ultra alto vácuo, UHV (do inglês *ultra high vacuum*) e baixas temperaturas (em torno de 4 K) para diminuir a mobilidade natural dos átomos. Neste experimento, os átomos de xenônio foram manipulados para escrever o nome da empresa que patrocinou a pesquisa (ver figura 1.9). Entretanto, neste trabalho foram usadas apenas as forças de contato entre os átomos e a ponta do STM e não a corrente de tunelamento para mover os átomos. A corrente de tunelamento foi usada apenas para fazer a imagem dos átomos sobre a superfície [15]. Entretanto, é importante ressaltar que a imagem do átomo não é conhecida, pois a imagem de um núcleo rodeado por elétrons é somente um modelo. Isso quer dizer que na realidade, a imagem obtida via STM é o padrão de distribuição das densidades eletrônicas dos átomos sobre a superfície da amostra analisada.

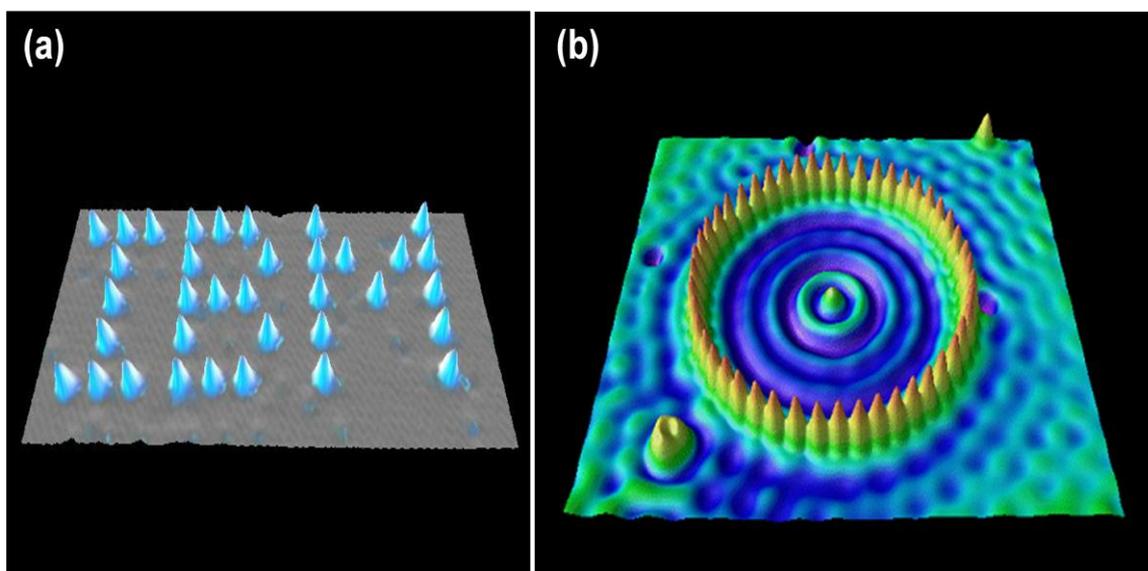


Figura 1.9 – Em (a) uma imagem do experimento de Eigler e Schweizer, onde átomos xenônio foram manipulados sobre uma superfície de níquel. Em (b) usando um microscópio de tunelamentos, pesquisadores da IBM conseguiram arranjar 48 átomos de ferro em círculo numa superfície de cobre, formando uma espécie de curral atômico. Imagem: IBM [17]

Com o avanço proporcionado pela invenção do STM, houve um renovado interesse no estudo de aspectos de superfícies como, por exemplo, os estudos da oxidação, o crescimento de cristais, da deposição eletroquímica, a construção de nano-circuitos e nano-máquinas, entre outros. Estas novas possibilidades de investigação, e a versatilidade do STM têm chamado atenção de físicos, químicos, metalúrgicos e biólogos que buscam observar e entender fenômenos de superfícies [18].

A fundamentação teórica do *efeito túnel* e demais princípios físicos que sejam primordiais para o funcionamento do STM, serão desenvolvidos no capítulo 2, que também

abrangerá um tópico para apresentação do aparelho utilizado nas experiências. No capítulo 3 serão apresentadas algumas importantes aplicações do STM. Em seguida, o capítulo 4 trará uma discussão de como o ensino de física quântica é tratado pelas escolas de nível médio, uma vez que o desenvolvimento deste ramo da física proporcionou grande parte do avanço tecnológico vivenciado pela sociedade a partir principalmente da década de 1990, pois entende-se que é extremamente importante que o indivíduo conheça a ciência que está sendo desenvolvida em seu tempo. E por fim, o capítulo 5 será dedicado ao desfecho do trabalho com as conclusões e considerações finais.

CAPÍTULO III

3. TEORIA E INSTRUMENTAÇÃO

O *efeito túnel* ou *tunelamento* é o nome dado ao fenômeno de penetração de barreiras de potencial por partículas microscópicas com energia total menor que o potencial da barreira.

Analisando este mesmo fenômeno é possível constatar que o que ocorre com partículas que tem energia E menor que a barreira de potencial V_0 , não se enquadra no formalismo clássico [19], pois partículas microscópicas, com energia $E < V_0$ têm probabilidade de atravessar a barreira e aparecer do outro lado. Esse é o *efeito túnel* ou *tunelamento*.

Por mais estranho que possa parecer para a experiência cotidiana, somente a teoria quântica pode dar uma explicação satisfatória para o que acontece na realidade.

Com o objetivo de explicitar a validade da teoria quântica e uma de suas aplicações práticas (o Microscópio de Varredura por Tunelamento), neste capítulo o item 2.1 apresentará a teoria do princípio de funcionamento do STM, o *efeito túnel*, e o item 2.2, apresentará a descrição dos elementos deste instrumento.

3.1. O EFEITO TÚNEL

De acordo com o postulado de de Broglie uma partícula pode ter associado ao seu movimento, uma função de onda que descreve tal movimento da partícula. Reconhecer esse postulado e interpretá-lo corretamente é o que se deve fazer para entender a equação diferencial que será apresentada neste trabalho, pois é de suma importância compreender o comportamento dual apresentado por partículas microscópicas e que esse comportamento dual é um dos pontos fortes da teoria quântica.

No efeito túnel, uma partícula que incide em uma barreira de potencial pode aparecer do outro lado desta barreira, mesmo tendo energia total E ligeiramente menor que o potencial V_0 da barreira, como mostra a figura 2.2(a). A figura 2.2(b) mostra uma representação de como a função de onda associada ao movimento da partícula varia nas três regiões diferentes pelas quais a partícula pode ser localizada.

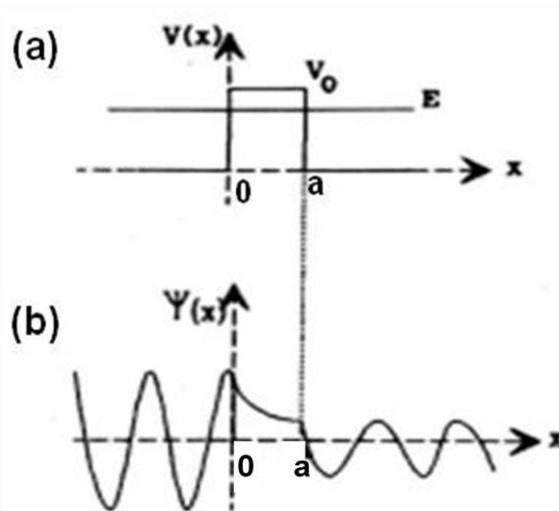


Figura 2.2 – Energia da partícula menor que o potencial (a); representação das funções de onda para o elétron nas três diferentes regiões definidas pela barreira (b).

Primeiramente é interessante mostrar o cálculo do coeficiente de transmissão T para região $x > a$, pois é o cálculo desse coeficiente que revela o resultado mais interessante do ponto de vista da teoria quântica.

Como o interesse é detalhar o princípio de funcionamento de um STM, as partículas que interessam são elétrons e na figura 2.2 será considerado um feixe de elétrons incidindo pela esquerda na barreira. Portanto, a partir de agora, nesta demonstração, sempre que houver referência a uma partícula, essa partícula será um elétron.

Será mostrado aqui o coeficiente de transmissão de elétrons através de uma barreira de potencial para um feixe de elétrons com energia menor que o potencial da barreira ($E < V_0$) e incidindo pela esquerda.

Para, calcular o coeficiente de transmissão deve-se primeiramente resolver a equação de Schrödinger independente do tempo para as três regiões diferentes pelas quais a partícula pode ser localizada na figura 2.2.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V(x) \psi(x) = E \psi(x) \quad (1)$$

Onde:

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$, sendo que h é a constante de Planck;

m : é a massa do elétron;

$\psi_{(x)}$: é a autofunção para o caso unidimensional;

$V_{(x)}$: é o potencial que neste caso depende só de x .

A equação (1) é a equação de Schrödinger independente do tempo. É importante ressaltar que (1) será trabalhada apenas para o caso unidimensional e para potenciais que não dependem do tempo, pois dessa maneira o resultado será uma boa aproximação e os cálculos serão bastante facilitados.

Resolvendo primeiramente para a região $x < 0$. Nesta região o potencial $V_{(x)} = 0$, dessa forma o elétron é uma partícula livre e a equação (1) fica da seguinte forma

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi_{I(x)}}{dx^2} = E\psi_{I(x)} \quad (1.1)$$

Arrumando de outra maneira a mesma equação torna-se

$$\frac{d^2\psi_{I(x)}}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E\psi_{I(x)} = 0 \quad (1.2)$$

Essa é uma equação diferencial ordinária de segunda ordem, cuja solução geral é

$$\psi_{I(x)} = Ae^{ik_I x} + Be^{-ik_I x} \quad x < 0 \quad (1.3)$$

onde $k_I = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$, mas na região $x > a$ o potencial também é nulo. Portanto, para essa região, analogamente à região $x < 0$, a solução da (1.1) é

$$\psi_{III(x)} = Ce^{ik_{III} x} + De^{-ik_{III} x} \quad x > a \quad (1.4)$$

onde $k_{III} = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$.

Na região $x > a$ não há outra barreira que possa provocar reflexão. Então $D = 0$, pois todas as partículas transmitidas continuarão movendo-se apenas na direção positiva do eixo x . E a (1.4) fica da seguinte forma:

$$\psi_{III}(x) = C e^{ik_{III}x} \quad (1.5)$$

Na região $0 < x < a$, o potencial é $V_{(x)} = V_0$. Substituindo esse potencial em (1) obtém-se

$$\frac{d^2\psi_{II}(x)}{dx^2} - \frac{2m}{\hbar^2}(V_0 - E)\psi_{II}(x) = 0 \quad (1.6)$$

A solução geral dessa equação é

$$\psi_{II}(x) = E e^{k_{II}x} + F e^{-k_{II}x} \quad 0 < x < a \quad (1.7)$$

onde $k_{II} = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar}$.

O coeficiente de transmissão T é a razão entre o fluxo probabilidade de transmissão através da barreira para a região $x > a$ e o fluxo de probabilidade incidente sobre a barreira.

$$T = \frac{v_{III} C C^*}{v_I A A^*} \quad (1.8)$$

onde v é a velocidade do elétron. Sendo que $v = \frac{p}{m} = \frac{\hbar k}{m}$, C^* e A^* complexos conjugados. Substituindo os valores de v_{III} e v_I em (1.8) utilizando a relação para v dada anteriormente,

$$T = \frac{k_{III} C C^*}{K_I A A^*} \quad (1.9)$$

pois \hbar e m são constantes.

Para obter o valor das constantes que interessam aplica-se a condição de continuidade à $\psi_{(x)}$ e sua derivada $\frac{d\psi_{(x)}}{dx}$ nos pontos $x = 0$ e $x = a$.

- Em $x = 0$

$$\psi_{I(x)} = \psi_{II(x)} \quad (1.10)$$

Os índices I e II representam as regiões $x < 0$ e $0 < x < a$, respectivamente. Em $x = 0$ as equações (1.3) e (1.7), que compõem a igualdade de (1.10), dão

$$A + B = E + F \quad (1.11)$$

Ainda em $x = 0$, faz-se,

$$\frac{d\psi_{I(x)}}{dx} = \frac{d\psi_{II(x)}}{dx} \quad (1.12)$$

$$ik_I A(e^{ik_I x})_{x=0} - ik_I B(e^{-ik_I x})_{x=0} = k_{II} E(e^{k_{II} x})_{x=0} - k_{II} F(e^{-k_{II} x})_{x=0}$$

Daí vem,

$$ik_I A - ik_I B = k_{II} E - k_{II} F$$

Colocando i , k_I e k_{II} em evidência

$$i(A - B)k_I = k_{II}(E - F)$$

Transpondo os termos, fica

$$A - B = -i \frac{k_{II}}{k_I} (E - F) \quad (1.13)$$

- Em $x = a$

$$\psi_{II(x)} = \psi_{III(x)} \quad (1.14)$$

O índice III representa a região $x > a$. De acordo com (1.5) e (1.7) calcula-se a igualdade (1.14) em $x = a$. Obtendo,

$$Ee^{k_{II}a} + Fe^{-k_{II}a} = Ce^{ik_{III}a} \quad (1.15)$$

E agora também em $x = a$:

$$\frac{d\psi_{II(x)}}{dx} = \frac{d\psi_{III(x)}}{dx} \quad (1.16)$$

Para resolver a igualdade (1.16), basta calcular as derivadas de (1.5) e (1.7), e encontra-se

$$k_{II} E e^{k_{II}a} - k_{II} F e^{-k_{II}a} = ik_{III} C e^{ik_{III}a}$$

Que resulta

$$E e^{k_{II}a} - F e^{-k_{II}a} = i \frac{k_{III}}{k_{II}} C e^{ik_{III}a} \quad (1.17)$$

Lembrando que o objetivo é resolver a (1.9), que dá o coeficiente de transmissão através da barreira. Para isso, pode-se primeiro resolver a razão $\frac{CC^*}{AA^*}$.

