



Este exemplar corresponde a redação final da tese
defendida por Marcelo Fukui
e aprovada pela Comissão
Julgada em 06/03/1996
Orientador

Contribuição ao estudo tribológico dos pares acionadores de motores ultra-sônicos

Marcelo Fukui

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Elétrica e Computação da Universidade
Estadual de Campinas para a obtenção do
Título de Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Vitor Baranauskas

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Vitor Baranauskas
Prof. Dr. Peter Jurgen Tatsch
Dr. Alfredo Carlos Peterlevitz
Prof. Dr. Teodiano Freire Bastos Filho
Prof. Dr. Gilberto de Matos Gualberto

[Handwritten signatures of the examiners over dotted lines]

Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Universidade Estadual de Campinas
1996

UNIDADE B0
Nº CHAMADA T/UNICAMP
F955c
V _____ EX _____
TOMBO BC/ 50490
PROC 16-837102
C _____ D1 _____
PREÇO R\$ 11,00
DATA 21/08/02
Nº CPD _____

CM00172330-6

BIB ID 252391

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F955c Fukui, Marcelo
Contribuição ao estudo tribológico dos pares
acionadores de motores ultra-sônicos / Marcelo Fukui. --
Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Vitor Baranauskas.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Desgaste mecânico. 2. Tribologia. 3. Microscopia
eletrônica de varredura. 4. Microscópio eletrônico. 5.
Diamante. I. Baranauskas, Vitor. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e
de Computação. III. Título.

Dedico este trabalho à minha futura esposa Regina e filhos.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer nominalmente a todas as pessoas que contribuíram para a elaboração deste trabalho mas seria praticamente impossível. Faço então um agradecimento a todos, e em especial aos doutores Valentinas Snitka, Cesar Ramos Rodrigues, José Araruna Júnior, e a colega Carla de Freitas Galan. Obrigado também a todos os amigos do DSIF pela convivência e participação durante o trabalho.

Resumo:

Apresenta-se uma análise tribológica de pares de atrito em motores ultra-sônicos de deslocamento linear. Foram analisados pares formados por diferentes materiais como aço/cerâmica de alumina, aço/diamante, cerâmica de alumina/diamante e diamante/diamante. As amostras de diamante foram obtidas por deposição química a partir da fase vapor (CVD) e utilizadas sem nenhuma etapa de polimento. Tanto com a alumina quanto com o diamante, o aço apresentou um processo de deformação plástica formando trilhas de desgaste com dentes periódicos, os quais podem ser utilizados para a auto-sincronização ou para o uso destes motores como motor de passos nanométricos. O par aço-alumina apresentou problemas de tribo-oxidação levando a desgastes no aço e a geração de partículas no ar. O diamante apresentou melhores resultados mas devido ao seu baixo coeficiente de atrito a força de tração é 350 vezes maior que o par aço/alumina. Os pares alumina-diamante e diamante/diamante sofreram desgastes intensos durante as vibrações ultra-sônicas, levando em ambos os casos ao rápido polimento do diamante, principalmente com o par alumina/diamante. As morfologias das interfaces foram caracterizadas pela microscopia eletrônica de varredura e microscopia de força atômica.

Palavras chave: *atrito, desgaste, motores ultra-sônicos, ultra-som, diamante CVD, alumina.*

Abstract:

A tribological study of the potential materials to be employed in linear ultrasonic motors is presented. Different pairs of materials such as steel/alumina, steel/diamond, alumina/diamond and diamond/diamond have been studied. The diamond samples were obtained by chemical vapor deposition (CVD) and used in the ultrasonic pairs without any previous polishing. Using either alumina or diamond, the steel showed plastic deformation forming trenches with periodic features along them, which are of interest for motor auto-synchronization or nanometric stepping. The steel/alumina pair showed problems of steel tribo-oxidation and of the generation of dust particles released to the atmosphere, probably from the alumina debris. The steel/diamond pair presented the best results but due to the low friction coefficient of diamond the tracking force was around 350 times less than for the steel/alumina pair. The diamond surface in the alumina/diamond pairs and diamond/diamond suffered intense polishing under ultrasonic vibration. The diamond polishing rate was higher in the alumina/diamond pair than in the diamond/diamond pair. The morphologies of the surfaces were characterised by scanning electron microscopy and atomic force microscopy.

Keywords: *friction, wear, ultrasonic motors, ultrasound, CVD diamond, alumina.*

Conteúdo

Capítulo I - Introdução aos motores ultra-sônicos	1
1.1 – Introdução	1
1.1.1 – Organização desta Tese	2
1.2 - Motores ultra-sônicos	2
1.2.1 – Introdução	2
1.2.2 – Princípio de Operação	5
1.2.3 – Elemento Piezoelétrico e o Vibrador	9
1.2.4 – Parâmetros para o Efeito Piezoelétrico	12
1.3 – O ultra-som e o atrito	16
1.4 – Relação entre a resposta do motor ultra-sônico e o par em	17
Referências Bibliográficas do Capítulo I	20
Capítulo II - Técnicas de caracterização	22
2.1 – Introdução	22
2.2 – Microscopia de força atômica	22
2.2.1 – Breve histórico do desenvolvimento das tecnologias de MTE e MFA	23
2.2.2 – Princípio de funcionamento do MTE	25
2.2.3 – Princípio de funcionamento do MFA	28
2.3 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	30
2.3.1 – Componentes principais do MEV	31
2.3.2 – Princípio de operação do MEV	32
2.4 – Espectroscopia Raman	34
2.4.1 – Espectroscopia Raman do diamante sintetizado por CVD	35
2.4.2 – Características do espectro Raman das fases carbono	37
Referências Bibliográficas do Capítulo II	40

Capítulo III - Conceitos básicos de tribologia	43
3.1 – Introdução	43
3.2 – Natureza das superfícies	45
3.3 – Mecanismo básico do atrito	46
3.4 – Leis clássicas do atrito	47
3.5 – Teoria do atrito geral	48
3.6 – Desgaste e abrasão	49
Referências Bibliográficas do Capítulo III	51
Capítulo IV - Estudo experimental dos pares de atrito	52
4.1 – Introdução	52
4.2 – Materiais	54
4.3 – Topografia e atrito de superfície	56
4.4 – Par aço-diamante CVD sem vibração ultra-sônica	57
4.5 – Par aço-diamante CVD e aço-cerâmica de alumina com vibração ultra-sônica	58
4.6 – Par diamante CVD-cerâmica de alumina com vibração ultra-sônica	66
4.7 – Processo de polimento dos filmes de diamante CVD assistido por ultra-som	67
Referências Bibliográficas do Capítulo IV	79
Capítulo V - Conclusões e considerações finais	80

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO AOS MOTORES ULTRA-SÔNICOS

1.1 - INTRODUÇÃO

O posicionamento espacial preciso é uma premissa básica e importante para o desenvolvimento de sistemas avançados de nanotecnologia. Os métodos usuais de posicionamento, utilizando estruturas mecânicas híbridas, não têm acompanhado a tendência dos sistemas se tornarem cada vez menores e mais precisos. Além disso a necessidade de especificações de tolerância cada vez mais rigorosas estimula novas direções para a pesquisa em instrumentação de precisão.

Os motores ultra-sônicos oferecem novas perspectivas para o micro-posicionamento de precisão. Sabe-se que os motores ultra-sônicos possuem uma vasta gama de aplicações potenciais e a compreensão dos fenômenos envolvidos nesta interface em atrito podem proporcionar, como por exemplo, a utilização destes dispositivos como motores de passo para incrementos submicrométricos [1-7].

O objetivo deste trabalho foi estudar o processo de interação na interface dos estatores, que são os elementos móveis dos motores ultra-sônicos. Neste estudo realizaram-se análises tribológicas de diferentes materiais (aço, diamante CVD e alumina cerâmica) quando utilizados na região de interface dos elementos acionadores sujeitos ao atrito provocados por vibração ultra-sônica. Foram utilizadas como técnicas de caracterização a Microscopia de Força Atômica (MFA), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e espectroscopia Raman.

1.1.1 – Organização desta Tese

Esta tese está organizada em cinco capítulos. No presente capítulo (Capítulo I) apresentamos uma introdução aos motores ultra-sônicos, ressaltando suas características básicas como seu princípio de funcionamento, o modelamento do acionamento piezoelétrico e a importância dos pares de atrito, responsáveis pela transmissão do impulso mecânico do piezoelétrico para o elemento de rotação ou de deslocamento. No Capítulo II apresentamos as principais técnicas de caracterização que utilizamos, que foram a Microscopia de Força Atômica (MFA), a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a espectroscopia Raman. No Capítulo III apresentamos o conceito básico da ciência que estuda o atrito e o desgaste, denominada Tribologia. Apresenta-se uma discussão sobre a natureza das superfícies, as leis clássicas do atrito, a teoria do atrito geral e as teorias de desgaste e abrasão. No Capítulo IV apresentamos o estudo experimental envolvendo três diferentes tipos de materiais para os pares de atrito. Comparamos os pares aço/diamante-CVD com e sem vibração ultra-sônica e os pares de cerâmica/diamante-CVD e de diamante-CVD/diamante-CVD. Apresentamos também os resultados de polimento de diamante induzido pelas vibrações ultrasônicas. No Capítulo V apresentamos nossas considerações finais.

1.2 - MOTORES ULTRA-SÔNICOS

1.2.1 - Introdução

A origem dos motores ultra-sônicos é discutível. De um lado têm-se pesquisadores de institutos da antiga União Soviética, como Research Institute “Vibrotechnika”, na Lituânia, e o Kiev Polytechnical Institute, na Ucrânia, que afirmam que suas pesquisas sobre motores ultra-sônicos iniciaram antes dos anos 70 [1]; por outro lado pesquisadores japoneses afirmam que em 1981 já possuíam motores ultra-sônicos no estágio de aplicação prática [2]. Sabe-se, porém que muitos dos trabalhos desenvolvidos na extinta União

Soviética foram publicados somente em russo, que aliado à rígida censura por parte do governo sobre os projetos de interesse militar, limitaram o acesso a estes trabalhos.

O princípio dos motores ultra-sônicos é baseado em duas formas de transferência de energia. A primeira é transferência da potência elétrica para a potência mecânica vibracional por meio de cerâmicas piezoelétricas empregadas como estatores. Nos estatores, ou piezoestatores, são induzidas ondas estacionárias ou viajantes na faixa de frequências do ultra-som. A segunda forma ocorre por meio da transferência da energia das ondas mecânicas do estator para o rotor, por acoplamento mecânico entre as peças.