Uma forma de calcular a razão citada é escrever as constantes A , B , C e D uma em função das outras por meio de combinações entre (1.11), (1.13), (1.15), (1.17).

Somando (1.11) e (1.13);

$$2A = E + F - i \frac{k_{II}}{k_I} (E - F)$$

Que dá,

$$A = \frac{1}{2} \left[\left(1 - i \frac{k_{II}}{k_I} \right) E + \left(1 + i \frac{k_{II}}{k_I} \right) F \right] \quad (1.18)$$

Agora fazendo a diferença entre (1.11) e (1.13);

$$2B = E + F + i \frac{k_{II}}{k_I} (E - F)$$

Que dá,

$$B = \frac{1}{2} \left[\left(1 + i \frac{k_{II}}{k_I} \right) E + \left(1 - i \frac{k_{II}}{k_I} \right) F \right] \quad (1.19)$$

Somando (1.15) e (1.17);

$$2E e^{k_{II}a} = \left(1 + i \frac{k_{III}}{k_{II}} \right) C e^{ik_{III}a}$$

Transpondo os membros, fica

$$E = \frac{1}{2} \left(1 + i \frac{k_{III}}{k_{II}} \right) C e^{(ik_{III}a - k_{II}a)} \quad (1.20)$$

A diferença entre (1.15) e (1.17), dá

$$2F e^{-k_{II}a} = \left(1 - i \frac{k_{III}}{k_{II}} \right) C e^{ik_{III}a}$$

Que arrumando fica,

$$F = \frac{1}{2} \left(1 - i \frac{k_{III}}{k_{II}} \right) C e^{(ik_{III}a + k_{II}a)} \quad (1.21)$$

Substituindo (1.20) e (1.21) em (1.18), vem

$$A = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left(1 - i \frac{k_{II}}{k_I} \right) \left(1 + i \frac{k_{III}}{k_{II}} \right) C e^{(ik_{III}a - k_{II}a)} + \frac{1}{2} \left(1 + i \frac{k_{II}}{k_I} \right) \left(1 - i \frac{k_{III}}{k_{II}} \right) C e^{(ik_{III}a + k_{II}a)} \right]$$

Passando C para o outro lado da equação e pondo $1/2$ e $e^{ik_{II}a}$ de dentro dos colchetes em evidência.

$$\frac{A}{C} = \frac{1}{4} \left[\left(1 - i \frac{k_{II}}{k_I} \right) \left(1 + i \frac{k_{III}}{k_{II}} \right) e^{-k_{II}a} + \left(1 + i \frac{k_{II}}{k_I} \right) \left(1 - i \frac{k_{III}}{k_{II}} \right) e^{ik_{III}a} \right] e^{k_{II}a} \quad (1.22)$$

Fazendo o produto dos termos entre parênteses na (1.22),

$$\left(1 - i \frac{k_{II}}{k_I} \right) \left(1 + i \frac{k_{III}}{k_{II}} \right) = 1 + i \frac{k_{III}}{k_{II}} - i \frac{k_{II}}{k_I} + \frac{k_{III}}{k_I} \quad (*)$$

$$\left(1 + i \frac{k_{II}}{k_I} \right) \left(1 - i \frac{k_{III}}{k_{II}} \right) = 1 - i \frac{k_{III}}{k_{II}} + i \frac{k_{II}}{k_I} + \frac{k_{III}}{k_I} \quad (**)$$

Substituindo (*) e (**) em (1.22)

$$\frac{A}{C} = \frac{1}{4} \left[e^{-ik_{II}a} + i \frac{k_{III}}{k_{II}} e^{-k_{II}a} - i \frac{k_{II}}{k_I} e^{-k_{II}a} + \frac{k_{III}}{k_I} e^{-k_{II}a} + e^{k_{II}a} - i \frac{k_{III}}{k_{II}} e^{k_{II}a} + i \frac{k_{II}}{k_I} e^{k_{II}a} + \frac{k_{III}}{k_I} e^{k_{II}a} \right] e^{ik_{III}a}$$

Arrumando os termos, fica

$$\frac{A}{C} = \frac{1}{2} \left[\frac{(e^{k_{II}a} + e^{-k_{II}a})}{2} - i \frac{k_{III}}{k_{II}} \frac{(e^{k_{II}a} - e^{-k_{II}a})}{2} + i \frac{k_{II}}{k_I} \frac{(e^{k_{II}a} - e^{-k_{II}a})}{2} + \frac{k_{III}}{k_I} \frac{(e^{k_{II}a} + e^{-k_{II}a})}{2} \right] e^{ik_{III}a} \quad (1.23)$$

Lembrando que

$$\frac{(e^{k_{II}a} + e^{-k_{II}a})}{2} = \cosh k_{II}a$$

e

$$\frac{(e^{k_{II}a} - e^{-k_{II}a})}{2} = \sinh k_{II}a$$

A (1.23) torna-se

$$\frac{A}{C} = \frac{1}{2} \left[\cosh k_{II}a - i \frac{k_{III}}{k_{II}} \sinh k_{II}a + i \frac{k_{II}}{k_I} \sinh k_{II}a + \frac{k_{III}}{k_I} \cosh k_{II}a \right] e^{ik_{III}a} \quad (1.24)$$

Colocando $\cosh k_{II}a$ e $\sinh k_{II}a$ em evidência na (1.24)

$$\frac{A}{C} = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{k_{III}}{k_I} \right) \cosh k_{II}a + i \left(\frac{k_{II}}{k_I} - \frac{k_{III}}{k_{II}} \right) \sinh k_{II}a \right] e^{ik_{III}a} \quad (1.25)$$

Com o objetivo de facilitar os cálculos pode-se resolver primeiro a relação $\frac{AA^*}{CC^*}$ e depois fazer $(\frac{AA^*}{CC^*})^{-1} = \frac{CC^*}{AA^*}$. Dessa forma vem,

$$\frac{A^*}{C^*} = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{k_{III}}{k_I} \right) \cosh k_{II} a - i \left(\frac{k_{II}}{k_I} - \frac{k_{III}}{k_{II}} \right) \sinh k_{II} a \right] e^{ik_{III} a}$$

Portanto,

$$\frac{AA^*}{CC^*} = \frac{1}{4} \left[\left(1 + \frac{k_{III}}{k_I} \right)^2 \cosh^2 k_{II} a + \left(\frac{k_{II}}{k_I} - \frac{k_{III}}{k_{II}} \right)^2 \sinh^2 k_{II} a \right] \quad (1.26)$$

Mas, $1 + \sinh^2 k_{II} a = \cosh^2 k_{II} a$. Então a (1.26) fica,

$$\frac{AA^*}{CC^*} = \frac{1}{4} \left[\frac{(k_I + k_{III})^2}{k_I^2} (1 + \sinh^2 k_{II} a) + \left(\frac{k_{II}}{k_I} - \frac{k_{III}}{k_{II}} \right)^2 \sinh^2 k_{II} a \right]$$

Fazendo o produto entre $\frac{(k_I + k_{III})^2}{k_I^2} (1 + \sinh^2 k_{II} a)$ e colocando $\sinh^2 k_{II} a$ em evidência,

$$\frac{AA^*}{CC^*} = \frac{1}{4} \left\{ \frac{(k_I + k_{III})^2}{k_I^2} + \left[\frac{(k_I + k_{III})^2}{k_I^2} + \left(\frac{k_{II}^2 - k_I k_{III}}{k_I k_{II}} \right)^2 \right] \sinh^2 k_{II} a \right\}$$

Que desenvolvendo os termos que estão entre os colchetes obtém-se

$$\frac{AA^*}{CC^*} = \frac{1}{4} \left\{ \frac{(k_I + k_{III})^2}{k_I^2} + \left[\frac{k_I^2 + 2k_I k_{III} + k_{III}^2}{k_I^2} + \frac{k_{II}^4 - 2k_I k_{II}^2 k_{III} + k_I^2 k_{III}^2}{k_I^2 k_{II}^2} \right] \sinh^2 k_{II} a \right\}$$

Que dá

$$\frac{AA^*}{CC^*} = \frac{1}{4} \left\{ \frac{(k_I + k_{III})^2}{k_I^2} + \left[\frac{k_I^2 k_{II}^2 + 2k_I k_{II}^2 k_{III} + k_{II}^2 k_{III}^2 + k_{II}^4 - 2k_I k_{II}^2 k_{III} + k_I^2 k_{III}^2}{k_I^2 k_{II}^2} \right] \sinh^2 k_{II} a \right\}$$

Eliminando os termos simétricos e colocando k_I^2 e k_{II}^2 em evidencia através do agrupamento de termos semelhantes, a equação anterior fica,

$$\frac{AA^*}{CC^*} = \frac{1}{4} \left\{ \frac{k_{II}^2 (k_I + k_{III})^2 + [k_I^2 (k_{II}^2 + k_{III}^2) + k_{II}^2 (k_{II}^2 + k_{III}^2)]}{k_I^2 k_{II}^2} \right\} \sinh^2 k_{II} a$$

Portanto,

$$\frac{AA^*}{CC^*} = \frac{1}{4} \left[\frac{k_{II}^2(k_I + k_{III})^2 + (k_I^2 + k_{II}^2)(k_{II}^2 + k_{III}^2)\sinh^2 k_{II}a}{k_I^2 k_{II}^2} \right]$$

Logo,

$$\frac{CC^*}{AA^*} = \frac{4k_I^2 k_{II}^2}{k_{II}^2(k_I + k_{III})^2 + (k_I^2 + k_{II}^2)(k_{II}^2 + k_{III}^2)\sinh^2 k_{II}a} \quad (1.27)$$

Mas, $k_I^2 = k_{III}^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$ e $k_{II}^2 = \frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}$. Assim, a (1.9) dá,

$$T = \frac{CC^*}{AA^*}$$

Que substituindo os valores de k_I e k_{II} em (1.27) dá,

$$T = \frac{4 \frac{2mE}{\hbar^2} \frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}}{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2} \frac{8mE}{\hbar^2} + \left(\frac{2mE}{\hbar^2} + \frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2} \right) \left(\frac{2mE}{\hbar^2} + \frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2} \right) \sinh^2 k_{II}a}$$

$$T = \frac{\frac{8mE}{\hbar^2} \left(\frac{2mV_0}{\hbar^2} - \frac{2mE}{\hbar^2} \right)}{\left(\frac{2mV_0}{\hbar^2} - \frac{2mE}{\hbar^2} \right) \frac{8mE}{\hbar^2} + \left(\frac{2mE}{\hbar^2} + \frac{2mV_0}{\hbar^2} - \frac{2mE}{\hbar^2} \right)^2 \sinh^2 k_{II}a}$$

$$T = \frac{\frac{16m^2 V_0 E - 16m^2 E^2}{\hbar^4}}{\frac{16m^2 V_0 E + 16m^2 E^2 + 4m^2 V_0^2 \sinh^2 k_{II}a}{\hbar^4}}$$

Desenvolvendo algebricamente e arrumando os termos, a equação anterior fica,

$$T = \left[1 + \frac{\sinh^2 k_{II}a}{4 \frac{E}{V_0} \left(1 - \frac{E}{V_0} \right)} \right]^{-1} \quad (1.28)$$

Que também pode ser escrita como,

$$T = \left[1 + \frac{4 \frac{E}{V_0} \left(1 - \frac{E}{V_0} \right)}{e^{2k_{II}a} - e^{-2k_{II}a}} \right] \quad (1.29)$$

Se os expoentes forem muito grandes, isto é, para energias muito baixas e uma barreira espessa a (1.29) dá o seguinte resultado:

$$T \simeq 16 \frac{E}{V_0} \left(1 - \frac{E}{V_0}\right) e^{-2k_{II}a} \quad (1.30)$$

Esse resultado é surpreendente para a concepção clássica dos fenômenos, pois ele diz que um elétron com energia E que incide em uma barreira de potencial $V_0 > E$ e largura a , tem probabilidade finita de atravessar a barreira e ser detectado do outro lado da mesma.

Em um STM, quando a ponta da sonda está a apenas alguns angstroms da superfície da amostra e é aplicada uma diferença de potencial entre elas, surge uma pequena corrente elétrica. Essa corrente é chamada corrente de tunelamento pelo fato de a corrente surgir graças ao efeito túnel que ocorre com os elétrons da superfície analisada ou da ponta, dependendo da polaridade da diferença de potencial aplicada. Nesse caso, a barreira de potencial é a função trabalho ϕ do material da amostra.

É importante destacar que o STM só pode ser empregado na análise de condutores e semicondutores, pois em uma amostra dielétrica não há como acontecer o tunelamento de elétrons por causa da função trabalho deste tipo de material que em geral é muito elevada.

3.2. INSTRUMENTAÇÃO

O aparelho de STM é composto basicamente pela sonda, cerâmicas piezoelétricas, softwares e computadores. Neste item serão apresentados cada um dos elementos principais do STM e suas respectivas funções.

A análise da amostra é feita posicionando a sonda próxima a superfície da amostra. A sonda, na realidade, é uma ponta condutora muito fina, que geralmente é de tungstênio e que contém em sua extremidade um ou no máximo dois átomos. Quando aproximada da superfície da amostra pode-se ver o aspecto indicado na figura 2.3.