A razão de se utilizar uma excitação elétrica na faixa do ultra-som é decorrente das intensidades das oscilações no piezoestator, da ordem de $1\ \mu\text{m}$ [3]. Com o objetivo de obter alto ganho, recorre-se ao efeito de ressonância das cerâmicas que é obtido na frequência do ultra-som, tipicamente em torno de 20 kHz [3-8] para as dimensões e características das cerâmicas comercialmente utilizadas.

Podem ser citadas como vantagens dos motores ultra-sônicos as seguintes características:

- Possibilidade do motor ultra-sônico ser operado como motor contínuo ou como motor de passo, (ver item 1.4).
- Possibilidade de projetos de motores ultra-sônicos lineares (ver Fig. 1.4) [1-9].
- Maior capacidade de miniaturização que os motores de tecnologia eletromagnética convencionais [6, 9].
- Possibilidade de projetos mais adequados para aplicações especiais, onde os motores de tecnologia eletromagnética necessitariam de sistemas auxiliares. Pode-se citar como exemplo, os sistemas de autofoco de câmeras fotográficas utilizando motores ultra-sônicos compactos de centro vazado (Fig. 1.1) [5-6];
- Alto torque, mesmo para regimes de velocidades bastante baixos [5-6, 9].
- Baixa emissão de ruído acústico [5-6, 9].
- Imunidade a campos magnéticos [6], [9].
- Resposta rápida [6], [9].

- Controle de velocidade e de deslocamentos com alta precisão [5], [6].
- Alto torque de retenção na ausência de potência elétrica aplicada [6], [9].

Entretanto para que esta tecnologia atinja seu estado competitivo são necessários avanços para a superação dos seguintes problemas:

- Desgaste e durabilidade mecânica das peças sujeitas ao atrito [3], [6].
- Emissão de produtos residuais do atrito das peças em contato mecânico.

O conjunto de propriedades citadas permite prever que os motores ultra-sônicos possuem um grande potencial para aplicações em diversos tipos de sistemas especiais, como manipuladores multidimensionais, mesas posicionadoras, micro-bombas, unidades de disco magnético, ou óptico, de armazenamento de dados, etc.

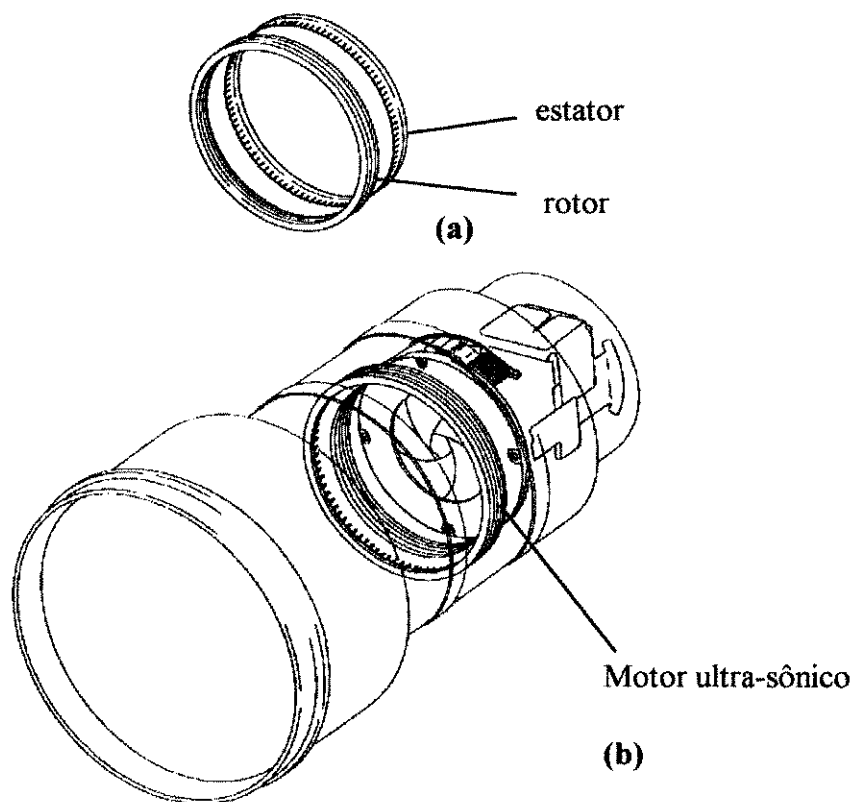


Figura 1.1 - *Aplicação do motor ultra-sônico em um mecanismo de autofoco de câmera fotográfica. (a) Detalhe do Motor ultra-sônico com centro vazado, (b) vista de conjunto do motor e lentes [6]*

1.2.2 - Princípio de Operação

Vários tipos de motores ultra-sônicos têm sido estudados e descritos na literatura na última década [10-12]. Neste trabalho, porém, limitaremos a descrição ao dispositivo utilizado em nossos ensaios, que enfoca um motor ultra-sônico linear do tipo pino sobre chapa.

O princípio de funcionamento deste motor baseia-se em movimentos elípticos resultante dos movimentos das partículas de um estator piezoelétrico. Estes movimentos elípticos são obtidos por meio da composição de modos de vibração degenerados longitudinais e de flexão. A Figura 1.2 ilustra o vibrador multimodo utilizado, composto de uma peça de cerâmica piezoelétrica retangular. A face frontal da piezocerâmica apresenta quatro eletrodos indicados pelos números (1), (2), (3) e (4), curto-circuitados dois a dois diagonalmente, ou seja, (1) com (4) e (2) com (3) (não indicado na Figura 1.2). A face oposta, não vista na figura, possui um único eletrodo comum.

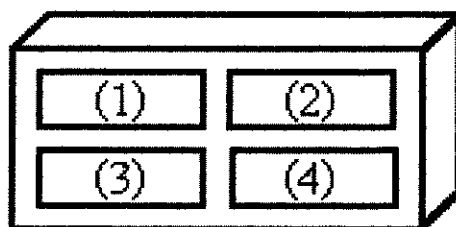


Figura 1.2 - Diagrama esquemático de um vibrador piezoelétrico multimodo com a indicação dos quatro eletrodos (1), (2), (3) e (4).

Como fonte de excitação aplicam-se sinais senoidais de frequência na faixa do ultra-som, com uma defasagem de 90° entre os pares de eletrodos curto-circuitados [(1)-(4) e (2)-(3), na Fig. 1.2]. A Fig. 1.3 ilustra o comportamento do oscilador multimodo, onde Fig. 1.3

(a) apresenta-se adimensionalmente os sinais utilizados para alimentar o estator piezoelétrico. O sinal I poderia ser conectado, por exemplo, ao par de eletrodos (1)-(4), e o sinal II ao par (2)-(3). Na Fig. 1.3 (b), é apresentada a sequência de movimentos do vibrador.

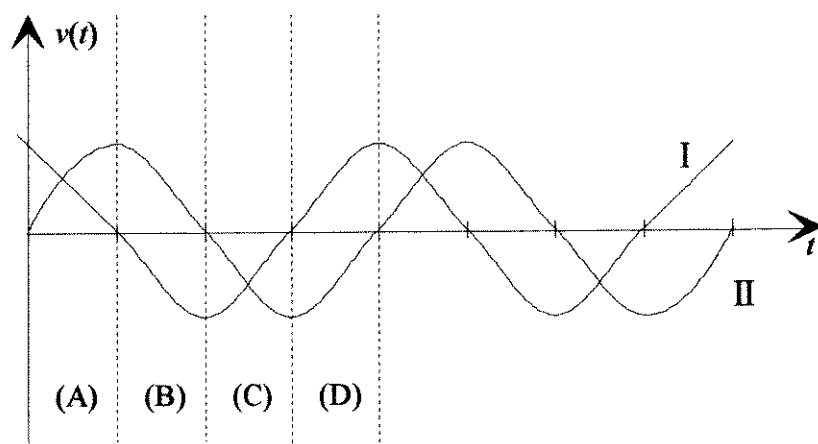


Figura 1.3 (a) - *Representação adimensional dos sinais de excitação do estator piezoelétrico multimodo.*

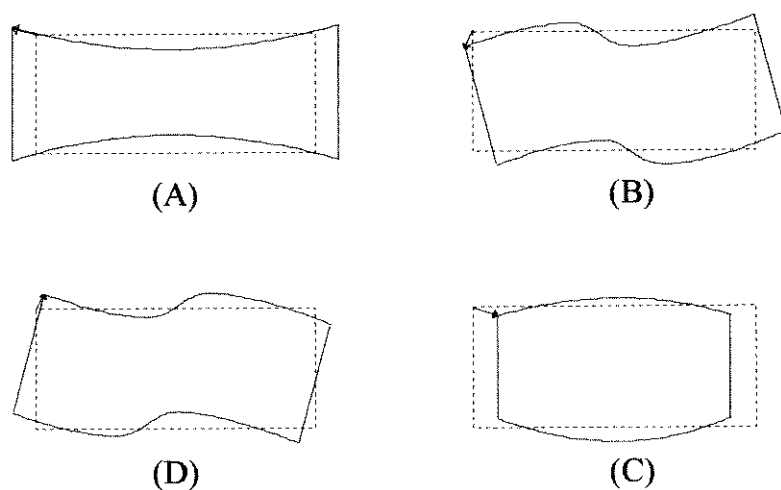


Figura 1.3 (b) - *Sequência de movimentos de deformação do estator piezoelétrico multimodo em resposta a excitação dada pela Figura 1.3 (a).*

Devido ao efeito transversal da cerâmica piezoelétrica utilizada (ver item 1.2.3), quando os pares de eletrodos (1)-(4) e (2)-(3) forem submetidos à sinais de mesma polaridade, o movimento do vibrador será longitudinal de contração ou de expansão; e quando as polaridades forem opostas, o movimento será de flexão. A Figura 1.3 (b) mostra a seqüência dos movimentos da cerâmica piezoelétrica em resposta à excitação indicada na Figura 1.3 (a). Na Figura 1.3 (c) é representada a composição dos vetores deslocamento tomados no vértice superior esquerdo do vibrador piezoelétrico, resultando em um movimento elíptico anti-horário.