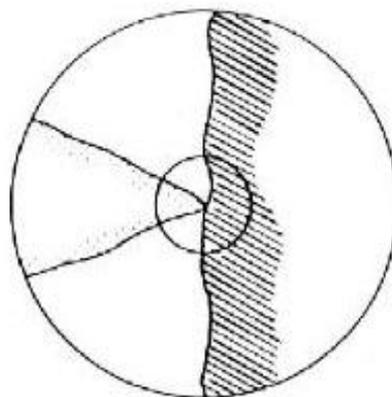


Figura 2.3 – A ponta (à esquerda) parece tocar a superfície da amostra (à direita) [3].

A figura 2.3 na realidade representa um fator de aumento de 10^4 . A figura 2.4 mostra um aumento por um fator de 10^8 .

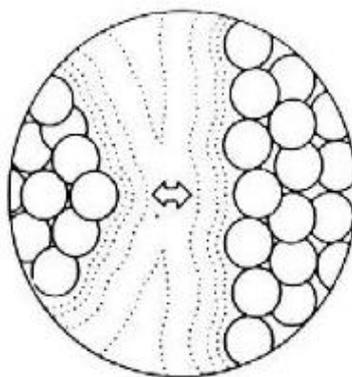


Figura 2.4 – Ápice da ponta (esquerda) e da superfície da amostra (direita). Os círculos sólidos indicam átomos e as linhas pontilhadas os contornos da densidade dos elétrons [3].

Quando a extremidade da ponta é posicionada muito próxima da superfície (aproximadamente 10 angstroms) da amostra surge uma corrente de tunelamento entre 0,1 nA e 10 nA, devido a diferença de potencial que varia tipicamente de 1 mV à 4 V [3], aplicada entre as mesmas, esta corrente está indicada pela seta na figura 2.4 e é dada por

$$I = V e^{(-A\phi^{1/2}d)} \quad (2)$$

onde V : é a diferença de potencial aplicado entre a ponta e amostra;

$A \cong 1,025 (eV)^{-1/2} A^{-1}$, para o vácuo

ϕ : é a altura da barreira, que é função do material da amostra e da sonda;

d : é a distância que separa a ponta da sonda e a superfície da amostra.

É graças à dependência exponencial de I em relação à d que o STM tem ótima resolução, pois como a distância entre a amostra e a ponta é da ordem de 10 \AA , uma pequena variação nessa distância significa uma variação considerável no valor da corrente I .

É a variação na corrente de tunelamento que faz com que o STM seja capaz de gerar a imagem da superfície. Sendo que se a ponta passar por alguma elevação, haverá um aumento no valor da corrente de tunelamento, que de acordo com a equação (2) representa uma diminuição na separação entre a ponta e a amostra. Se a ponta passar por uma depressão, ocorrerá o inverso, de acordo com a equação (2) a corrente de tunelamento cairá, pois isso representa um acréscimo na separação ponta-amostra.

É importante notar a diferença entre V e ϕ para não confundir seus respectivos significados físicos na equação (2), pois a diferença de potencial V (que é de alguns milivolts) aplicada entre a ponta e a amostra não tem relação com a altura da barreira de potencial ϕ , que como já foi citado, é função do material (metálico) que constitui tanto a amostra quanto a ponta, sendo que se os materiais constituintes forem iguais, ϕ terá o mesmo valor da função trabalho do metal.

A forma como a imagem é gerada a partir dessas variações no valor da corrente será descrita mais adiante.

O STM opera em dois modos diferentes: o modo de corrente constante e o modo de altura constante.

No modo de altura constante a ponta varre a superfície somente nas direções x e y e mantém a altura z fixa. Isso permite fazer sondagens rápidas, mas compromete a “profundidade” da imagem, além de deixar a ponta mais exposta a danos devido a eventuais choques com os átomos da superfície por causa da pequena separação ponta-amostra. Também é necessária atenção na interpretação dos dados adquiridos nesse modo, porque como a altura se mantém constante, são as variações da corrente de tunelamento que são usadas para gerar a imagem da superfície. Neste caso, nem sempre uma queda na corrente representa uma depressão, pois pode ser também que a amostra esteja contaminada com algum material não condutor, ocasionando assim, a queda da corrente.

O modo de corrente constante é o mais usado. Neste modo a corrente é programada para manter-se constante durante a varredura da superfície da amostra, assim, qualquer variação

que ocorra na distância entre a ponta e a superfície acarretará uma variação na corrente de tunelamento.

Quando ao varrer uma superfície, a ponta passa por elevações e depressões da mesma que alteram o valor da corrente medida. Essa variação na corrente aciona o sensor de tunelamento que tem como função corrigir a distância entre a ponta e a superfície para que se corrija a diferença entre corrente medida e a corrente definida pelo sistema [3,20].

O ajuste da distância ponta-superfície é realizado pelas cerâmicas piezoelétricas. As cerâmicas piezoelétricas são constituídas por materiais que tem a propriedade de transformar energia mecânica em energia elétrica (efeito piezoelétrico direto) ou transformar energia elétrica em energia mecânica (efeito piezoelétrico inverso) [21]. No STM é a segunda propriedade que é aproveitada, para isso a cerâmica piezoelétrica é submetida a uma diferença de potencial que provoca pequenos deslocamentos na mesma. Deslocamentos da ordem de décimos de nanômetros por Volt [22] que são aproveitados para posicionar a amostra sob a ponta ou a ponta sobre a amostra, garantindo assim, a precisão necessária para o funcionamento do experimento.

Todas as variações da corrente de tunelamento detectadas durante a varredura da amostra são coletadas por computadores dotados de softwares adequados que geram a imagem topográfica da superfície por meio dessas variações da corrente. Basicamente, a função do software é comparar valores da corrente preestabelecidos no sistema com valores coletados durante a varredura e através das diferenças entre esses valores gerar a imagem topográfica da superfície.

O instrumento de STM conta também com um sistema de amortecimento contra as vibrações do ambiente, por exemplo, o piso, e também pode operar em faixa de baixas pressões, no ar, em meio líquido e mesmo em soluções eletrolíticas [22].

CAPÍTULO IV

4. APLICAÇÕES DO STM

Neste capítulo serão apresentadas algumas aplicações do STM para demonstrar como tal instrumento é utilizado em pesquisas científicas. Aqui, a intenção é evidenciar o caráter experimental dos trabalhos que serão citados, isto é, mostrar como o STM foi utilizado para a realização dos estudos que interessavam aos pesquisadores. As referidas aplicações são trabalhos cujos artigos já foram publicados em revistas de divulgação científica.

Sendo que o STM pode ser usado tanto para analisar e caracterizar superfícies (numa linha de pesquisa chamada tribologia) quanto para mover átomos ou mesmo criar nanoestruturas em uma superfície (área denominada litografia), foram escolhidos artigos de trabalhos que reportam ao primeiro e ao segundo caso.

Um trabalho bastante famoso e pioneiro foi o realizado por D. M. Eigler e E. K. Schweizer [23]. No artigo intitulado “*Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope*”, publicado no volume 344 da revista Nature em 1990, Eigler e Schweizer manipularam átomos de xenônio sobre a superfície de uma amostra de níquel utilizando a ponta de um STM para movimentar os átomos de xenônio e posicioná-los nos locais desejados sobre a superfície de níquel.

O STM utilizado na experiência estava em um sistema de ultra alto vácuo (UHV, do inglês *ultra high vacuum*), resfriado a 4 K. Submete-se o STM a esse tipo de sistema para que a possibilidade de contaminação da amostra, por gases adsorvidos nela, seja reduzida ao máximo. A baixa temperatura é quem garante a estabilidade da amostra, pois ela evita a mobilidade natural dos átomos, permitindo assim, que os átomos de xenônio sejam manipulados individualmente.

A figura 3.1 apresenta uma sequência de imagens obtidas na experiência de Eigler e Schweizer. As imagens foram obtidas nas condições citadas acima com o STM sendo operado

em modo de corrente constante, com uma tensão de 0,010 V e corrente de tunelamento de 10^{-9} A.

Nas imagens, os pontos claros representam os átomos de xenônio que estão sobre a superfície de níquel e apresentam 1,6 angstroms de altura. A superfície de níquel não está resolvida na imagem.

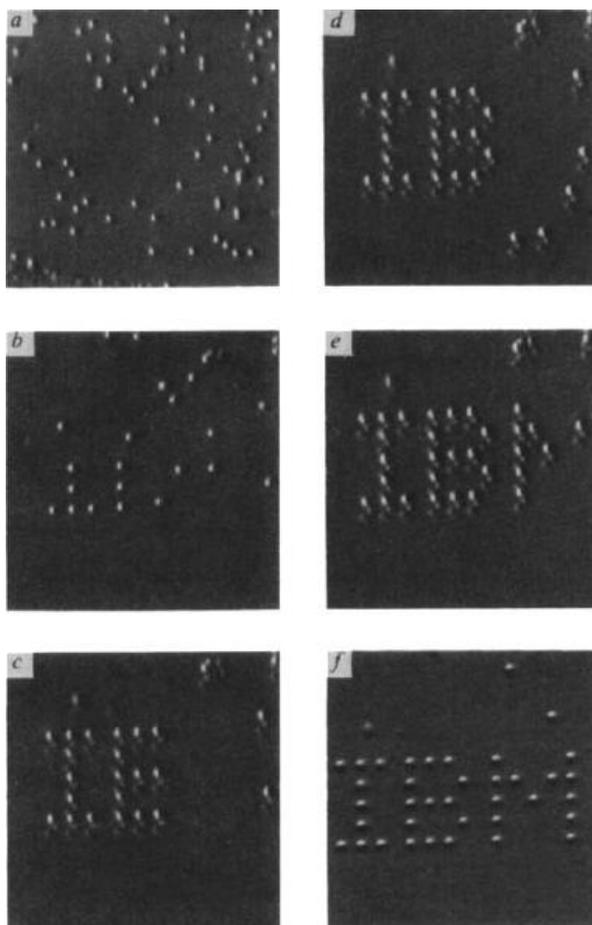


Figura 3.1 – Sequência de imagens que mostram passo-a-passo a superfície de níquel coberta com xenônio a partir do início da experiência, até o final. Os pesquisadores “escreveram”, com os átomos de xenônio sobre a superfície de níquel o nome da empresa que patrocinou a pesquisa.

Os átomos de xenônio estão inicialmente distribuídos em locais aleatórios (figura 3.1a). A partir de então, os átomos são manipulados um a um pela ponta do STM (figuras 3.1b a 3.1e) até chegar ao arranjo desejado, como mostrado na figura 3.1f. A ponta usada neste trabalho foi fabricada a partir de um fio de tungstênio.

Inicia-se a varredura da amostra com o intuito de posicionar a ponta sobre o átomo a ser movido. Quando o átomo é localizado, a varredura é paralisada e a ponta é posicionada acima deste.

Para aumentar a interação da ponta com o átomo de xenônio e conseqüentemente, arrastá-lo sobre a superfície de níquel é necessário diminuir a distância entre eles. Essa diminuição da distância ponta-xenônio é alcançada através de um acréscimo na corrente de tunelamento estabelecida no software do STM. A nova corrente fica na faixa de $1-6 \times 10^{-8}$ A.

Assim a ponta é aproximada do xenônio, que devido às interações de Van der Waals é atraído pela ponta. Mas a partir de determinada distância, as nuvens eletrônicas dos átomos da ponta e do xenônio começarão a se sobrepor. A partir daí, essa interação ponta-xenônio passará a ser repulsiva devido ao princípio de exclusão de Pauli. Aí então, o xenônio é empurrado até o local desejado. Ao atingir o local alvo, a ponta é afastada do xenônio que permanece ligado ao níquel. O afastamento da ponta é obtido restabelecendo o valor da corrente de tunelamento anterior à aproximação. Na figura 3.2 está representado esse processo de movimentação do átomo de xenônio.

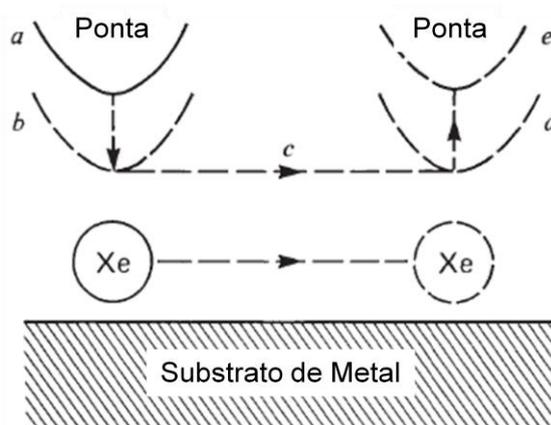


Figura 3.2 – A ponta é posicionada acima do átomo de xenônio (a); aproximada do átomo (b); devido à atração ponta-xenônio, o átomo é arrastado através da superfície com velocidade de 4 angstroms/segundo (c) até chegar ao local alvo (d); a ponta é afastada do xenônio (e).

Eigler e Schweizer observaram ainda, que para qualquer ponta ou tensão de polarização, existe uma altura limite abaixo da qual a ponta deve ser posicionada para que seja possível mover os átomos de xenônio paralelamente à superfície de níquel. E que existe uma altura limite menor para movimentar os átomos de xenônio perpendicularmente às linhas dos átomos de níquel. Isto é, essa altura limite percebida por eles, não depende da ponta usada, do sinal e magnitude da tensão aplicada.

Essa independência da altura limite em relação à ponta e tensão, sugeriu aos pesquisadores que a força dominante entre a ponta do STM e o átomo de xenônio é a interação de Van der Waals. Entretanto, segundo eles, para que essa hipótese fosse

confirmada, seriam necessárias outras investigações futuras. Hoje se sabe que as interações ponta-amostra são predominantemente interações de Van der Waals.