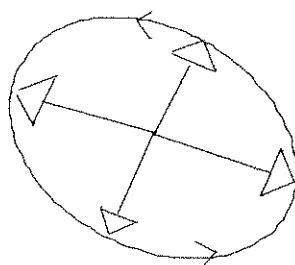


Figura 1.3 (c) - Movimento resultante dos vetores deslocamentos tomados no vértice superior esquerdo do estator piezoelétrico multimodo.

Se os pontos que resultam em movimentos elípticos forem colocados em contato mecânico com um rotor ou um deslizador (slider ou linor), o estator piezoelétrico irá transmitir movimento mecânico ao elemento móvel devido ao acoplamento por atrito mecânico.

O sentido de deslocamento mecânico do elemento móvel pode ser revertido bastando a inversão do sinal I com o sinal II nos pares de eletrodos do vibrador piezoelétrico (vide a Figura 1.2).

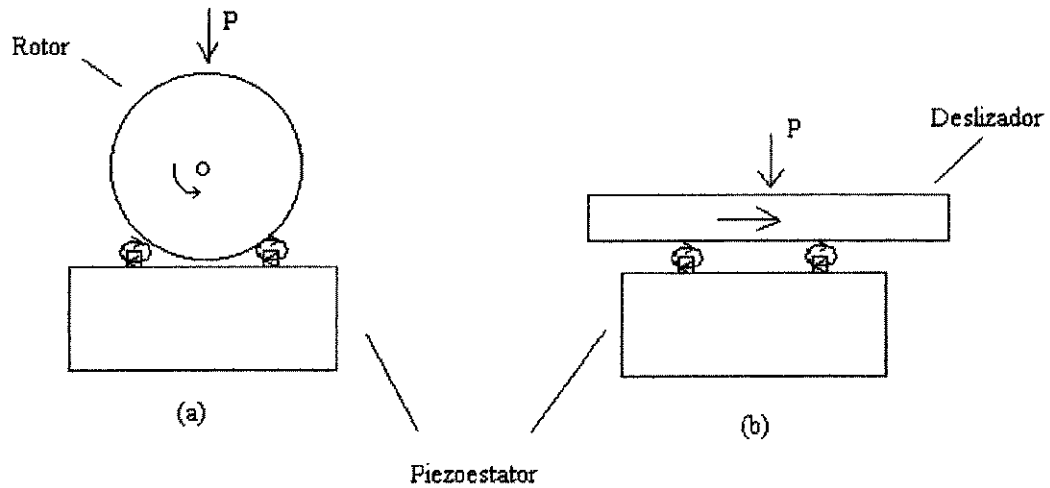


Figura 1.4 - Diagrama esquemático de motores ultra-sônicos multi-modo. **(a)** Motor rotativo, **(b)** Motor linear.

Um método simplificado de modelagem da trajetória elíptica de um ponto na superfície do estator piezoelétrico (ou piezoestator), gerada a partir de ondas estacionárias, parte da relação entre deformação e a tensão aplicada em um cristal polarizado:

$$s = \frac{\Delta l_{ij}}{l_{ij}} = d_{ij} E \quad (\text{Eq. 1.1})$$

onde $\Delta l / l$ é a deformação proporcional, d a constante de proporcionalidade, ou constante de deformação piezoelétrica, e E a tensão aplicada. Os subíndices ij indicam a direção axial para causa e efeito.

Sendo a forma geral da tensão responsável pelos movimentos longitudinais (l) e de flexão (b) do tipo:

$$E_l = A \sin(wt - kx) \quad \text{e} \quad E_b = B \cos(wt - kx); \quad (\text{Eq. 1.2})$$

aplicadas à relação anterior, temos:

$$s_l = A' \sin(wt - kx) \quad \text{e} \quad s_b = B' \cos(wt - kx); \quad (\text{Eq. 1.3})$$

de tal modo que a composição destas duas relações resultam em:

$$\left(\frac{s_l}{A'}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{B'}\right)^2 = 1 \quad (\text{Eq. 1.4})$$

Como mencionado, este modelo é de primeira ordem na descrição do movimento relativo entre o par estator-piezoelétrico/elemento-móvel, pois não estão incorporados os complexos fenômenos de interação não linear.

1.2.3 - Elemento Piezoelétrico e o Vibrador

A piezoelectricidade é uma propriedade que certos materiais apresentam de se polarizarem eletricamente quando sujeitos à uma tensão mecânica, ou de se deformarem quando sujeitos a um campo elétrico. O primeiro caso é denominado efeito piezoelétrico *direto* ou gerador, sendo que os estados de polarização são resultantes dos deslocamentos dos dipolos elétricos no cristal em resposta a tensão mecânica aplicada; e o segundo é conhecido como efeito piezoelétrico *inverso* ou *motor* no qual as alterações morfológicas tanto do tipo alongamento como do tipo contração na estrutura cristalina do material piezoelétrico resultam do efeito do gradiente de potencial aplicado sobre os dipolos no material. Juntos, estes dois efeitos são conhecidos como efeito piezoelétrico

O efeito piezoelétrico foi descoberto pioneiramente pelos irmãos Jacques Curie e Pierre Curie, em cristais de quartzo [10, 11].

A piezoelectricidade não deve ser confundida com a ferroelectricidade que é a propriedade do material de possuir um momento de dipolo espontâneo ou induzido. Todos os materiais ferroelétricos são piezoelétricos, mas o contrário nem sempre é verdade. A

piezoeletricidade está relacionada com a estrutura cristalina (iônica), enquanto a ferroeletricidade está relacionada com os spins eletrônicos.

As propriedades piezoeletricas estão presentes em 20 das 32 classes cristalográficas, embora somente algumas delas são usadas. Destas 20 classes, somente 10 manifestam propriedades ferroelétricas. O quartzo e o titanato de bário são alguns dos materiais que manifestam o efeito piezoeletrico [10], sendo que os materiais piezoeletricos naturais mais freqüentemente utilizados são o quartzo e a turmalina. Os materiais sintéticos, que têm sido mais extensivamente utilizados, não são cristais e sim cerâmicas. Eles são formados por muitos micro-cristais extremamente compactados. Estas cerâmicas também são ferroelétricas e para alinhar os monocristais na mesma direção, eles são submetidos a um forte campo elétrico durante seu processo de sinterização.

As cerâmicas piezoeletricas possuem alta estabilidade térmica e mecânica e podem ser produzidas em diferentes formatos. As cerâmicas que exibem propriedades piezoeletricas fortes e constantes, geralmente utilizam em sua composição elementos como chumbo, zircônio e titânio. As cerâmicas produzidas comercialmente costumam indicar em seus nomes comerciais os principais materiais constituintes, por exemplo, o PZT indica as iniciais dos seus elementos principais (chumbo, zircônio e titânio) do composto $\text{Pb}(\text{Zr-Ti})\text{O}_3$ e o PLZT indica os elementos (chumbo, lantânio, zircônio e titânio) do composto $(\text{Pb,L a})(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$.

Dentre as características piezoeletricas, os efeitos longitudinais e transversais são particularmente importantes para as aplicações em motores ultra-sônicos. No efeito longitudinal, as deformações ocorrem paralelas ao eixo elétrico, como indicado na Figura 1.5 (a); nos efeitos transversais, as deformações dão-se em ângulos transversos ao eixo elétrico como indicado na Figura 1.5 (b).

Os materiais piezoeletricos são necessariamente anisotrópicos, sendo que os efeitos longitudinais e transversais podem ser melhor compreendidos por meio da Figura 1.6. No caso apresentado na Figura 1.6 (a), uma simetria central e uma força aplicada não resultam em uma polarização elétrica. Já na Figura 1.6 (b), uma força aplicada produz uma

polarização paralela, enquanto na Figura 1.6 (c), uma força aplicada produz uma polarização perpendicular.

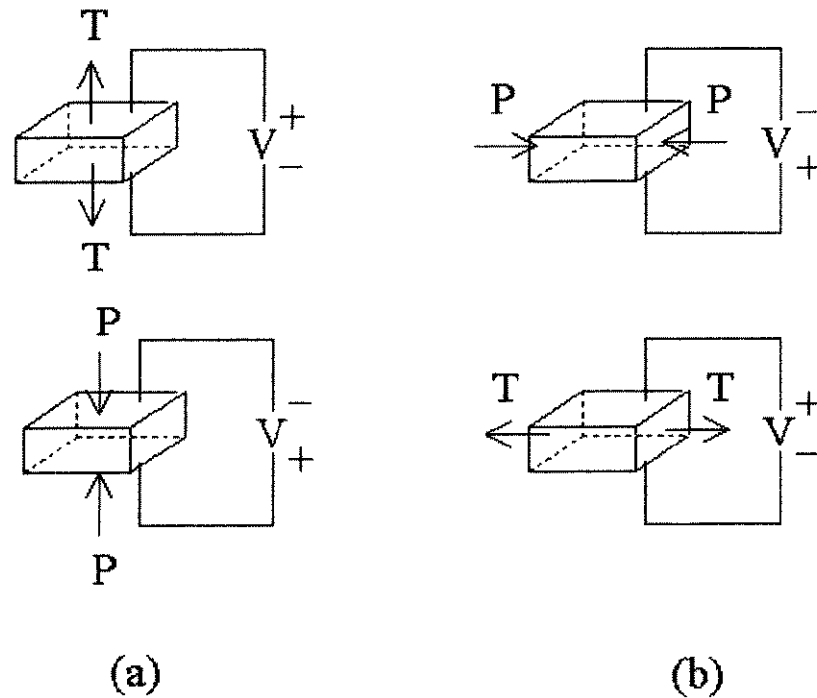


Figura 1.5 - Efeito piezoelétrico: (a) efeito longitudinal; (b) efeito transversal.

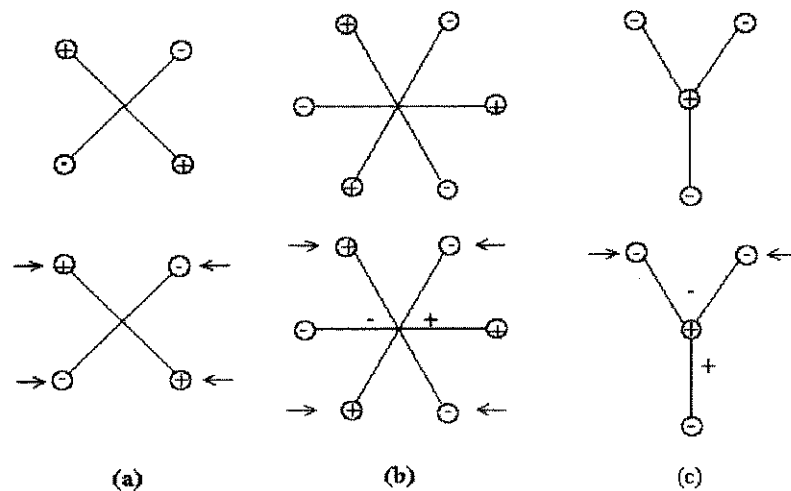


Figura 1.6 - Representação dos dipolos da estrutura cristalina de algumas cerâmicas piezoelétricas [10].

1.2.4 - Parâmetros para o Efeito Piezoeétrico

A relação entre as quantidades mecânicas e elétricas em materiais piezoeétricos é descrita por meio de equações piezoeétricas que relacionam: tensão mecânica (T), deformação (S), campo elétrico (E), e o deslocamento elétrico (D).

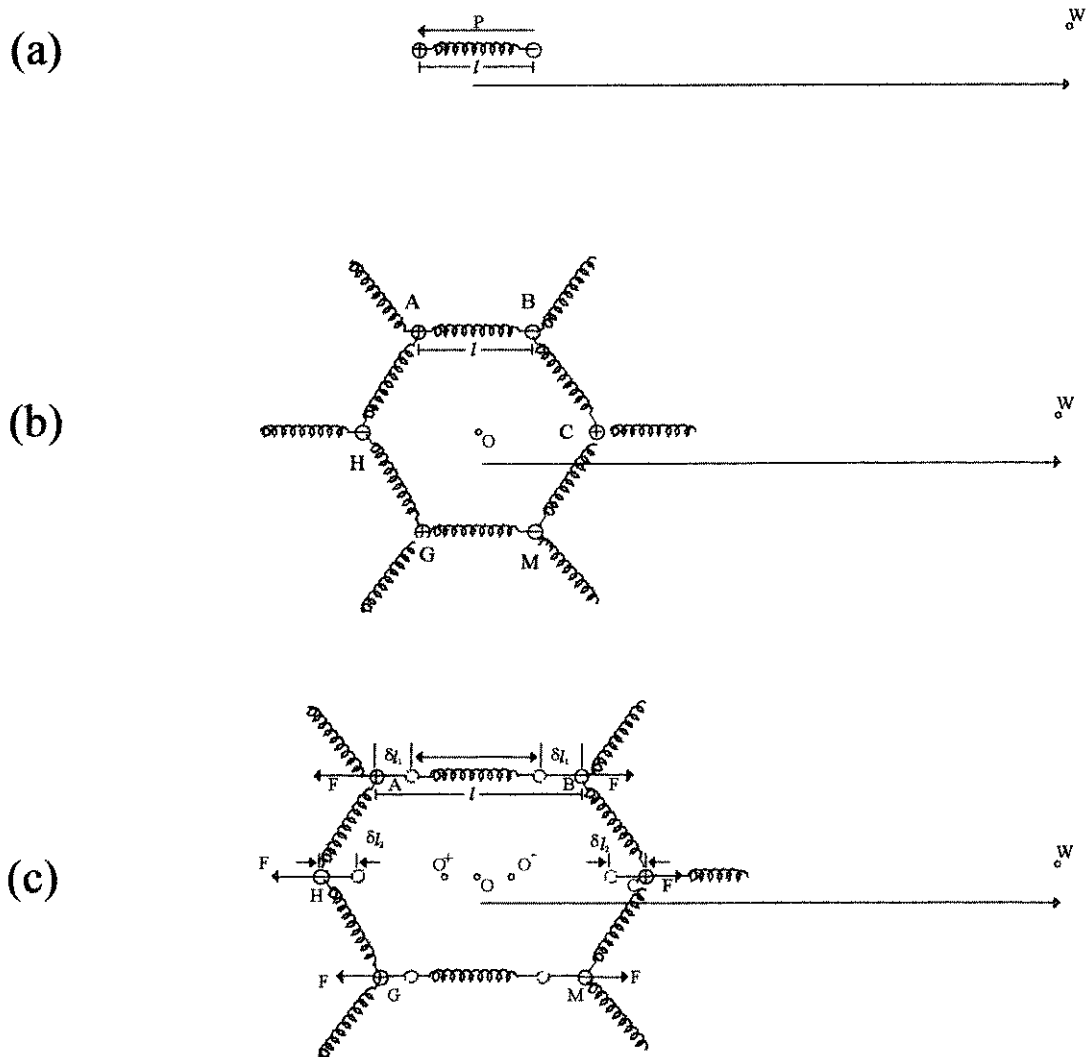


Figura 1.7 - (a) Dipolo elétrico, (b) célula unitária e (c) célula unitária deformada [11].

Seja o dipolo elétrico representado da Figura 1.7. Sabe-se que o campo elétrico devido ao dipolo num ponto, situado a uma distância $r \gg l$ sobre o eixo do dipolo, pode ser expresso por $E = p/2\pi\epsilon_0 r^3$, onde p é o momento do dipolo ($p=ql$). Considerando agora uma célula unitária de um sólido hipotético na qual as moléculas (representadas pelas cargas) estão presas por forças elásticas (representadas pelas molas de união), pode-se modelar esta célula como sendo formada por três dipolos AB, HC e GM, conforme a Figura 1.7 (b). No equilíbrio, o campo elétrico (E) da célula num ponto W situado a uma distância $r \gg l$, é expresso por:

$$E = E_{AB} - E_{HC} + E_{GM} = \frac{(ql - 2ql + ql)}{2\pi\epsilon_0 r^3} = 0 \quad (\text{Eq. 1.5})$$

Portanto o campo elétrico resultante é nulo. Se uma força F é simetricamente aplicada no sólido, o mesmo se deforma como demonstrado na Figura 1.7 (c). Por simplicidade supõe-se que os deslocamentos dos pontos B, C e M sejam iguais, ou seja $\delta l_1 = \delta l_2 = \delta l$. O campo elétrico resultante no ponto W da célula unitária deformada pode ser reescrito como:

$$E = \frac{2q(2\delta l_1 - \delta l_2)}{2\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{2q\delta l}{2\pi\epsilon_0 r^3} \quad (\text{Eq. 1.6})$$

onde o momento do dipolo pode ser escrito como $p = 2q\delta l = 2qlS$, sendo $S = \delta l/l$ a deformação longitudinal. Se o sólido contém N moléculas por volume, tem-se que a polarização elétrica P , ou seja, o momento dipolar por volume é:

$$P = Np = 2qlNS = eS, \quad (\text{Eq. 1.7})$$

sendo que e é por definição a constante de tensão piezoelétrica ($e = 2qlN$).

A presença de uma polarização P , altera a relação $D = \epsilon E$, onde D representa a densidade de cargas e está relacionada com o fluxo de corrente no material piezoelétrico ($I = \partial D / \partial t$). A nova relação passa a ser:

$$D = \epsilon E + eS \quad (\text{Eq. 1.8})$$

Devido à aplicação da força F , os centros de cargas positivas e negativas que coincidem no ponto O se deslocam para os pontos O_+ e O_- respectivamente, produzindo uma polarização, modificando a densidade de cargas ou deslocamento elétrico D . Assim, o deslocamento elétrico (D) no material depende da deformação e do campo elétrico aplicado no material. No caso em que um campo elétrico externo E é aplicado, mostra-se que a tensão mecânica total aplicada no meio é a soma da tensão externa aplicada T e da tensão interna T_e devido ao campo elétrico que é igual a eE . Aplicando a Lei de Hooke tem-se:

$$T + T_e = cS \therefore T = cS - T_e \therefore T = cS - eE \quad (\text{Eq. 1.9})$$

Se as cargas positivas e negativas forem diferentes em valor, o sólido apresentará polarização, mesmo sem forças aplicadas. As equações (1.8) e (1.9) são denominadas constitutivas da piezoeletricidade ou equações do meio piezoelétrico [11].

As equações apresentadas a partir do exemplo anterior foram desenvolvidas na forma unidimensional, entretanto na sua forma genérica, as constantes piezoelétricas relacionam tensores simétricos de 2ª ordem (tensão mecânica e deformação) e vetores (densidade de carga e campo elétrico), sendo portanto tensores de 3ª ordem. As constantes elásticas relacionam dois tensores simétricos de 2ª ordem, sendo portanto tensores de 4ª ordem e as constantes dielétricas relacionam dois vetores, e portanto constituem tensores de 3ª ordem. Entretanto, muitas destas constantes podem se anular, ou se equilibrar devido por exemplo a simetria do material, permitindo que as equações possam ser representadas na forma matricial.

Considerando ainda o modelo unidimensional, tomando S e E das equações piezoelétricas como variáveis independentes, $T = T(S,E)$ e $D = D(S,E)$, e utilizando a expansão de Taylor tem-se:

$$T = \left(\frac{\partial T}{\partial S} \right)_E S + \left(\frac{\partial T}{\partial E} \right)_S E \quad (\text{Eq. 1.10})$$

$$D = \left(\frac{\partial D}{\partial S} \right)_E S + \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_S E \quad (\text{Eq. 1.11})$$

onde os efeitos magnéticos, térmicos e não lineares foram desprezados [11]. Desta forma pode se obter as constantes:

$$\begin{aligned} c^E &= \left(\frac{\partial T}{\partial S} \right)_E; & e^E &= \left(\frac{\partial D}{\partial S} \right)_E \\ e^S &= \left(\frac{\partial T}{\partial E} \right)_S; & \varepsilon^S &= \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_S \end{aligned} \quad (\text{Eq. 1.12})$$

onde os sobrescritos indicam que c^E e e^E devem ser obtidos sob um campo elétrico constante, e e^S e ε^S sob deformação nula.

A medida das constantes dielétrica e de rigidez, conforme definidas anteriormente, depende das condições de contorno. A medida das propriedades elétricas do meio piezoelétrico depende das restrições mecânicas e a medida das propriedades mecânicas depende das restrições elétricas, devido ao acoplamento piezoelétrico. Entretanto, seguindo considerações termodinâmicas, mostra-se que o efeito piezoelétrico inverso (e^S) é uma consequência do efeito piezoelétrico direto (e^E) [11], assim:

$$-e^S = e^E = e \quad (\text{Eq. 1.13})$$

Portanto pode-se escrever as equações (Eq. 1.10) e (Eq. 1.11) como:

$$\begin{cases} T = c^E S - e E \\ D = e S + \epsilon^S E \end{cases} \quad (\text{Eq. 1.14})$$

Alternando em pares as variáveis independentes escolhidas obtêm-se expressões das equações piezoelétricas mais apropriadas às características necessárias de nosso projeto.