Interação de Van der Waals é uma força que age a distâncias de algumas dezenas de angstroms e atuam entre dipolos formados em moléculas. Esses dipolos podem ser permanentes (no caso de moléculas polares) ou induzidos (no caso de moléculas apolares) devido a movimentação dos elétrons que acabam formando dipolos que duram pouco tempo, mas que acabam induzindo a formação de outros dipolos, produzindo assim, forças atrativas entre eles. Logo, a força de Van der Waals é atrativa. Como a distância de separação entre os átomos da ponta do STM e da amostra é da ordem das distâncias onde a força de Van der Waals predomina, estes estão sujeitos a ela. Sendo que a partir do momento em que as nuvens eletrônicas começarem a se sobrepor devido a aproximação entre a ponta e amostra, o princípio de exclusão de Pauli diz que a atração irá diminuir até tornar-se nula e posteriormente, os átomos começarão a se repelir.

No mesmo trabalho de Eigler e Schweizer ainda foi demonstrado ser possível criar um tipo de estrutura mais simples utilizando o mesmo processo descrito anteriormente. Um heptâmero linear.

Embora Eigler e Schweizer tenham realizado duas experiências neste trabalho de suas autorias, o artigo publicado por eles é famoso principalmente por causa da primeira experiência aqui relatada, a qual teve bastante repercussão pelo fato de a manipulação de átomos sobre uma superfície ainda ser uma novidade na época da publicação do artigo.

As imagens obtidas no segundo experimento são apresentadas na figura 3.3.

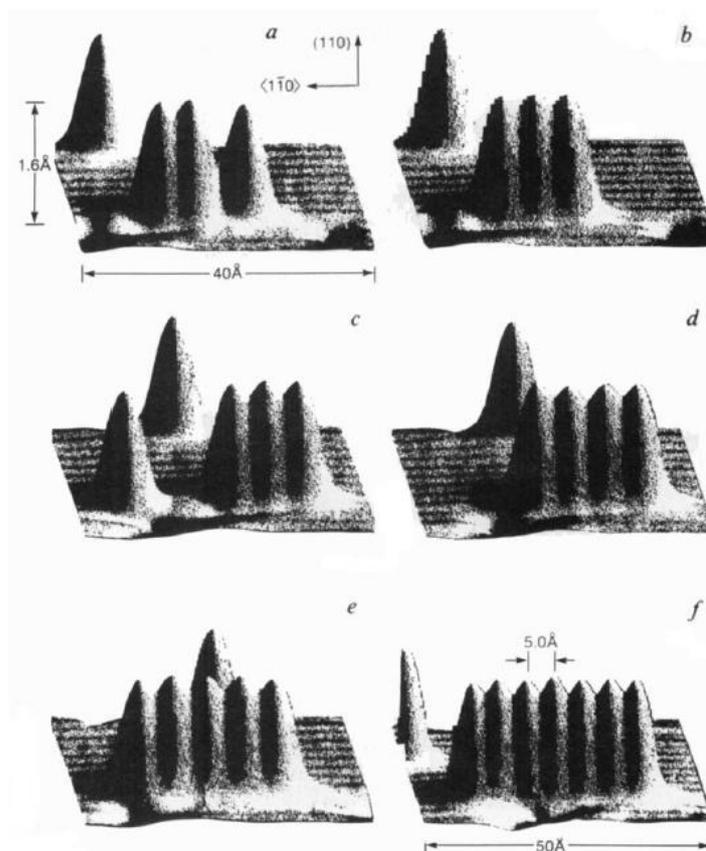


Figura 3.3 – Estágios da construção de um heptâmero. Os átomos de xenônio aparecem como elevações de 1,6 angstroms de altura. Em (a) aparece um dímero com um átomo próximo à direita, que foi utilizado para formar um trímero (b) e assim por diante (c-d-e) até formar o heptâmero (f).

Na figura 3.3, as linhas formadas pelos átomos de níquel da superfície são distinguíveis através da alternância de faixas claras e escuras que apontam na direção $\langle 1\bar{1}0 \rangle$. Os átomos de xenônio foram arrastados através da superfície dentro destas linhas, sendo que estes átomos ficaram separados por uma distância de 5 angstroms. Essa experiência foi concluída em uma hora.

Nesse trabalho foi possível criar estruturas que até então, não poderiam ser obtidas de outra maneira, inaugurando assim, uma nova área de estudos de superfície que *“usa o STM tanto para criar estruturas sobrepostas quanto para investigar as propriedades dessas superfícies”* [23]. Esse trabalho é o primeiro que se tem notícia de que átomos foram manipulados via STM para criar estruturas desejadas.

Outro trabalho no qual o STM foi usado é intitulado *“Defeitos superficiais em 2H-WS₂ observados por microscopia de tunelamento”* [24], de autoria de F. Wypych e colaboradores. Esse trabalho foi publicado no volume 21 da revista Química Nova em 1998.

A experiência consistiu em analisar a superfície de cristais de 2H-WS₂ recentemente clivados com o STM. Esse cristal é de grande interesse para a indústria petroquímica, uma vez que ele é largamente usado na formulação de catalisadores de hidrotratamento. Ele também é um importante lubrificante sólido e é usado em eletrodos de baterias.

Catalisadores de hidrotratamento são usados para realizar a retirada seletiva de elementos poluentes presentes nos produtos da queima de combustíveis. Como o próprio nome sugere, o meio através do qual esses catalisadores realizam essa retirada de poluentes são os processos de hidrotratamento como: hidrodessulfurização – HDS para retirada de enxofre, hidrogenitrogenação – HDN para retirada de nitrogênio, hidroxigenação – HDO para retirada de oxigênio e hidrodemetalização – HDM para retirada de metais, diminuindo assim, o efeito poluidor desses combustíveis.

Dessa forma, é importante para a indústria petroquímica conhecer a superfície do 2H-WS₂ e compreender a forma como ela interage com o ambiente.

Como o objetivo aqui é mostrar como o STM foi utilizado na experiência, o método de preparação da amostra não será descrito. Entretanto, é importante destacar que a amostra foi preparada a 900° C e que ela tem a estrutura cristalina indicada na figura 3.4.

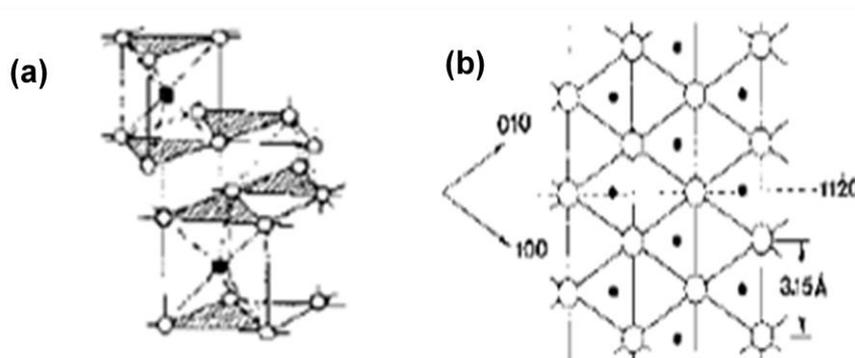


Figura 3.4-(a) representa um esquema tridimensional do 2H-WS₂ e (b) a projeção segundo um plano basal da rede cristalina. Os círculos não preenchidos representam os átomos de enxofre e os preenchidos, átomos de tungstênio.

Os círculos claros da figura representam átomos de enxofre e os escuros, átomos de tungstênio. “Os átomos de tungstênio estão coordenados a seis átomos de enxofre formando um prisma trigonal regular no qual cada átomo de enxofre está ligado a três átomos tungstênio sendo os prismas ligados pelos vértices” [24]. A projeção do plano basal do cristal na figura 3.4b, mostra que os átomos de enxofre são distribuídos de maneira que forma uma rede hexagonal.

Antes de a amostra ser submetida à análise com o STM, ela foi analisada por difratometria de raios-X com um difratômetro STOE operando a 40 KV e 35 mA, sendo que a amostra foi selada em um capilar de Lindemann de 0,3 mm de diâmetro que foi submetido a movimentos de rotação.

A difratometria de raios-X é uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos e consiste basicamente no estudo da difração de raios-X por esses materiais. No aparelho usado para realizar esse estudo (o difratômetro) ocorre a incidência de raios-X sobre a amostra. Como numa estrutura cristalina os átomos estão organizados em arranjos que se repetem de forma sistemática e a separação entre os átomos tem a mesma ordem de grandeza do comprimento de onda dos raios-X, os raios incidentes serão espalhados pelos átomos da amostra, de forma que os padrões destes espalhamentos serão periódicos devido à estrutura cristalina da amostra. O difratograma obtido será comparado a um difratograma de referência para determinar se há impurezas na amostra.

Nesta análise por difratometria, os dados foram acumulados durante 20 minutos e coletados por um detector sensível a posição onde não foi notada nenhuma reflexão referente a alguma possível impureza presente na amostra. Finalmente a amostra foi investigada com o STM.

O experimento com o STM foi conduzido utilizando o equipamento modelo Nanoscope II da VEECO, Santa Bárbara, com as medidas sendo realizadas ao ar, a uma temperatura ambiente de $23 \pm 1^\circ \text{C}$. O modo de operação do STM foi o de corrente constante e foram utilizadas pontas de $\text{Pt}_{0,8}\text{Ir}_{0,2}$ de 0,25 mm de diâmetro. *“A qualidade das pontas (que teoricamente deveria consistir de um único átomo isolado) foi testada em um monocristal de grafite pirolítico altamente orientado (HOPG), sendo consideradas boas aquelas pontas que produziram imagens com resolução atômica”* [24].

Embora a difratometria de raios-X tenha revelado que a amostra estava livre de impurezas, a imagem obtida com o STM revela que ela estava sim *“contaminada com pequenas elevações de material estranho (defeitos)”* [25]. A figura 3.5 é uma das imagens obtidas na experiência. As regiões mais claras representam elevações na superfície e as mais escuras, depressões.

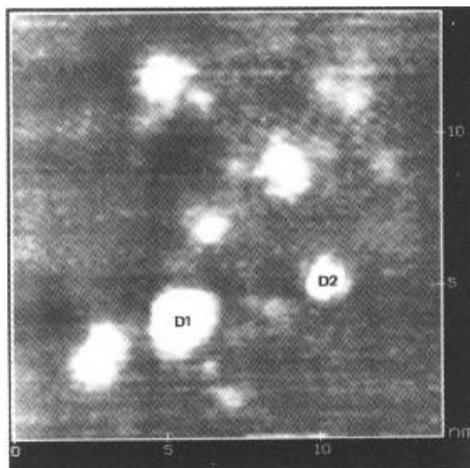


Figura 3.5-Imagem da superfície da amostra de 2H-WS₂ (área 150 x 150 angstroms), obtida via STM. Os defeitos estão representados por D1 e D2. Condições de medida: tensão de -950 mV e corrente de tunelamento de 3 nA.

Essa imagem com 150 Å x 150 Å de área (figura 3.5) foi obtida de uma amostra, utilizando-se uma tensão de -950 mV e corrente de tunelamento de 3 nA. Os defeitos designados por D1 e D2 são de 25 Å de diâmetro por 14 Å de altura e 16 x 10 Å, respectivamente.

Os autores relataram que os defeitos presentes na amostra não apareciam em grandes quantidades, porém, sendo muito difícil quantificá-los. Esses defeitos foram detectados, ora formando grandes aglomerados, ora formando pequenas ilhas circundadas por regiões muito limpas.

Também foi possível notar existência de depressões ao lado de alguns defeitos. Essas depressões provavelmente foram causadas pelo movimento brusco da ponta na direção da amostra. Esse movimento brusco deve-se à queda da corrente de tunelamento provocada pela presença da contaminação, pois a queda da corrente provoca no sistema de varredura, a ação imediata de aproximar a amostra da ponta ou a ponta da amostra através das cerâmicas piezoelétricas. Não havendo o restabelecimento da corrente, acaba ocorrendo o choque ponta-amostra que provoca as depressões.

A figura 3.6 apresenta outra imagem da superfície basal do monocristal de 2H-WS₂. Nessa imagem (com resolução atômica), obtida numa área de 40 x 40 Å, utilizando-se uma tensão de -1062 mV e corrente de 3,3 nA é possível observar mais dois defeitos indicados pelas setas. As regiões mais claras, que representam átomos de enxofre, formam estruturas hexagonais. Observa-se que os defeitos se apresentam como depressões (regiões

escuras), que se localizam exatamente onde deveriam estar o átomo de enxofre que fica no centro do hexágono. A figura 3.6b apresenta uma imagem topográfica com uma rotação de 30° em relação ao plano da figura 3.6a. As setas indicam as depressões que caracterizam os defeitos na superfície.

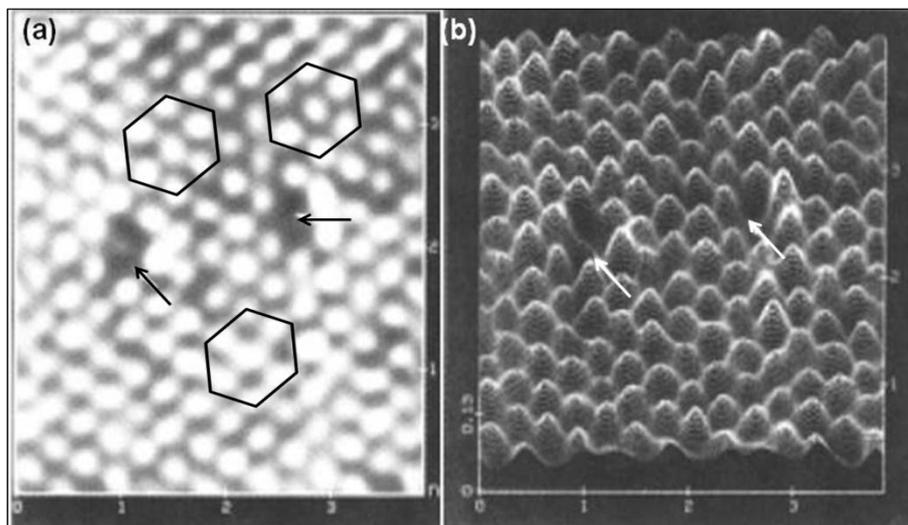


Figura 3.6-Imagem da superfície basal (área 40 x 40 angstroms) do monocristal de 2H-WS₂ obtida via STM (a). Em (b), projeção topográfica com rotação de 30° em relação ao plano da imagem. Condições da medida: tensão de -1062 mV e corrente de 3,3 nA.

Duas hipóteses foram sugeridas para explicar tais defeitos. A primeira é que o defeito é provocado pela vacância de um átomo de enxofre e a segunda é que o defeito é provocado pela presença de algum agente contaminante não-condutor naquela região.

Para Wypych e colaboradores, a segunda hipótese parece ser mais provável, pois cada átomo de enxofre está fortemente ligado a três átomos de tungstênio e vacâncias só são observadas após um processo de redução com hidrogênio realizado em altas temperaturas.

Isso revelou que mesmo com a amostra sendo preparada a 900° C, ainda é possível o observar defeitos presentes na superfície da mesma. O que leva a crer que quando as amostras são preparadas a temperaturas menores, estas são mais suscetíveis a defeitos. Esse é o caso dos catalisadores de hidrotreatamento.

Esse trabalho revela o quanto o STM é uma ferramenta poderosa para análise de superfícies, pois amostras analisadas por difratometria de raios-X aparentavam estar livres de qualquer defeito, quando na realidade apresentavam defeitos em suas superfícies. Esses defeitos só foram percebidos graças à análise detalhada da superfície da amostra via STM.

O STM é, portanto, um dos melhores instrumentos para analisar superfícies de materiais condutores ou semicondutores, pois somente estes materiais permitirão o surgimento da corrente de tunelamento que é fundamental para o funcionamento deste instrumento.

Neste capítulo foi detalhado o caráter experimental de diferentes trabalhos que utilizaram o STM como instrumento de análise de superfícies. Pode-se notar a versatilidade do STM nesses trabalhos, pois ele pode ser usado tanto para gerar imagens topográficas das superfícies, como também pode ser usado para manipular átomos sobre uma superfície. Nos trabalhos citados, o STM foi operado em modo de corrente constante, mas vale lembrar que ele pode ser operado também em modo de altura constante. Embora esse modo permita varreduras mais rápidas, ainda assim, ele é menos usado. Uma vez que a separação ponta-amostra é de apenas alguns angstroms, se houver alguma elevação na superfície que supere essa separação e o STM estiver em modo de altura constante provavelmente haverá choque entre a ponta e amostra que danificará ambos. Além de trabalhar em ambientes de baixa pressão, o STM também pode ser operado em meio líquido, como soluções eletrolíticas.

CAPÍTULO V

5. O ESTUDO DE FÍSICA MODERNA (FM) NO ENSINO MÉDIO (EM)

Um dos motivos que levaram à escolha do STM para ser tema de apresentação desse trabalho foi o fato de este equipamento ter sido inventado após o desenvolvimento da teoria quântica, e mais precisamente, seu princípio de funcionamento é resultado do efeito túnel, que diante da teoria clássica é um fenômeno impossível de acontecer.

Apresentar um tema que, de acordo com as nossas concepções cotidianas, pode parecer altamente incomum, é uma forma de evidenciar o caráter “anti-intuitivo” da teoria quântica [25]. Tal caráter é tido como empecilho para o pleno aprendizado da mesma.

Com base nisso, pretende-se, neste capítulo, fazer uma breve reflexão sobre a inserção do ensino de Física Moderna (FM) no Ensino Médio (EM), pois, apesar de os currículos de Física do EM atualmente fazerem referência ao ensino de FM, o que se percebe na realidade é que nem sempre os tópicos referentes a essa parte da Física são abordados na escola e, quando são, tal abordagem é feita meramente de forma superficial e incompleta.

Mesmo inserida nos currículos do EM, a FM (ou rudimentos dela) não é estudada na maioria das vezes, devido ao pouco tempo dedicado ao ensino de Física nesse nível. Assim, os conteúdos estudados são, na maior parte dos casos, aqueles propostos pelos livros disponíveis no mercado. Tais livros dividem a física em Mecânica, Física Térmica, Ondas, Óptica e Eletromagnetismo [26] e, ao final, acrescenta-se os tópicos de Física Moderna, onde está inserida a Relatividade e a Física Quântica.

Segundo as orientações feitas pelos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) “... *Espera-se que o ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação do ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transformação. Para tanto, é essencial que o*

conhecimento físico seja explicitado como um processo histórico, objeto de contínua transformação e associado às outras formas de expressão e produção humanas. É necessário também que essa cultura em Física inclua a compreensão do conjunto de equipamentos e procedimentos, técnicos ou tecnológicos, do cotidiano doméstico, social e profissional” [27].

Deste trecho, infere-se que o ensino de Física no EM deve ser voltado tanto para a formalização do conhecimento científico – mostrando a ciência física como um empreendimento humano que pode levar a grandes desenvolvimentos tecnológicos – quanto para satisfazer a curiosidade inerente do ser humano. O ensino, ainda, deve ser direcionado ao aluno de modo que o possibilite compreender o contexto histórico no qual estão inseridas as grandes descobertas, permitindo assim, que ele faça a ponte entre a Física e as outras formas de produção humana, como a Filosofia e as Artes, por exemplo.

Essa abordagem pode ser resumida a um ensino de Física com o enfoque em Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) [28], que deve tornar o aluno concluinte do EM capaz de lançar mão de conhecimentos físicos para compreender processos naturais, bem como os princípios físicos existentes em tecnologias presentes no cotidiano e, dessa forma, fazê-lo perceber como as descobertas na área da Física também influenciaram as transformações sociais vividas pela humanidade.

Outro trecho do PCN explicita a importância de desenvolver um conhecimento contextualizado e integrado à vida de cada aluno. Ele diz que o ensino deve *“Apresentar uma Física que explique a queda dos corpos, o movimento da lua ou das estrelas no céu, o arco-íris e também os raios laser, as imagens da televisão e as formas de comunicação. Uma Física que explique os gastos da “conta de luz” ou o consumo diário de combustível e também as questões referentes ao uso das diferentes fontes de energia em escala social, incluída a energia nuclear, com seus riscos e benefícios. Uma Física que discuta a origem do universo e sua evolução. Que trate do refrigerador ou dos motores a combustão, das células fotoelétricas, das radiações presentes no dia-a-dia, mas também dos princípios gerais que permitem generalizar todas essas compreensões. Uma Física cujo significado o aluno possa perceber no momento em que aprende, e não em um momento posterior ao aprendizado.”* [27]. Ou seja, o professor é encarregado de mostrar ao aluno que a Física é útil para a compreensão do seu cotidiano, expondo a ele que o conhecimento físico está tão presente em sua vida quanto os conhecimentos de língua portuguesa, por exemplo.

Esse é o (ou deveria ser) caráter norteador do ensino de Física atual. Porém, infelizmente essa não é a tendência seguida pela maioria dos professores e livros didáticos do EM. Embora haja esforços no sentido de implantar esse ensino de Física, ainda há resistência por parte de algumas escolas e dos próprios professores, pois, a intenção destes, ao final do EM médio é, também, deixar o aluno preparado para a realização de exames vestibulares.

A ênfase demasiada aos exames de vestibular acaba privilegiando um instrumento de ensino “mecânico”, no qual predomina a memorização de fórmulas e a resolução repetitiva de exercícios, e menosprezando um ensino onde o aluno possa efetivamente compreender a Física como uma ciência útil e vinculada aos demais processos de criação humana.

A prática desse instrumento mecânico leva o aluno a achar o estudo de Física enfadonho e desestimulante. Corriqueiramente, ouvem-se perguntas ou comentários como: “*para quê estudar Física?*”, ou ainda “*Física não serve para nada*”. Tais comentários ratificam o descompasso existente entre o ensino de Física e a realidade dos estudantes da escola média, bem como, a necessidade de rever a maneira de ensinar. Afinal, é comum os alunos levarem indagações para sala de aula sobre coisas que viram na televisão, revistas ou jornais, que por fazerem parte do cotidiano despertam interesse [29].

Nesse momento é que se evidencia a defasagem do currículo de Física, pois os noticiários televisivos, revistas e jornais estão a todo o momento divulgando descobertas recentes ou o lançamento de tecnologias direcionadas tanto ao entretenimento, quanto a assuntos mais complexos, como diagnósticos médicos mais rápidos, por exemplo. O problema não é a divulgação das descobertas e tampouco o surgimento de novas tecnologias. O problema é que os alunos têm contato com essas informações através de todos os meios de comunicação, menos nas aulas de Física.

Esse é, sem dúvida, o fator que transforma o ensino de Física atual em um ensino enfadonho, capaz de fazer os alunos do EM acharem que a Física é uma ciência que nada tem a ver com a realidade que os cerca. Exemplificando: o aluno vê em uma revista o lançamento de um novo telefone celular que não necessita de botões. Bastam leves toques no *display* do aparelho para obter o mesmo efeito que obteria se houvesse usado os botões (tela *touchscreen*). Ele se pergunta como será que funciona aquilo, mas ao chegar à aula de Física ouve o professor falando apenas de movimento com velocidade variável e gráficos, por exemplo.

Terrazzan [26] faz a seguinte pergunta: “*O que esperar de uma física escolar que esteja tão descompassada/defasada do seu tempo?*” É importante ressaltar que Terrazzan fez esta pergunta em 1992 e, passados quase 18 anos pouco foi feito.

Na realidade, desde então muita coisa foi proposta, muitas pesquisas realizadas, por várias vezes os currículos do EM foram revistos, foi publicada a Nova Lei de Diretrizes e Bases da Educação, o MEC publicou diversas recomendações, como as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (DCNEM), os PCNs e as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+), porém, poucas propostas foram colocadas em prática.

É claro que não se tem uma resposta objetiva para a pergunta feita por Terrazzan, pois não se trata apenas de rever e atualizar o currículo de Física do EM. A questão da formação e atualização dos professores é um processo relevante, que também deve ser apreciado antes de emitir juízo em relação ao quadro atual do ensino de física no Brasil. É comum ver professores de outras disciplinas, principalmente Matemática, lecionarem Física, o que evidencia a falta de professores licenciados nessa área como outro fator a ser levado em consideração.

No entanto, a reformulação/atualização do currículo de Física do EM é uma ação que necessita de um tratamento mais amplo do que o dedicado atualmente. Ou seja, embora o referido currículo inclua a introdução à FM, esta vem sendo tratada, somente, como um conteúdo a mais para ser abordado ao final do EM. Por muitos ela é vista como mais um conteúdo problemático [29] de um currículo saturado, pois o tempo exíguo dedicado às aulas de Física no EM, na maioria das vezes obriga os professores a cortarem alguns conteúdos do programa de Física para que seja repassado aos alunos no mínimo aquilo que se julgar muito importante. É aí que a FM torna-se um conteúdo problemático, pois a maioria dos professores encara a sua inserção nos programas do EM como um conteúdo que irá apenas inchar ainda mais o currículo que já é saturado.

Notoriamente, a vida das pessoas está diretamente ligada aos equipamentos e procedimentos, técnicos ou tecnológicos, do cotidiano doméstico, social e profissional aos quais os PCNs se referem. Isso se explica pelo grande número de artefatos tecnológicos, tais como câmera digital, telefone celular e computadores que estão presentes no cotidiano das pessoas.

É importante salientar também o aumento do número de tecnologias presentes no dia-a-dia das pessoas, que são resultados de aplicações de “efeitos quânticos”, como o efeito fotoelétrico, as transições de níveis de energia que ocorrem com os elétrons no interior dos átomos e o próprio tunelamento. O que se pretende evidenciar com essas palavras é que o ensino de FM deve deixar de ser tratado como mais um conteúdo problemático, e sim passar a ser visto como um instrumento fundamental para que os alunos compreendam a realidade que os cerca, atribuindo-lhe a importância que, de fato, possui.

Entretanto, isso não denota que se deve menosprezar, ou até mesmo abandonar, o ensino de Física Clássica, mas deixa claro que é urgente a necessidade de se rever como e o que ensinar [29].

Fazer tal revisão significa reorganizar o currículo escolar – adaptando-o para a realidade da sociedade na qual o aluno vive – e definir o que realmente é relevante para a formação neste nível, sempre lembrando que essa formação deverá ser de caráter geral, interdisciplinar e contextualizado. Isto é, ao final do EM o aluno deverá ser capaz de analisar fenômenos, ver como estes se relacionam com a ciência, compreender o processo de desenvolvimento da ciência e, sobretudo, compreender o contexto histórico de cada descoberta, relacionando-as com questões políticas, econômicas e/ou sociais.

Todavia, para que os alunos possam atingir esse nível de compreensão, faz-se necessário que os professores utilizem os livros didáticos com cautela e os analisem criticamente. Analisar um livro de maneira crítica é verificar a forma como este expõe seu conteúdo, a relevância das informações e se é adequado ao objetivo que se pretende atingir ao final do EM. Utilizá-lo com cautela é não fazer dos livros didáticos meros manuais de ensino que devem ser seguidos à risca.