1.3 - O ULTRA-SOM E O ATRITO

As vibrações auto-excitadas têm sido estudadas por vários pesquisadores [7-9] sendo a redução do atrito por meio de vibrações um fenômeno bem conhecido no o projeto de máquinas. A natureza do atrito na presença de vibrações difere das situações envolvendo escorregamentos de superfícies relativamente lisas. Muitos autores analisaram as influências das vibrações normais e tangenciais nos contatos de superfícies e no atrito [2]-[6].

As vibrações são usualmente produtos indesejados do atrito entre superfícies em deslizamento, uma vez que as vibrações induzidas pelo atrito são fatores inibidores para o aumento de precisão e eficiência nos sistemas mecânicos. Embora até recentemente as vibrações terem sido tratadas como uma consequência do atrito, há uma forte evidência da interação entre atrito e vibração.

Nos motores ultra-sônicos, o corpo vibrante transfere energia de movimento linear ou rotacional ao elemento móvel, por meio da força de atrito do par. A aplicação de vibração externa na interface do par em atrito cria uma nova possibilidade em engenharia, e ao mesmo tempo, problemas a serem resolvidos. As vibrações podem não apenas reduzir o atrito, mas também produzir força de tração, isso significa que o coeficiente de atrito cinético pode tornar-se “negativo”. Os dois corpos, interagindo na interface na presença de vibrações de alta frequência, criam movimentos relativos e efeitos não-lineares bastante complexos e a compreensão destes problemas é importante do ponto de vista fundamental e aplicado. Uma das características dos motores ultra-sônicos é a possibilidade de realizar movimentos de resolução nanométrica, e a micro-tribologia possui um papel importante

neste processo. Durante a última década estudos intensivos sobre os princípios físicos, projetos e aplicações dos motores ultra-sônicos têm sido feitos, [1-9, 11], sendo que a compreensão da estabilidade do par em atrito dos motores ultra-sônicos, dos fenômenos de desgaste e do atrito na presença de ultra-som podem auxiliar a encontrar soluções para aumentar o rendimento destes dispositivos em diversas aplicações.

1.4 - RELAÇÃO ENTRE A RESPOSTA DO MOTOR ULTRA-SÔNICO E O PAR EM ATRITO

Apesar de ser regida basicamente pelo mesmo princípio de funcionamento, a tecnologia de motores ultra-sônicos permite uma grande variedade de modelos diferenciados, como por exemplo, na quantidade de elementos piezoelétricos no estator, nos formatos dos elementos piezoelétricos, nas formas de excitação dos elementos piezoelétricos, etc. [1-9, 11], sendo que os avanços obtidos têm sido no sentido de atingir alto torque [1-9,11], maior velocidade máxima [1-9,11], maior miniaturização [3-9] e projetos dedicados a aplicações específicas [9].

Um mesmo motor ultra-sônico pode operar, sem nenhuma modificação estrutural interna, tanto como motor contínuo como motor de passo, bastando para isso, modular o sinal de excitação das cerâmicas piezoelétricas por um trem de pulsos. A Figura 1.8 representa genericamente o sinal de alimentação na frequência do ultra-som (a); o sinal modulador (b), e o sinal modulado a ser aplicado no piezoestator (c) quando o motor for operado como motor de passo. Isso possibilita o controle do período dos passos simplesmente por meio de um sistema eletrônico de geração de sinais, característica que os torna bastante flexíveis e distintos dos motores de passo convencionais, que não permitem controle sobre o período dos passo sem alterações mecânicas como por exemplo no sistema de engrenagens redutoras.

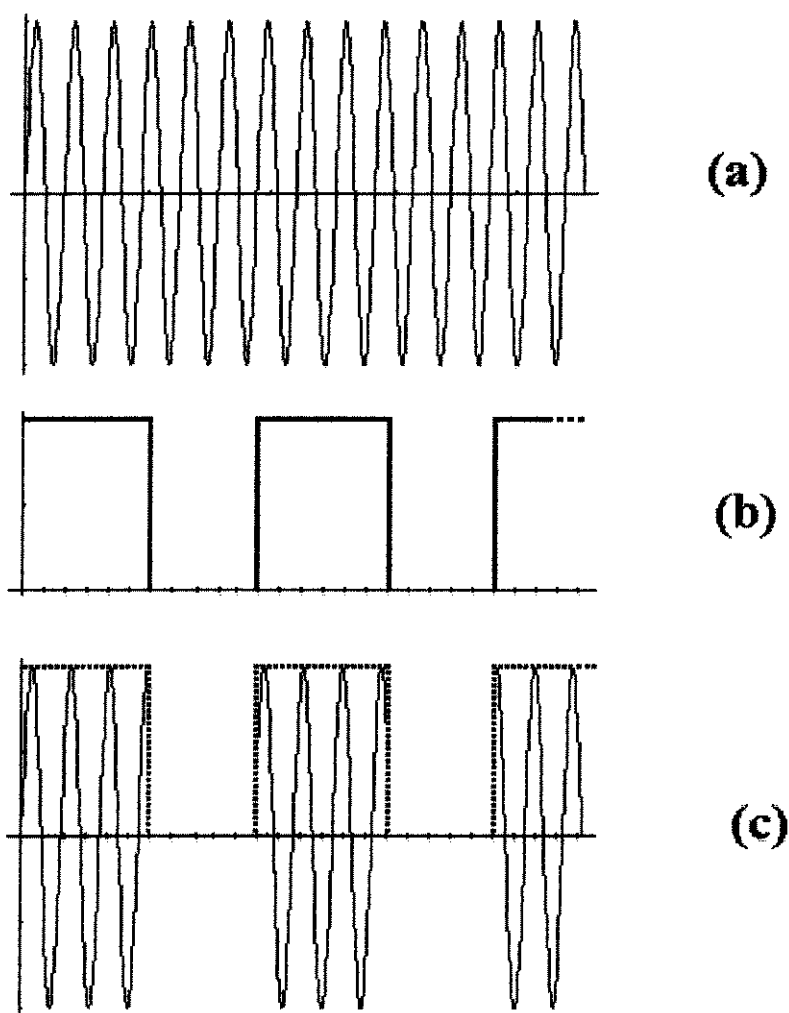


Figura 1.8 - Sinais de excitação dos vibradores piezoelétricos. **(a)** Sinal na frequência do ultra-som responsável pela operação em modo contínuo de motores piezoelétricos, **(b)** sinal de modulação que irá permitir a operação em modo de passo dos motores ultra-sônicos e **(c)** sinal de excitação ultra-sônico modulado. O controle dos períodos deste sinal modulador irá determinar os períodos dos passos do motor piezoelétrico.

A tendência é que motores ultra-sônicos de passo revolucionem os sistemas de posicionamento atuais, uma vez que permitem deslocamento desde a escala micrométrica até excursões contínuas em escala de centímetros.

Porém há limitações físicas não resolvidas na faixa de incrementos submicrométricos onde a repetibilidade ainda não é efetivamente alcançada. Os estudos dedicados ao modelamento dos motores ultra-sônicos basicamente consideram este dispositivo como uma “caixa preta”, onde na entrada está o sinal elétrico de excitação e na saída o movimento mecânico, como indicado na Figura 1.9. Entretanto, este modelo de caixa preta é demasiado simples, não levando em consideração a complexidade da interação entre estator e rotor (ou deslizador) que contém variáveis determinantes para o nível de resolução que se deseja chegar

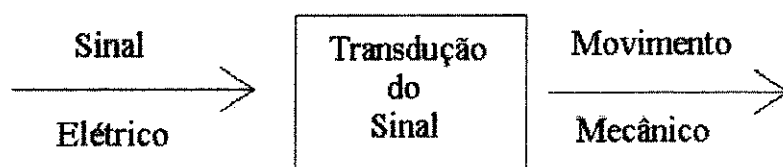


Figura 1.9 – *Modelo tipo entrada-saída “caixa-preta” para análise do motor ultrasônico.*

Para uma melhor compreensão da falta de repetibilidade nos deslocamentos dos passos abaixo de valores submicrométricos propomos subdividir o modelo “caixa-preta” em duas partes, conforme apresentado na Figura 1.10. O primeiro bloco consiste na transdução do sinal elétrico para o movimento mecânico, resultando em movimento circular ou elíptico nos pontos nodais do estator piezoelétrico e o segundo bloco consiste na interação entre o estator piezoelétrico e o rotor/deslizador.

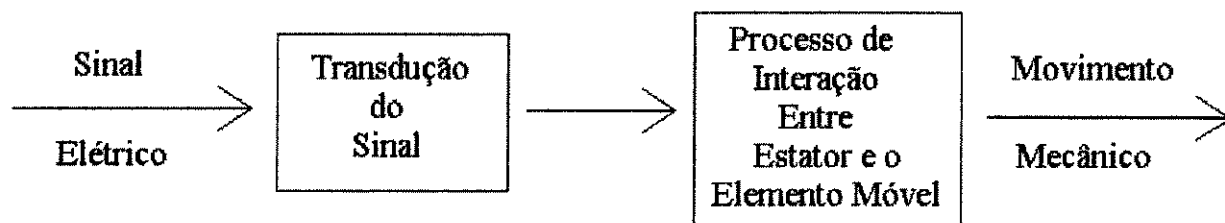


Figura 1.10 – *Modelo utilizado para o estudo do motor ultrassônico*

O presente trabalho está baseado neste modelo, focalizando o estudo no processo de interação entre o estator e o elemento móvel. A proposta foi a de realizar um estudo tribológico à nível micro/nanométrico do par em atrito responsável pela transmissão de movimento em motores ultra-sônicos. Para tanto foram selecionados três materiais de interesse para serem aplicados nos pares em atrito: aço inoxidável, cerâmica de alumina e filmes de diamante CVD. Nosso objetivo foi obter uma maior compreensão do comportamento de cada material e dos fenômenos envolvidos durante a interação das superfícies em atrito na presença de vibrações ultra-sônicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1].A. Kumada, “A piezoelectric ultrasonic motor”, Japan, J. Appl. Phys.,24 (1985), Suppl. 24-2, 741.
- [2].K. Nakamura, M. Kurosawa, S. Ueha, “Design of a Hybrid transducer type ultrasonic motor”, IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control, 40 (1993), 401.
- [3].R. Briot, M. N. Guillemot-Amadei, A. Pelourosen, C. Garabedian, “Generators for piezoelectric motors”, Meas. Sci. Technol., 4 (1993), 946.
- [4].A. Yabuki, M. Aoyagi, Y. Tomikawa, T. Takano, “Piezoelectric Linear Motors For Driving Head Element of CD-Rom”, Jpn. J. Appl. Phys., 33 (1994), 5369.
- [5].T. Maeno, D. B. Bogy, “FE Analysis and LDA Measurement of the Dynamic Rotor/Stator Contact in a Ring-Type Ultrasonic Motor”, J. of Tribology, 115 (1993), 631.