Na maioria dos casos é o que ocorre: tais livros são usados como guias, onde o professor por vezes se coloca como um repetidor, que nada acrescenta de conhecimento ao conteúdo. Isso é danoso ao ensino de Física, mas o quadro é bem pior quando a análise refere-se ao ensino de FM, visto que os livros didáticos voltados para o EM sempre dedicam apenas sua parte final para falar desta. Esse tratamento dispensado à FM influencia o tempo dedicado às aulas e a importância dada pelos professores a ela.

Outro problema da maioria dos livros didáticos é a divisão adotada para os conteúdos, normalmente divididos em Cinemática, Dinâmica, Física Térmica, Ondas, Óptica,

Eletromagnetismo e Física Moderna (Relatividade e Física Quântica), nesta ordem. Esse tipo de divisão causa a falsa impressão no aluno de que a física se desenvolveu de forma linear e que todo esse desenvolvimento foi obra da mente de grandes gênios [26]. Além disso, o professor muitas vezes sente-se obrigado a repassar todo o conteúdo presente no livro aos alunos.

Ao tentar repassar este conteúdo, o docente, na maioria das vezes, tende a seguir a ordem da disposição apresentada no livro, reforçando a idéia de desenvolvimento linear da ciência física. O problema é que, com essa tentativa, o tempo torna-se escasso e a FM acaba sendo “excluída” do processo de aprendizagem do EM, já que para muitos seu ensino além de ser derradeiro, não é prioritário.

Neste sentido o PCN+ diz que *“O vasto conhecimento de Física, acumulado ao longo da história da humanidade, não pode estar todo presente na escola média. Será necessário sempre fazer escolhas em relação ao que é mais importante ou fundamental, estabelecendo para isso referências apropriadas.”* [30]

Os PCNs não são regras a serem seguidas, mas sim recomendações feitas aos professores para que seja possível construir uma base de ensino que contemple o objetivo da formação global, interdisciplinar e contextualizada.

Nesse contexto, o professor poderia ser o maior agente de transformação do ensino de Física. Transformação, porque um dos grandes problemas desse ensino hoje é a insignificância atribuída à FM. Cabe se perguntar: por que não ensinar FM antes do final do EM? Porque não inseri-la após o estudo de óptica, no lugar de alguns tópicos referentes ao estudo de ondas, por exemplo?

Pode parecer absurdo sugerir a exclusão de uma parte, qualquer que seja do estudo de Ondas, como no exemplo anterior, porém é curioso que poucos contestem a ausência ou a precariedade de ensino de FM no EM. Mas vale lembrar que este ramo da Física faz parte do cotidiano dos alunos, estando presente no funcionamento de vários objetos, como citado anteriormente. De fato, o desenvolvimento da teoria ondulatória também possibilitou diversos avanços. Entretanto, é inegável que para o indivíduo da sociedade atual compreender tecnologias que fazem parte do seu dia-a-dia, este deve conhecer alguns princípios da FM.

O foco não é simplesmente defender a inserção da FM no EM, mas sim defender que seja atingido o objetivo de ensinar a Física presente no cotidiano do aluno. É bem verdade que todos os ramos da Física contribuíram de maneira significativa para as diversas tecnologias que fazem parte do cotidiano dos alunos. Mas é inegável que nesta era de grandes avanços, a FM ocupa lugar de destaque, possibilitando o desenvolvimento e a miniaturização de diversos aparelhos eletrônicos, como o telefone celular, *ipods* e computadores por exemplo.

No que diz respeito à linguagem própria da física, o PCN fala que “*A Física expressa relações entre grandezas através de fórmulas, cujo significado pode também ser apresentado em gráficos. Utiliza medidas e dados, desenvolvendo uma maneira própria de lidar com os mesmos, através de tabelas, gráficos ou relações matemáticas. Mas todas essas formas são apenas a expressão de um saber conceitual, cujo significado é mais abrangente. Assim, para dominar a linguagem da Física é necessário ser capaz de ler e traduzir uma forma de expressão em outra, discursiva, através de um gráfico ou de uma expressão matemática, aprendendo a escolher a linguagem mais adequada a cada caso*”. [27]

Entende-se que ao final do EM, o aluno deverá ter desenvolvido a habilidade de relacionar grandezas através de expressões matemáticas e montar gráficos ou tabelas. Porém, o professor deve, no ato de ensinar, levar em consideração as aptidões dos alunos por determinadas disciplinas. Ou seja, o docente deve compreender que as turmas são heterogêneas neste sentido, sendo que nem todos os alunos sentem-se desafiados a explorar o conhecimento físico; poucos alunos irão prosseguir no ensino superior e uma parcela ainda menor destes que ingressam no ensino superior enveredarão por carreiras na área das ciências e tecnologia [26].

Terrazzan lembra que para a maior parte dos alunos do EM este será o único contato durante a sua escolarização formal com a ciência Física e, para alguns daqueles que prosseguirão no ensino superior, este será o último contato formal com a Física. Outra vez fica clara a influência que o cotidiano dos alunos exerce sobre o ensino.

Já os aspectos de interdisciplinaridade e contextualização caminham praticamente juntos. Uma vez que a contextualização do ensino de FM significa apresentá-la, evidenciando sua influência sobre a sociedade da época de cada descoberta. E também, a influência que as concepções de cada época exerceram sobre os cientistas.

A interdisciplinaridade aparece como a via necessária para chegar à contextualização, já que, para evidenciar os aspectos supramencionados, procuram-se as relações da Física com as demais formas de produção humana e, assim, chega-se às outras disciplinas.

No entanto, o conceito de interdisciplinaridade é passível de interpretações que podem levar a uma prática de ensino inadequada, pois a busca por relações entre a Física e as demais disciplinas pode levar à falsa idéia de uma unificação da ciência, que na realidade nunca houve, ignorando que *“justamente pela definição clara de seu objeto de estudo é que a ciência se desenvolveu e desfruta de grande reconhecimento histórico e sócio-cultural. Todavia, nem todo o conhecimento é disciplinar.”* [31].

Portanto, o ensino interdisciplinar deve ser utilizado apenas como uma ferramenta para mostrar que nem todo conhecimento é disciplinar e que as ciências desenvolveram-se por vezes de forma independente uma da outra, participando juntas ou não do processo de criação e/ou descoberta.

Considerando que é no EM que se pretende formar cidadãos críticos, com capacidade de análise e intervenção nos acontecimentos; cidadãos que compreendam o processo de criação de tecnologias do seu cotidiano e que sejam capazes de associar, imediatamente, o conhecimento adquirido na sala de aula com o contexto no qual estão inseridos; a FM cumpre muito bem essa função. Posto que, questões como energia e armamento nuclear, diagnósticos médicos, os problemas ambientais enfrentados pelo mundo inteiro, a evolução de aparelhos eletrodomésticos e eletroeletrônicos – como, por exemplo, os televisores e telefones celulares – a miniaturização de alguns destes aparelhos, o surgimento de novos materiais, entre outras coisas, são temas atuais capazes de provocar acalorados debates, ou simplesmente despertar a curiosidade das pessoas.

Por fim, fica claro que a Física desenvolvida durante todo o século XX e neste começo do século XXI deve receber a mesma importância no ensino que aquela desenvolvida nos demais séculos. Lembrando que não se trata de abandonar o ensino da Física Clássica para focalizar o ensino em FM, mas sim de buscar o equilíbrio entre as duas, escolhendo adequadamente o que vai ser ensinado, pondo sempre como o objetivo a formação geral, e não específica, do aluno que irá contribuir tanto para a formação de cidadãos críticos quanto, para a divulgação da ciência Física, mostrando-a como um empreendimento humano, que está associado às demais formas de produção humana.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES

Observando a história da microscopia, desde o início quando esta era considerada um passatempo e as pessoas que faziam observações com o microscópio óptico, considerados meros curiosos que nada tinham a contribuir para a ciência, pode-se notar o enorme passo dado pela ciência vendo o estágio em que a microscopia se encontra.

Os microscópios de ponta de prova (SPM), especialmente o STM que foi descrito neste trabalho, são o estágio mais recente do desenvolvimento da microscopia. Eles tornaram possível obter imagens de superfícies com resolução atômica e até mesmo manipular átomos. Entretanto, isso não quer dizer que os microscópios ópticos e eletrônicos perderam importância. Eles continuam sendo largamente usados e também estão em constante aprimoramento, assim como os SPMs.

O STM faz parte dos avanços tecnológicos que a Física Quântica (FQ) proporcionou a sociedade e curiosamente é um dos aparelhos que abriram as portas para a miniaturização de circuitos que compõem aparelhos eletrônicos e análise de superfícies, permitindo aos pesquisadores compreender mais sobre a estrutura de alguns materiais e como eles interagem com o ambiente e outros materiais também.

Porém, dada a importância do desenvolvimento da FQ para grande parte dos avanços tecnológicos recentes, nota-se que o ensino de Física Moderna (que compreende Relatividade e Física Quântica) não tem a devida atenção que merece nas escolas de nível médio, que por muitas vezes deixam o aluno concluinte deste nível sem nenhum conhecimento prévio de FQ.

É evidente que a FQ possui formulação matemática complexa e que não há possibilidade de repassá-la aos alunos do EM, mas seus conceitos e relações mais simples devem sim ser apresentados para estes alunos, pois se faz necessário ensinar a Física que se desenvolveu a partir do século XX e neste início de século XXI, para que estes alunos tornem-

se cidadãos em sintonia com a ciência que está sendo desenvolvida em seu tempo e que possam compreender o avanço tecnológico presenciado por eles.

Como os cursos de graduação em Física, são cursos que prezam pela parte teórica da Física, espera-se que com esse trabalho, os alunos de graduação, especialmente os de licenciatura, tomem conhecimento da aplicabilidade do efeito túnel e que desperte o interesse para que sejam estudados mais fenômenos quânticos para que este conhecimento possa auxiliá-los na prática do ensino, enriquecendo as aulas e encorajando-os a tornarem-se agente de mudança dos métodos de ensino de Física no ensino médio.

REFERÊNCIAS

- [1] HISTÓRIA do microscópio. **Portal São Francisco**. Disponível em <<http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/microscopio/historia-do-microscopio.php>>. Acesso em: 30 jun. de 2009;
- [2] SABBATINI, R.M.E. O Advento do Microscópio. **Cérebro e Mente**. 25 mai. 2003. Disponível em <http://www.cerebromente.org.br/n17/history/neurons1_p.htm#microcosmos>. Acesso em: 20 jul. 2009;
- [3] DUARTE, F. C. Microscópio de Tunelamento com Varredura (STM) e Microscópio de Força Atômica (AFM). **Departamento de Semicondutores Instrumentos e Fotônica – DSIF/UNICAMP**. 27 de jun. 2000. Disponível em <http://www.dsif.fee.unicamp.br/~furio/IE607A/STM_AFM.pdf>. Acesso em: 02 jul. de 2009;
- [4] SANTOS, R. E. **Microscópio Óptico**. 27 de jun. 2000. Disponível em <<http://www.dsif.fee.unicamp.br/~furio/IE607A/MO.pdf>>. Acesso em: 02 jul. de 2009;
- [5] Microscópio Biológico com Correção Infinita Binocular ou Trinocular - Q711H. **Quimis**. Disponível em <<http://www.quimis.com.br/produtos.php?prod=176>>. Acesso em: 21 jul. de 2009;
- [6] Microscope. **Knowledgepush**. Disponível em <<http://www.knowledgerush.com/kr/encyclopedia/Microscope>>. Acesso em 02 fev. de 2010;
- [7] MALISCA, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura**. Disponível em <http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-MEV/MEV_Apostila.pdf>. Acesso em: 16 jul. de 2009;
- [8] 1931: Físico alemão cria o microscópio eletrônico. **Deutsche Welle**. Disponível em <<http://www.dw-world.de/dw/article/0,,1136122,00.html>>. Acesso em: 30 jun. 2009;
- [9] CHESMAN, C., ANDRÉ, C. MACÊDO, A. **Física Moderna: Experimental e Aplicada**. 2ª ed. São Paulo. Editora Livraria da Física;
- [10] GALLETI, R. S. Introdução a Microscopia Eletrônica. **Revista O Biológico**. v. 65, n. 1/2, p. 33 – 35, jan./dez. 2003. Disponível em: <http://www.biologico.sp.gov.br/docs/bio/v65_1_2/galleti.pdf>. Acesso em: 15 jul. de 2009;

- [11] Microscópio eletrônico de transmissão. **Centro de Microscopia Eletrônica – CEME/UNIFESP**. Disponível em: <http://www.unifesp.br/centros/ceme/micro_trans.htm>. Acesso em: 23 jul. de 2009;
- [12] MARCHI, E. C. S., CASTRO, D. M. Revisão de Microscopia. Disponível em <<http://omnis.if.ufrj.br/~micha/arquivos/micgeral.PDF>>. Acesso em 25 jul. 2009;
- [13] TOSIN, G. C. Microscopia Eletrônica de Transmissão. **Departamento de Semicondutores Instrumentos e Fotônica – DSIF/UNICAMP**. Disponível em: <<http://www.dsif.fee.unicamp.br/~furio/IE607A/TEM.pdf>>. Acesso em 02 jul. 2009;
- [14] Células do Sangue. **CBME Informação**. Disponível em: <http://cbme.usp.br/cbme/index.php/news_site/imagens/biologia_1/citologia_1/celulas>. Acesso em: 21 jul. 2009;
- [15] FONSECA FILHO, H. D. **Fabricação de Nanoestruturas Condutoras por AFM**. Dissertação de Mestrado – Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004;
- [16] VALADARES, E. C. Introdução aos Microscópios Eletrônicos de Varredura e Tunelamento. **Revista brasileira do ensino de física**. v. 14, n. 2, p. 63 – 71, (1992). Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol14a12.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2009;
- [17] Esquema de um STM e curral quântico. **Physics Central**. Disponível em <<http://www.physicscentral.org/explore/action/atom-research.cfm>>. Acesso em: 22 dez. 2009;
- [18] HELMAN, J. S. **Laboratório de Microscopia – LABNANOS/CBPF**. Disponível em <<http://www.cbpf.br/~nanos/MENU/apresenta.htm>>. Acesso em: 16 jul. 2009;
- [19] EISBERG; RESNICK. **Física Quântica**. Rio de Janeiro. Elsevier. 1979;
- [20] SPM (*Scanning Probe Microscope*) – Microscópio de Força Atômica, Tunelamento e Família. **Laboratório de Filmes Finos – LFF/IFUSP**. Disponível em <<http://fap01.if.usp.br/~lff/spm.html>>. Acesso em: 07 ago. de 2009;
- [21] OLIVEIRA, B. A. **Desenvolvimento de um Isolador de Vibração Pseudoelástico**. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM-DM-123A/8, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95p.
- [22] TIPLER, P. A; Vol. 4 **Física. Física Moderna: Mecânica Quântica, Relatividade e a Estrutura da Matéria**. 4ª ed. Rio de Janeiro. LTC;
- [23] BINNING, G., ROHRER, H. **Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope**. Nature, v. 344, p. 524-526, (1990);

- [24] WYPYCH, F., WEBER, T., PRINS, R. **Defeitos Superficiais Em 2H-WS₂ Observados Por Microscopia De Tunelamento.** Revista Química Nova, v. 21, n. 1, p. 5 – 10, (1998);
- [25] GRECA, I. M., MOREIRA, M. A., HERSCOVITZ, V. E. Uma Proposta para o Ensino de Física Quântica. **Revista brasileira do ensino de física.** v. 23, n. 4, p. 444 – 457, (2001). Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v23n4/v23n4a10.pdf>>. Acesso em 13 set. de 2009;
- [26] TERRAZZAN, E. A., A Inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na Escola de 2º Grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física.** v. 9, n. 3, p. 209 – 214, (1992). Disponível em <<http://www.fsc.ufsc.br/cbef/port/09-3/artpdf/a2.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2009;
- [27] Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio): Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. **Ministério da Educação.** Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2009;
- [28] CRUZ, S. M. S. C., ZYLBERSZTAJN, A. Enfoque ciência, tecnologia e sociedade e a aprendizagem centrada em eventos. **Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia em uma concepção integradora.** p. 171 – 196, 2ª ed., Florianópolis. Editora da UFSC. 2005;
- [29] OLIVEIRA, F. F., VIANNA, D. M., GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista brasileira do ensino de física.** v. 29, n. 3, p. 447 – 454, (2007). Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v29n3/a16v29n3.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2009;
- [30] PCN+ (Ensino Médio): orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais. **Ministério da Educação.** Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em: 16 set. 2009;
- [31] RICARDO, E. C., ZYLBERSZTAJN, A. O Ensino De Física Em Nível Médio E Os Parâmetros Curriculares Nacionais Na Formação Inicial. **IX ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA.** Jaboticatubas. (2004). Disponível em <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/ix/sys/resumos/T0134-1.pdf>>. Acesso em 20 set. de 2009.
- [32] YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A. **Física IV: ótica e física moderna.** São Paulo. Pearson Addison Wesley.
- [33] HECHT, E. **Óptica.** Addison – Wesley.
- [34] NUSSENZVEIG, H. M. Vol. 4. **Curso de Física Básica: ótica, relatividade, física quântica.** São Paulo. Editora Edgard Blücher. (2002).

APÊNDICE

A. CRITÉRIO DE DIFRAÇÃO DE RAYLEIGH

Uma fonte luminosa pode ser considerada sendo composta por diversas fontes pontuais. A separação mínima entre duas fontes pontuais adjacentes é o que define se um instrumento óptico tem boa ou má resolução. Quanto menor forem os diâmetros das fontes e a separação entre duas fontes adjacentes distinguidas pelo instrumento óptico, melhor será a resolução do mesmo.

Entretanto, há uma separação mínima limite para que essas fontes sejam distinguidas, pois se a separação entre duas fontes adjacentes for menor que a limite, as fontes começam a aparecer sobrepostas, tornando-se indistinguíveis.

O cálculo do valor dessa separação mínima combinado com o critério de Rayleigh é que permite definir o limite de resolução do microscópio óptico [32].

Considere ondas planas incidentes numa abertura circular pertencente ao plano Σ e um padrão de difração projetado num alvo σ , como mostra a figura A.1.

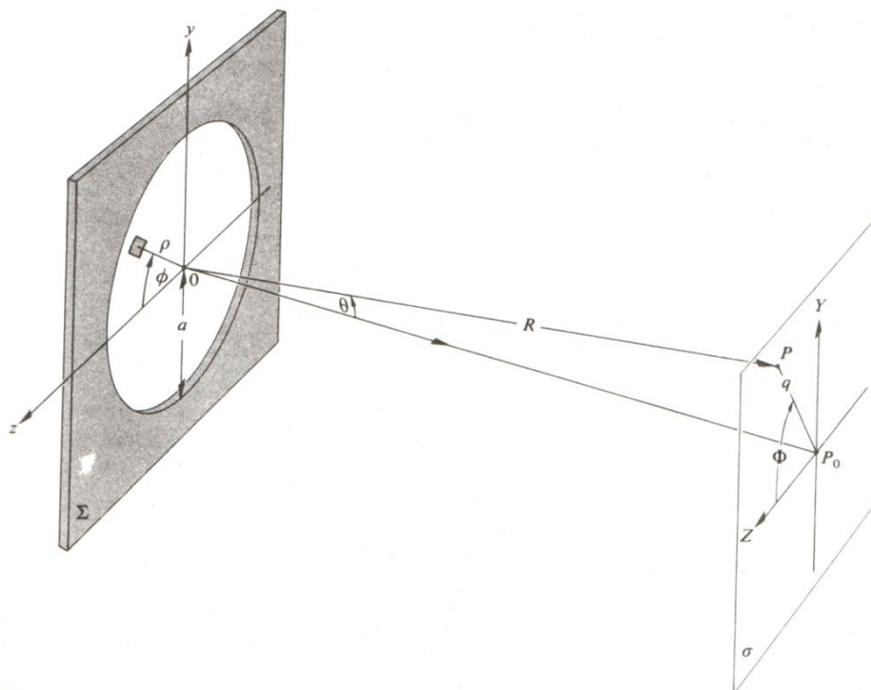


Figura A.1 – Geometria para análise de uma abertura circular [32].

Adota-se $R \gg D$ (D é o diâmetro da abertura) e que σ está muito afastado de Σ . Essas condições ajudam a simplificar a matemática do problema e são conhecidas como condições de Fraunhofer [32].

A perturbação óptica em P para uma abertura arbitrária afastada é dada por

$$E = \frac{\varepsilon_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} \iint_{\text{Abertura}} e^{ik(Yy + Zz)/R} \quad (A)$$

A geometria do problema sugere o uso de coordenadas polares esféricas nos planos Σ e σ . Assim obtém-se

$$\begin{aligned} z &= \rho \cos \phi & y &= \rho \sin \phi \\ Z &= q \cos \Phi & Y &= q \sin \Phi \end{aligned}$$

Nesse sistema de coordenadas, o elemento de superfície é

$$dS = \rho \, d\rho \, d\phi$$

Realizando a troca de variáveis a equação (A) fica da seguinte forma:

$$E = \frac{\varepsilon_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} \int_{\rho=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} e^{ik(\rho q \sin \phi \sin \Phi + \rho q \cos \phi \cos \Phi)/R} \rho \, d\rho \, d\phi \quad (A.1)$$

Que pode ser escrita como

$$E = \frac{\varepsilon_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} \int_{\rho=0}^a \int_{\phi=0}^{2\pi} e^{i(k\rho q/R) \cos(\phi - \Phi)} \rho \, d\rho \, d\phi \quad (A.2)$$

Como o problema tem geometria axial, o resultado deve ser independente de Φ . Então é conveniente escolher $\Phi = 0$ na (A.2). Assim, associado à variável Φ , fica a integral

$$\int_0^{2\pi} e^{i(k\rho q/R) \cos \phi} \, d\phi \quad (*)$$

que ocorre com frequência em física. Mas trata-se de uma função que não pode ser decomposta em formas mais simples [33, 34].

A função definida por

$$J_0(u) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{iu \cos v} dv \quad (A.3)$$

é conhecida como função de Bessel (de primeira espécie) de ordem zero. De forma geral, a função de Bessel de primeira espécie e ordem m é definida por

$$J_m(u) = \frac{i^{-m}}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{i(mv+u \cos v)} dv \quad (A.4)$$

A figura A.2 apresenta uma tabela que contém alguns valores numéricos das funções de Bessel para uma gama de valores de u . Encontra-se essa tabela na maioria dos livros de tabelas matemáticas [33].

Funções de Bessel

x	$J_1(x)^*$	x	$J_1(x)$	x	$J_1(x)$
0.0	0.0000	3.0	0.3391	6.0	-0.2767
0.1	0.0499	3.1	0.3009	6.1	-0.2599
0.2	0.0995	3.2	0.2613	6.2	-0.2329
0.3	0.1483	3.3	0.2207	6.3	-0.2081
0.4	0.1960	3.4	0.1792	6.4	-0.1816
0.5	0.2423	3.5	0.1734	6.5	-0.1538
0.6	0.2867	3.6	0.0955	6.6	-0.1250
0.7	0.3290	3.7	0.0538	6.7	-0.0953
0.8	0.3688	3.8	0.0128	6.8	-0.0652
0.9	0.4059	3.9	0.0272	6.9	-0.0349
1.0	0.4401	4.0	0.0660	7.0	-0.0047
1.1	0.4709	4.1	0.1033	7.1	-0.0252
1.2	0.4983	4.2	0.1386	7.2	-0.0543
1.3	0.5220	4.3	0.1719	7.3	-0.0826
1.4	0.5419	4.4	0.2028	7.4	-0.1096
1.5	0.5579	4.5	0.2311	7.5	-0.1352
1.6	0.5699	4.6	0.2566	7.6	-0.1592
1.7	0.5778	4.7	0.2791	7.7	-0.1813
1.8	0.5815	4.8	0.2985	7.8	-0.2014
1.9	0.5812	4.9	0.3147	7.9	-0.2192
2.0	0.5767	5.0	0.3276	8.0	-0.2346
2.1	0.5683	5.1	0.3371	8.1	-0.2476
2.2	0.5560	5.2	0.3432	8.2	-0.2580
2.3	0.5399	5.3	0.3460	8.3	-0.2657
2.4	0.5202	5.4	0.3453	8.4	-0.2708
2.5	0.4971	5.5	0.3414	8.5	-0.2731
2.6	0.4708	5.6	0.3343	8.6	-0.2728
2.7	0.4416	5.7	0.3241	8.7	-0.2697
2.8	0.4097	5.8	0.3110	8.8	-0.2641
2.9	0.3754	5.9	0.2951	8.9	-0.2559

Figura A.2 – Tabela com valores numéricos para funções de Bessel¹ [33]

Fazendo $u = kpq/R$ na integral (*), vem

$$\int_0^{2\pi} e^{iu \cos \phi} d\phi$$

¹ $J_1(x) = 0$ para $x = 0; 3,83; 7,016; 10,173; 13,324$.

que de acordo com a definição da função de Bessel de ordem zero (equação (A.3)) é igual a $2\pi J_0(u)$. Portanto,

$$\int_0^{2\pi} e^{i(k\rho q/R)\cos\phi} d\phi = 2\pi J_0(k\rho q/R) \quad (A.5)$$

Substituindo a (A.5) em (A.2), resulta

$$E = \frac{\varepsilon_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} 2\pi \int_0^a J_0(k\rho q/R) \rho d\rho \quad (A.6)$$

Para resolver a integral associada a ρ na (A.6) convém introduzir uma relação de recorrência que caracteriza as funções de Bessel [33].

$$\frac{d}{du} [u^m J_m(u)] = u^m J_{m-1}(u).$$

Quando $m = 1$, tem-se

$$\frac{d}{du} [u J_1(u)] = u J_0(u)$$

que dá

$$\int_0^u u' J_0(u') du' = u J_1(u) \quad (A.7)$$

onde u' é uma variável muda.

Fazendo $w = k\rho q/R$ e $d\rho = (R/kq)dw$ integral da (A.6) e trocando os limites de integração, obtém-se

$$\int_{\rho=0}^{\rho=a} J_0(k\rho q/R) \rho d\rho = \int_{w=0}^{w=kaq/R} J_0(w) \left(\frac{Rw}{kq}\right) \left(\frac{R}{kq}\right) dw$$

que dá

$$\int_{\rho=0}^{\rho=a} J_0(k\rho q/R) \rho d\rho = \left(\frac{R}{kq}\right)^2 \int_{w=0}^{w=kaq/R} J_0(w) w dw \quad (A.8)$$

Usando a relação da (A.7) na integral que aparece no lado direito da (A.8), vem

$$\int_{\rho=0}^{\rho=a} J_0(k\rho q/R) \rho d\rho = \left(\frac{Ra}{kq}\right) J_1(kaq/R)$$

Assim, a equação (A.6) pode ser escrita como

$$E = \frac{\varepsilon_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} 2\pi \left(\frac{Ra}{kq}\right) J_1(kaq/R)$$

Que também pode ser reescrita da seguinte forma:

$$E = \frac{\varepsilon_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} 2\pi a^2 \left(\frac{R}{kaq}\right) J_1(kaq/R)$$

A irradiância em P é dada por $\frac{1}{2}EE^*$ [33], onde E^* é o complexo conjugado de E .