- [6].T. Sashida and T. Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motors", Clarendon Press-Oxford, New York, (1993).
- [7].Y. Tomikawa, K. Adachi, M. Aoyogi, T. Sagae, T. Takano, "Some Constructions and Characteristics of Rod-Type Piezoelectric Ultrasonic Motors Using Longitudinal and Torsional Vibrations", IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control, 39 (1992) 608.
- [8].S. Furuya, T. Maruhashi, Y. Izuno, M. Nakaoka, "Load-Adaptive Frequency Tracking Control Implementation of Two-Phase Resonant Inverter for Ultrasonic Motor", IEEE Trans. on Power Electronics, 7 (1992) 550.
- [9].T. Takano, Y. Tomikawa, C. Kusakabe, "Same Phase Drive-Type Ultrasonic Motors Using Two Degenetrate Bending Vibration Modes of a Disk", IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control, 39 (1992) 186.
- [10].R. P. Areny, J. G. Webster, "Sensors and Signal Conditioning", John Wiley & Sons Inc, (1991).
- [11].E. C. N. Silva, "Modelagem Vibracional de Transdutores de Ultra-Som Piezoelétricos Pelo Método de Elementos Finitos", Dissertação de Mestrado, DEM/USP-SP, (1993)

CAPÍTULO II

TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO

2.1 - INTRODUÇÃO

O estudo tribológico dos pares em atrito proposto neste trabalho esteve direcionado aos aspectos morfológicos e estruturais dos materiais envolvidos.

Este capítulo consiste de uma breve introdução às técnicas de análises utilizadas nesta tese. As técnicas empregadas foram principalmente:

- Microscopia de Força Atômica (MFA) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) - que permitem caracterizar topograficamente a superfície da amostra com resoluções superiores a quaisquer outras técnicas de microscopia;
- Espectroscopia Raman - que permite a identificação das ligações químicas dos elementos em suas diversas fases, e conseqüentemente a avaliação da qualidade química do material em análise.

2.2 - MICROSCOPIA DE FORÇA ATÔMICA

O Microscópio de Força Atômica (MFA) surgiu em seguida ao Microscópio de Tunelamento de Elétrons (MTE), praticamente a partir da observação dos fenômenos de interação entre a ponta de prova do MTE e a amostra. Em distâncias entre ponta e amostra na faixa de 5 a 10 Å, ocorrem ações interatômicas do tipo coulombianas que refletem a convolução das densidades eletrônicas de estados total da ponta e da amostra. São tantas as semelhanças construtivas destes equipamentos que possibilitam suas montagens em um

único sistema, podendo-se dizer que a operação do MTE ou do MFA resultam basicamente em modos distintos de operação do equipamento.

2.2.1 - Breve histórico do desenvolvimento das tecnologias MTE e MFA

Os primeiros modelos de tunelamento eletrônico foram propostos por Oppenheimer, ao estudar a auto-ionização do hidrogênio atômico (1928) [1-2], e por Gamow (1928), Gurney e Condon (1929) ao estudarem o decaimento das partículas alfa [1-7]. Na eletrônica, a aplicação mais famosa do tunelamento do estado-sólido é o chamado *dispositivo de Esaki* ou *diodo túnel* [2-5].

Pode-se dizer que a primeira demonstração instrumental de um equipamento para medida de morfologia por varredura de pontas de prova tenha sido o *topografiner*, demonstrado por Russel *et. al.* [8-10]. Era um instrumento de mapeamento micro-topográfico de superfície, muito semelhante ao MTE, cujo estágio de desenvolvimento não atingiu a escala de resolução atômica. O topografiner talvez não tivesse um isolamento suficiente para filtragem das vibrações. Tinha também um grande espaçamento entre ponta e amostra (100 - 1000 Å) [9], enquanto que o espaçamento entre ponta e amostra no MTE é de aproximadamente 10 Å [11]). O aprimoramento nas características do topografiner certamente levaria ao desenvolvimento do MTE mas o problema é que este trabalho foi interrompido prematuramente.

Os primeiros trabalhos de Binnig e Rohrer, no desenvolvimento do MTE (1982), constituíram e demonstraram a exequibilidade do tunelamento através do vácuo [8-12]. Isto porque, embora os primeiros trabalhos teóricos de aplicação na física do estado sólido tenham aparecido no contexto do tunelamento no vácuo, ou através de uma barreira de vácuo [13], conforme Binnig e Rohrer: “O tunelamento como uma ferramenta espectroscópica, foi desenvolvido exclusivamente para barreira de estado sólido” e as inúmeras experiências usando barreira de vácuo falharam devido a “problemas de vibração” [8,12]. Em dezembro de 1982 foi publicado o primeiro artigo [11] sobre o MTE (até então restrito aos eventos internos da IBM) incluindo uma descrição completa do instrumento, na época já na segunda geração do projeto. Foram abandonadas várias sofisticacões

tecnológicas anteriores que incluíam um sistema de isolamento de vibrações por levitação a supercondutores combinado com amortecimento por corrente de Foucault, além das incômodas bombas de ultra-vácuo (UHV) e o trabalho em temperaturas criogênicas.

Seguiu-se uma profusão de trabalhos nesta área com um número cada vez maior de pesquisadores, quer na direção à aplicação do MTE em outros ambientes (como a unidade desenvolvida para inserção num *dewar* de hélio líquido [14] e outros modelos para uso em ar ou líquidos [15], soluções salinas [9,16], etc.), quer em direção a instrumentos cada vez mais simples [8,11,17,18]. A tendência de simplificação começou, como dito, pelo abandono da levitação supercondutora (três meses mais tarde) [8,11,17,18], substituída por um sistema de molas em estágio duplo, terminados com amortecedores de borrachas de “viton” (as molas usadas tendiam a amortecer vibrações maiores que 1 Hz, mas isto não valia para as vibrações que se propagavam através das molas [8, 11]) até que o aperfeiçoamento subsequente dos modelos culminou no chamado MTE “de bolso” [19], que utiliza apenas amortecedores de borrachas de “viton” como sistema de amortecimento de vibrações, embora sua resolução aumente bastante quando o equipamento é combinado com o amortecimento estrutural de um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Um dos modelos mais simples é o MTE com micrômetro motorizado, como o de Stupian e Leung [20].

O trabalho desenvolvido no laboratório do Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica (DSIF) da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEE) na UNICAMP [1], (Figura 2.1), pode ser visto como uma contribuição à tendência de simplificar o instrumento, por meio de uma pequena unidade, sem qualquer outro sistema de isolamento de vibrações, além do amortecimento estrutural de sua própria base, que consistia de uma plataforma de granito de 600x250 mm² assentada sobre espuma em bancada de madeira e, entre a placa e a unidade em si, uma camada de plástico aerado. O isolamento de ruído eletromagnético e acústico foi obtido cobrindo a unidade com papel alumínio e uma folha de papel (inspirado na caixa de papelão de Stupian e Leug [20]), respectivamente.

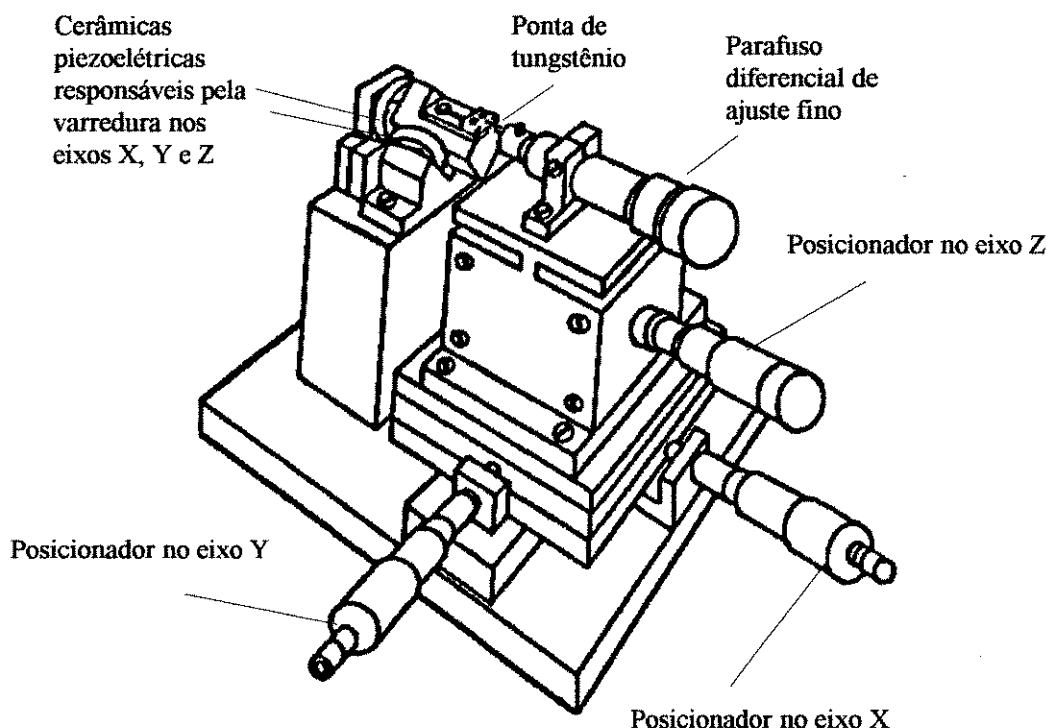


Figura 2.1 - *Croqui do MTE desenvolvido no DSIF/FEE/UNICAMP.*

2.2.2 - Princípio de funcionamento do MTE

No MTE uma ponta metálica com extremidade bastante fina é posicionada suficientemente próxima da superfície da amostra (5 a 10Å), sendo que esta amostra necessariamente deverá ser condutora ou semicondutora. Nestas distâncias e com a aplicação de uma tensão de polarização entre ponta-amostra, a probabilidade do tunelamento de elétrons entre os corpos torna-se possível (ver Figura 2.2). Como a corrente de tunelamento possui um comportamento inversamente exponencial com a barreira de potencial (Figura 2.3), que neste caso é aproximada pela distância ponta-amostra, varrendo-se a ponta através de uma área da superfície da amostra, obtém-se o levantamento

topográfico da densidade eletrônica próxima ao nível de Fermi da superfície da amostra [21].

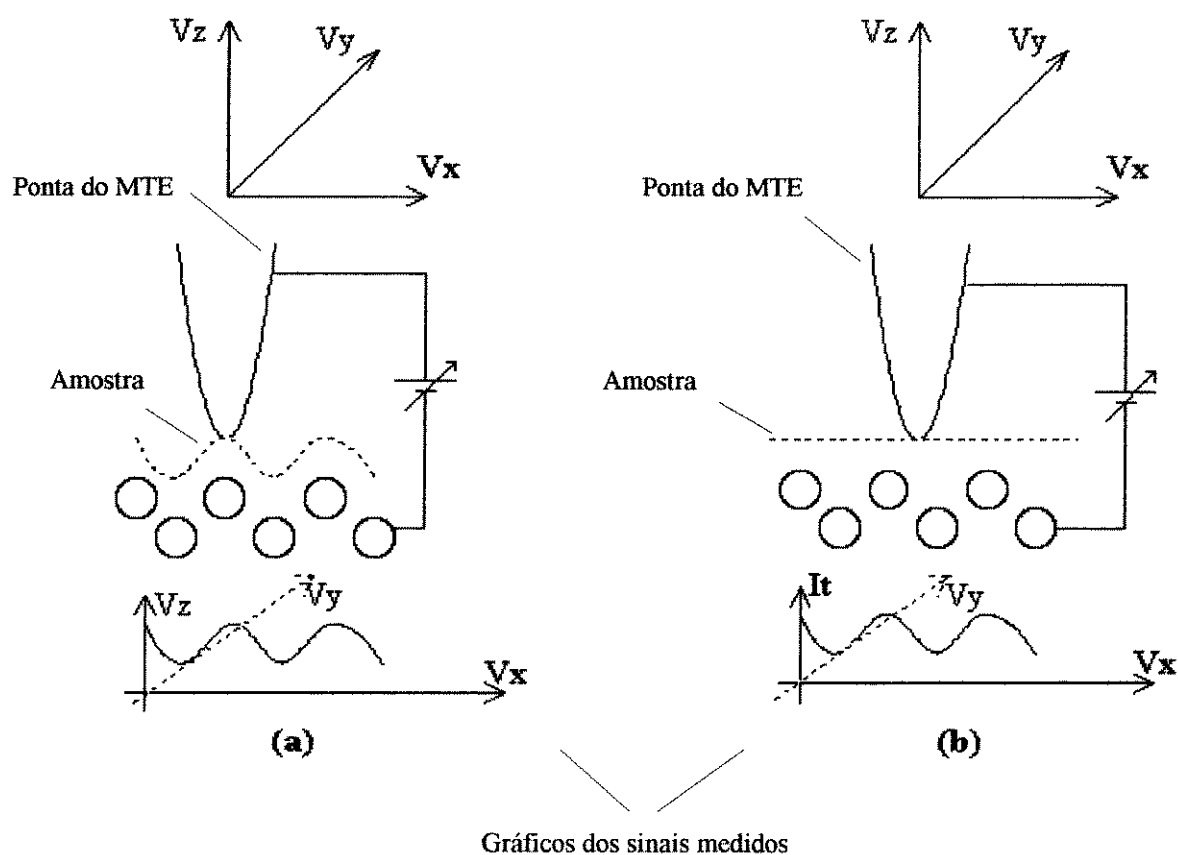


Figura 2.2 - Diagrama esquemático da interação ponta-amostra de um MTE: **(a)** Modo de operação corrente constante e **(b)** modo de operação altura constante.

O sistema de varredura, construído a partir de cerâmicas piezoelétricas (ver item 1.2.3), permite deslocamentos através dos três eixos ortogonais pelo controle das tensões V_x , V_y , e V_z , aplicadas no eletrodos das cerâmicas, sendo possível varreduras com resoluções micrométricas, nanométricas e até atômicas.

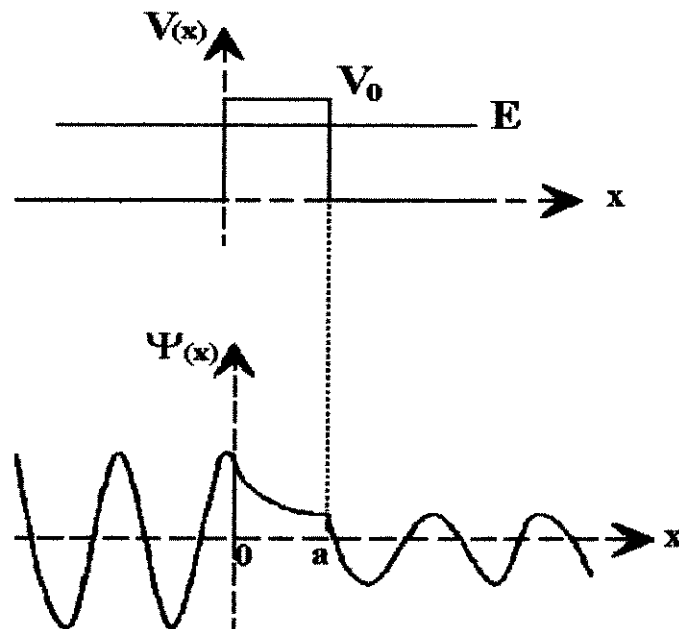


Figura 2.3 - *Tunelamento de elétrons entre o vácuo e o estado sólido.*

A possibilidade de deslocamento tridimensional da ponta em relação à amostra permite dois modos de operação do MTE, a saber: corrente constante, altura constante. No primeiro modo, a corrente de tunelamento é mantida constante, ou seja, a ponta é varrida sobre a superfície da amostra a uma distância relativamente constante. Através do monitoramento e processamento da corrente de tunelamento, obtêm-se tanto os sinais de controle das piezocerâmicas posicionadoras como dados gráficos para a montagem da imagem topográfica [ver Figura 2.2 (a)].

No modo altura constante, a ponta é varrida sobre a superfície da amostra, sem variações de deslocamento vertical da ponta em relação à amostra. Neste caso, as variações ficam por conta da corrente de tunelamento e o seu monitoramento é usado como dado para a imagem topográfica [ver Figura 2.2 (b)].

Mesmo que a ponta de prova de uma MTE não possua terminação monoatômica, o MTE é capaz de atingir resolução atômica, pois na realidade comporta-se como uma “ponta eletrônica” formada pelo potencial elétrico aplicado [22].

2.2.3 - Princípio de funcionamento do MFA

Quanto aos aspectos instrumentais, este equipamento possui uma pequena ponta ($\sim 5 \mu\text{m}$) montada na extremidade distal de uma pequena viga (cantilever) (~ 100 a $200 \mu\text{m}$ de comprimento), usualmente em formato de “V” ou retangular. A amostra é posicionada próxima à ponta (~ 5 a 10\AA), e o sistema de deslocamento e varredura tri-ortogonal é realizado por elementos piezoelétricos muito semelhante aos utilizados no MTE (Figura 2.4).

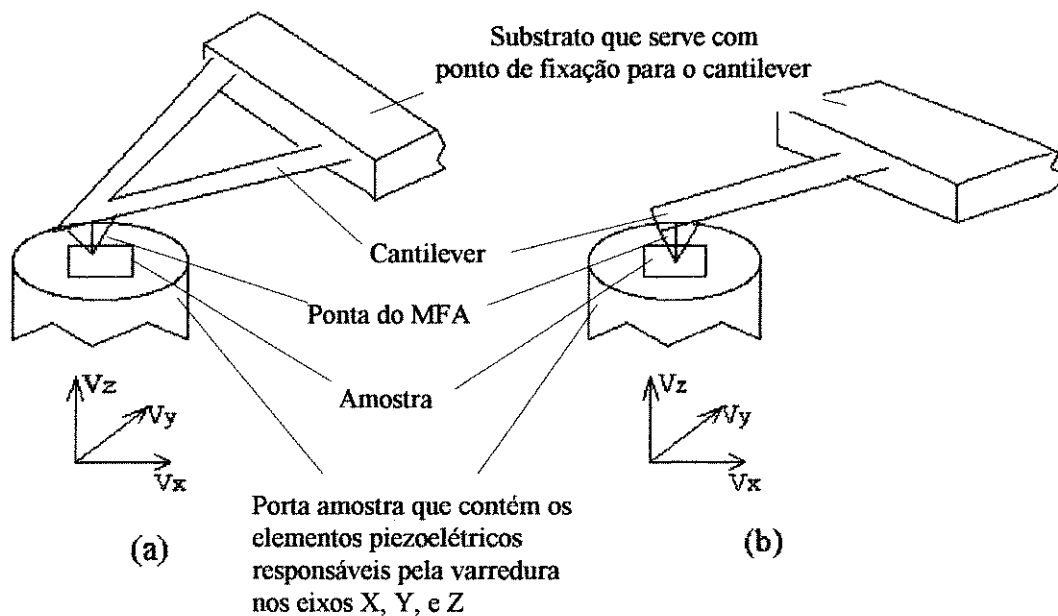


Figura 2.4 - Diagrama do sistema ponta-amostra de uma MFA: (a) Cantilever tipo “V” e (b) Cantilever tipo retangular.

O MFA pode trabalhar sob o modo de contato e não contato [23]. No modo de contato, ou repulsivo, a ponta é mantida em contato com a superfície da amostra por uma força de repulsão da ordem de 10^{-9} a 10^{-7} N [23]. No modo de não-contato, a ponta é mantida a uma pequena distância acima da superfície da amostra, tipicamente 100\AA e os efeitos de uma variedade de forças atuando entre ponta-amostra podem ser analisados. Estas

forças incluem forças de Van der Waals [23, 24], forças magnéticas [23, 25] e forças eletrostáticas [23, 26].