Neste caso

$$I = \frac{2\varepsilon_A^2 A^2}{R^2} \left[\frac{J_1(kaq/R)}{kaq/R} \right]^2 \quad (A.9)$$

onde $A^2 = (\pi a^2)^2$, que é a área da abertura circular.

Para determinar a irradiância no centro da figura de difração (ponto P_0), faz-se $q = 0$ na (A.9). Mas por enquanto essa equação ficará de lado. É útil introduzir algumas relações utilizando a (A.3), (A.4) e a relação de recorrência, adotando nestas $u = kaq/R$, sendo $q = 0$ no centro da figura, $u = 0$. Essas relações serão úteis para resolver a (A.9) em P_0 posteriormente.

De acordo com a (A.3), $J_0(0) = 1$. E de acordo com a (A.4), $J_1(0) = 0$.

Trabalha-se novamente com a relação de recorrência para $m = 1$.

$$\frac{d}{du} [u J_1(u)] = u J_0(u)$$

Resolvendo a derivada do termo entre colchetes, vem

$$u \frac{d}{du} J_1(u) + J_1(u) = u J_0(u)$$

Que dá

$$J_0(u) = \frac{d}{du}J_1(u) + \frac{J_1(u)}{u} \quad (A.10)$$

Retornando à equação (A.9), ao tomar $q = 0$, aparecerá uma indeterminação do tipo $\frac{0}{0}$ devido ao termo entre colchetes, pois $J_1(0) = 0$.

Na (A.10), aplicando a regra de L'Hopital ao limite da razão $J_1(u)/u$, com $u = kaq/R = 0$, obtém-se

$$\lim_{u \rightarrow 0} \frac{J_1(u)}{u} = \frac{d}{du}J_1(u)$$

Logo, a (A.10) pode ser reescrita como

$$J_0(u) = \frac{d}{du}J_1(u) + \frac{d}{du}J_1(u)$$

Que dá,

$$\frac{d}{du}J_1(u) = \frac{1}{2}$$

Lembrando que $J_0(0) = 1$.

Portanto, $\frac{J_1(u)}{u} = \frac{1}{2}$, quando $u = 0$.

A irradiância em P_0 , de acordo com a (A.9) então será

$$I_{(0)} = \frac{\varepsilon_A^2 A^2}{2R^2}$$

Como o plano σ está muito afastado de Σ (condições de Fraunhofer), R pode ser considerado constante sobre toda a figura de difração [33]. Assim, a partir da (A.9) tem-se

$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(kaq/R)}{kaq/R} \right]^2 \quad (A.11)$$

Pela figura 4.1, $\sin \theta = q/R$. A (A.11) pode então ser expressa por

$$I_{(\theta)} = I_0 \left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right]^2 \quad (A.12)$$

A geometria axial do problema garante que o máximo central da figura de difração está associado a uma zona circular de irradiância muito elevada (disco de Airy). É possível demonstrar que 84% da energia está incluída no disco de Airy [33]. Foi o Astrônomo Real Inglês Sir George Bidell Airy (1801-1892), que obteve a equação (A.12) pela primeira vez.

A figura A.3 apresenta a representação gráfica da equação (A.12).

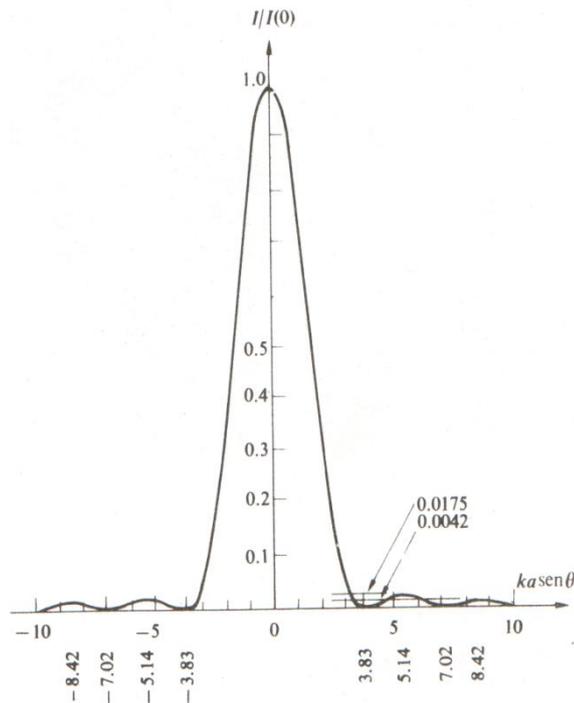


Figura A.3 – Representação gráfica da equação (A.12). [33]

O disco de Airy está rodeado por uma zona circular escura que corresponde ao primeiro zero da função $J_1(u)$. Os máximos secundários têm irradiância bastante baixa, como mostra o gráfico da figura A.3. Consultando a tabela da figura A.3, vê-se que $J_1(u) = 0$ quando $u = 3,83$. Neste caso, $kaq/R = 3,83$

Conclui-se então que o disco de Airy ocupa uma região circular de raio q_1 , dada por

$$q_1 = \frac{3,83R}{ka}$$

Sendo $k = \frac{2\pi}{\lambda}$,

$$q_1 \approx \frac{1,22R\lambda}{2a}$$

Qualquer lente positiva pode ser usada para aproximar σ da abertura sem alterar a figura de difração. No limite, a lente pode estar na própria abertura, preenchendo-a por completo, sendo que a figura de difração permanecerá praticamente inalterada.

Se a observação se fizer no plano focal da lente, ter-se-á $f \approx R$, f é a distância focal da lente. Sendo D o diâmetro da abertura (lente), $2a = D$.

Então,

$$q_1 \approx \frac{1,22f\lambda}{D} \quad (A.13)$$

O raio do disco de Airy varia inversamente com o diâmetro da abertura, como mostra a figura A.4.

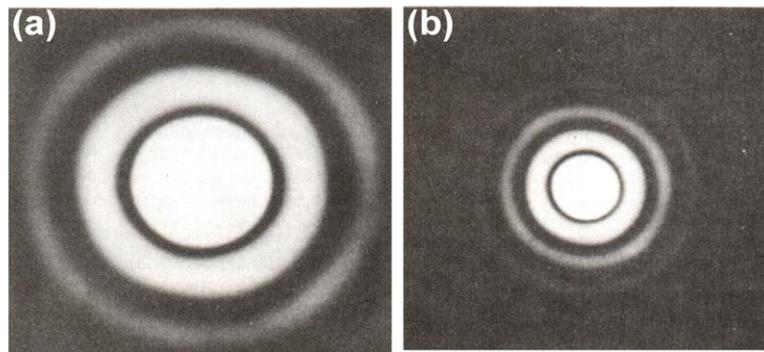


Figura A.4 – Padrão de Airy para um diâmetro da abertura igual a 0,5 mm (a). Padrão de Airy para um diâmetro da abertura igual a 1,0 mm (b).

Com a figura 4.4, pode-se concluir que ao contrário do que supõem a Óptica Geométrica, a imagem de um objeto não é um ponto, mas sim uma figura de difração [32]. A equação (A.13) pode também ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta\theta = \frac{1,22\lambda}{D} \quad (A.14)$$

Pois para ângulos pequenos, $\frac{q_1}{f} = \text{sen } \Delta\theta \approx \Delta\theta$.

Se duas fontes pontuais afastadas e com mesma irradiância produzem individualmente, um padrão de difração o disco de Airy fica no centro da figura geométrica respectiva de cada fonte pontual, como mostra a figura A.5.

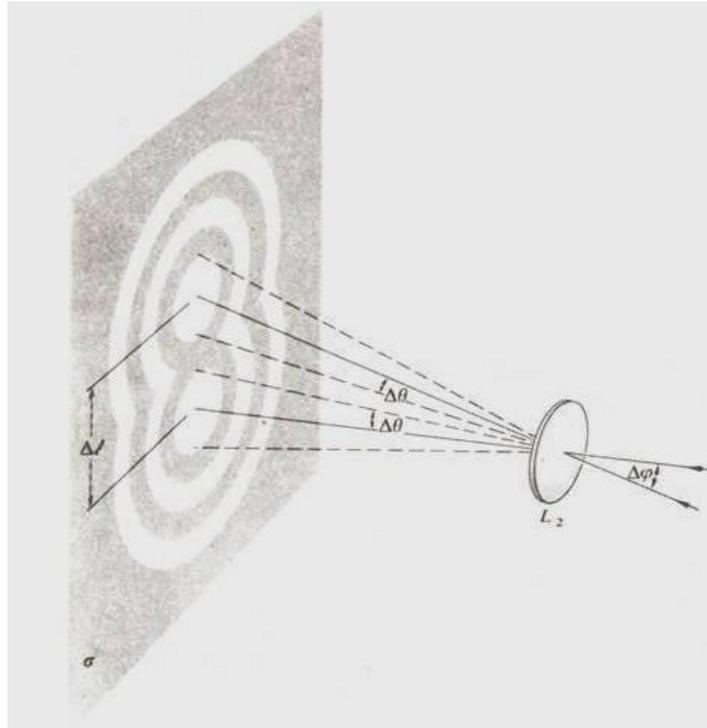


Figura A.5 – Esquema de representação da figura de difração de duas fontes pontuais com uma separação angular $\Delta\varphi$.

Quando $\Delta\varphi \gg \Delta\theta$, as imagens são distintas e facilmente resolvidas. Mas a medida que as imagens aproximam-se, em um dado momento, estas irão se sobrepor e a imagem nítida dará lugar a uma imagem borrada onde não será possível distinguir os detalhes das fontes. De acordo com Lord Rayleigh (1842-1919), duas fontes pontuais são discerníveis quando o centro de disco de Airy de uma localiza-se sobre o primeiro mínimo da figura de Airy da outra. Esse é o critério de difração de Rayleigh. Logo, o limite de resolução angular é dado por:

$$(\Delta\varphi)_{\min} = \Delta\theta = \frac{1,22\lambda}{D}$$

Outra forma de interpretar o critério de Rayleigh é dizendo que as imagens serão discerníveis somente quando os centros de seus respectivos discos de Airy estiverem separados por uma distância mínima $\Delta\ell$ que é igual ao raio do disco.

A figura A.6 apresenta a situação em que os centros dos discos de Airy encontram-se no limite de resolução.

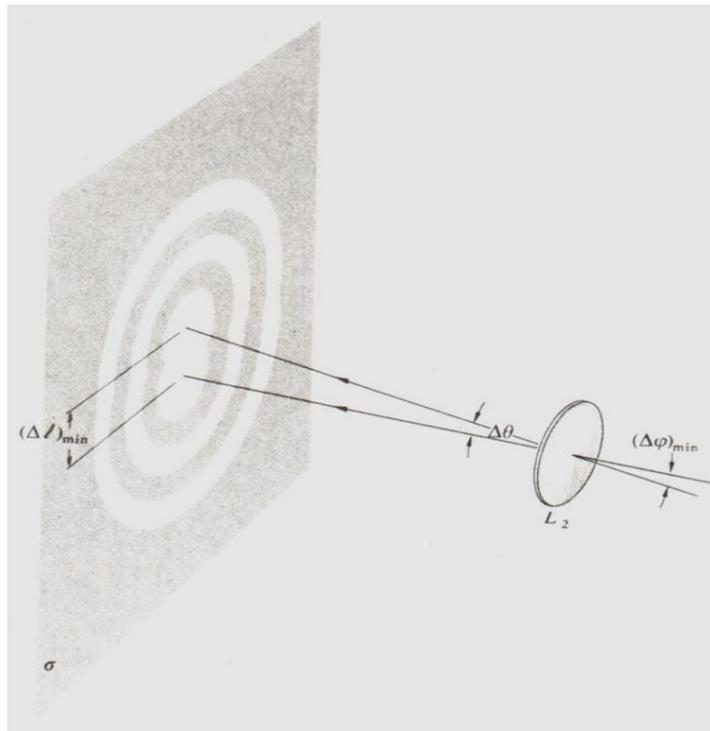


Figura 4.6 – Representação da separação mínima entre duas fontes pontuais de acordo com o critério de Rayleigh.

Então a separação mínima entre os discos, isto é, o limite de resolução, será

$$(\Delta l)_{\min} = \frac{1,22 f \lambda}{D}$$

O poder de resolução de um sistema óptico é definido, como $1/(\Delta\varphi)_{\min}$ ou $1/(\Delta l)_{\min}$. Isso quer dizer que quanto menor for o limite de resolução do instrumento, maior será o poder de resolução deste.

Em microscopia óptica, utilizam-se comprimentos de onda na faixa da luz visível, que compreendem valores de 400 a 700 nm. Para se obter o maior poder de resolução, utiliza-se o comprimento de onda violeta correspondente a 400 nm.

Supondo uma abertura de 20 mm de diâmetro e que $f = 8,2 \text{ mm}$, para um comprimento de onda $\lambda = 400 \text{ nm}$. Obtém-se $\Delta l \approx 200 \text{ nm}$. Que é o limite de resolução do microscópio óptico.

Entretanto, na prática os microscópios não dependem somente do diâmetro da abertura e da distância focal da lente (a objetiva neste caso), pois em microscópios modernos há uma série de componentes como filtros, espelhos, outras lentes e prismas que ajudam a chegar ao limite de 200 nm sem depender tanto de λ ou D .