As forças de interação a pequenas distâncias entre ponta-amostra são basicamente forças atrativas do tipo Van der Waals. Quando a ponta do cantilever é movida em direção à superfície da amostra para um cantilever com pequena constante de força (menor que o gradiente de força de interação) a ponta é subitamente atraída em direção à amostra até atingir a posição de equilíbrio próxima ao potencial mínimo de interação. A força necessária para “puxar” a ponta da superfície pode ser medida e assim caracterizar a superfície do material [27].

As técnicas de mapeamento utilizando forças magnéticas são baseadas no uso de uma ponta magnetizada que irá excitar a região de análise e uma ponta de prova de microscopia de força atômica convencional, responsável pelo mapeamento propriamente dito. Este equipamento é utilizado para investigações de efeitos magnéticos dinâmicos e estáticos à nível atômico [28].

O MFA utilizado para a detecção de forças eletrostáticas local faz uso de uma diferença de potencial aplicada entre a ponta-amostra. Depois de carregada a amostra é analisada com a ponta aterrada eletricamente, produzindo contornos de gradiente de forças constantes. Neste sistema, há três contribuições para o gradiente de forças: a força eletrostática na ponta devido a distribuição de cargas na superfície da amostra, a força eletrostática devido a diferença de potencial aplicada entre ponta-amostra, e as forças de Van der Waals entre ponta-amostra. Quando não há nem carga na superfície e nem diferença de potencial aplicada à amostra, a ponta irá detectar somente forças atrativas do tipo Van der Waals [23].

A medida da força de interação entre ponta e amostra é feita monitorando-se a deflexão do cantilever, uma vez conhecida sua constante de força. Porém outras características e propriedades deste elemento são necessários para o bom desempenho do equipamento, como alta frequência de ressonância, alta rigidez lateral, pequeno comprimento e constante de força baixa.

Os sistemas de detecção usualmente utilizados são: por corrente de tunelamento (Figura 2.5(a)) [29], pelo método capacitivo (Figura 2.5(b)) [29] e pelo método óptico (Figura 2.5(c)) [29].

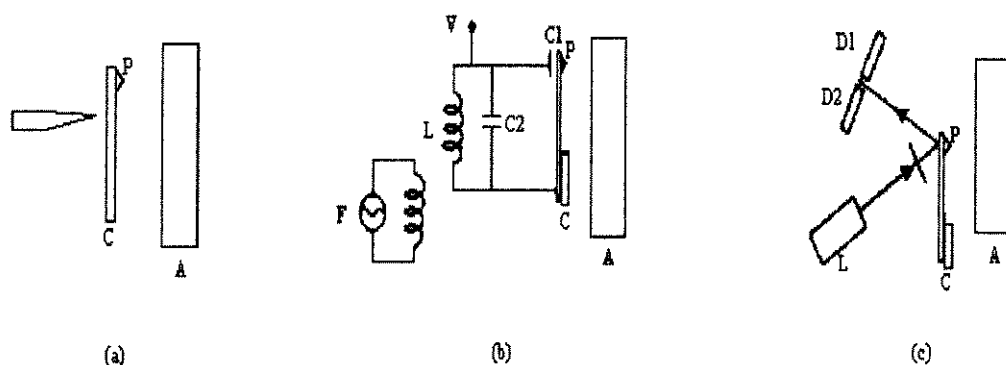


Figura 2.5 - Métodos de detecção da deflexão de cantilever em MFA: (a) por tunelamento, (b) por capacitância e (c) por feixe de laser [29].

Os tipos de materiais mais frequentemente utilizados na fabricação de cantilevers para MFA são óxido de silício, nitreto de silício e fios metálicos como ferro e níquel. Os formatos mais utilizados são os retangulares ou em formato de “V”, obtidos a partir das técnicas de microfabricação empregadas na microeletrônica [23], [30].

Cuidados especiais devem ser tomados no sentido de evitar imagens de MFA distorcidas devido a: geometria da ponta, força excessiva ou insuficiente e frequência de varredura acima do tempo de resposta do cantilever ou próxima da sua frequência de oscilação natural. Quanto à interpretação das imagens, deve-se estar ciente de que elas retratam a convolução entre as forças atuando entre a ponta e a superfície da amostra.

2.3 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Desde a introdução dos primeiros equipamentos de microscopia eletrônica de varredura (MEV) há vinte e cinco anos atrás [31, 32] este método tem crescido em importância como ferramenta de análise e caracterização de materiais.

Historicamente as idéias que levaram ao desenvolvimento dos microscópios eletrônicos de alta resolução tiveram origens diversas. O elétron, descoberto por Thomson (1897) [33, 34] foi inicialmente caracterizada como uma partícula que tem carga negativa de magnitude igual a carga de um átomo ionizado uma única vez e massa 1836 vezes menor do que a de um átomo de hidrogênio ionizado. Seguiu-se um período de diversas experiências nos quais os feixes de elétrons foram defletidos e concentrados (focados) por campos elétricos e magnéticos, culminando no desenvolvimento do osciloscópio de raios catódicos. Em 1924 Louis de Broglie [3, 5], propôs sua surpreendente hipótese de que havia uma natureza ondulatória associada com as partículas, em particular aos elétrons. Logo em seguida Schrödinger (1926) iniciou o desenvolvimento da mecânica ondulatória por meio da analogia entre a mecânica e a óptica, demonstrada por Hamilton (1930) e combinando com as idéias de Broglie. As hipóteses de Broglie foram verificadas experimentalmente em 1927 por Davisson e Germaer nos Estados Unidos, e por Thomson e Reid na Inglaterra. Seguiram-se alguns anos de avanços no modelamento da trajetória dos elétrons sob efeito elétrico e magnético, dando origem a uma nova ciência conhecida como óptica eletrônica. A primeira descrição de um microscópio eletrônico, desenvolvido a partir de um oscilógrafo, foi publicada em 1932 [34].

2.3.1 - Componentes principais do MEV

Apesar dos detalhes de construção variarem consideravelmente de um instrumento para outro, pode-se ter uma boa visão qualitativa de um MEV conforme descrito a seguir. O MEV é composto de quatro partes principais: sistema eletrônico-óptico que produz a ponta eletrônica de varredura, uma amostra na qual se produz o sinal de informação a partir da interação entre o feixe de elétrons e o material, um sistema de detecção que coleta os portadores da informação emitidos pela amostra e que amplifica o sinal elétrico resultante, e finalmente o sistema de monitores de vídeo que sequencialmente mostra a informação (Figura 2.6).

O MEV trabalha em pressões de vácuo da ordem de 10^{-4} mmHg. Os componentes acessórios do MEV como fonte de tensão que fornece o potencial ao feixe, fontes de

corrente para as lentes magnéticas, indicadores de vácuo, sistemas de alinhamento e controle de magnificações e de foco, entre outros, não estão indicados no diagrama apresentado na Figura 2.6.

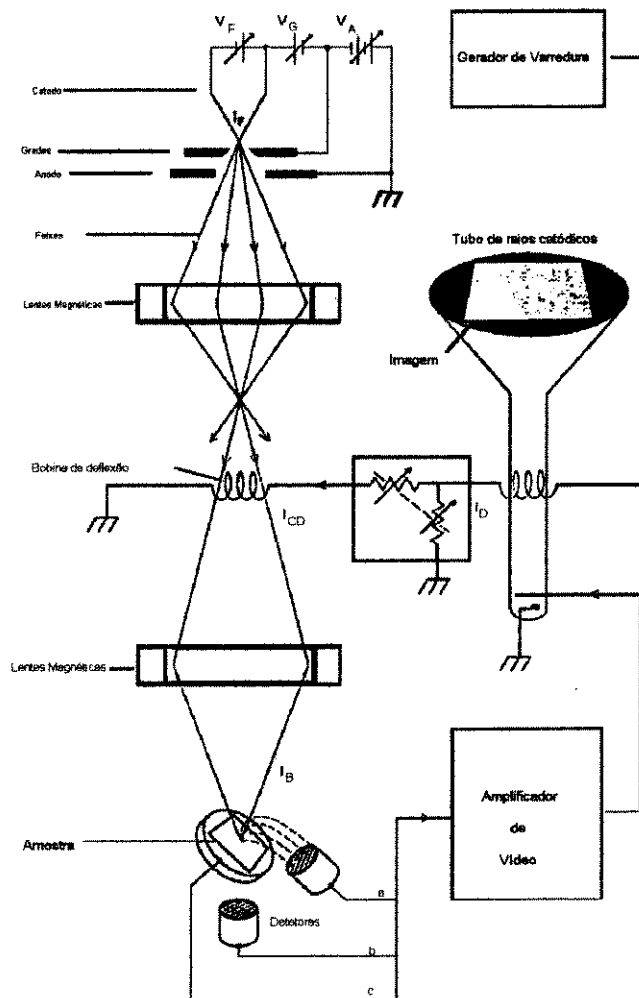


Figura 2.6 - Diagrama esquemático simplificado de um Microscópio Eletrônico de Varredura [34].

2.3.2 - Princípio de operação do MEV

O princípio de operação do MEV está baseado fundamentalmente na quantificação dos elétrons refletidos por uma amostra como resposta a uma excitação eletrônica incidente. A medida de elétrons refletidos (ER) permite uma definição quantitativa da morfologia e

topografia da amostra. O feixe de elétrons é originado em um catodo que consiste de um filamento de tungstênio percorrido por uma corrente elétrica (I_F). Os elétrons emitidos pelo filamento são acelerados em direção à grade, e o anodo aterrado. O conjunto catodo, grade e anodo é conhecido como canhão de elétrons. Posteriormente, um sistema de lentes reduz o diâmetro do feixe de elétrons para aproximadamente 100 Å. A redução é realizada por meio de duas ou mais lentes magnéticas em série, cada uma capaz de reduzir o diâmetro do feixe de um fator entre 20 a 100 vezes. Uma corrente ajustável (I_{CD}) é aplicada à bobina de deflexão com o objetivo de mover o feixe de elétrons através da amostra. Sendo I_D a corrente através das bobinas de deflexão do tubo de raios catódicos, a razão I_{CD}/I_D determina o fator de ampliação do microscópio.

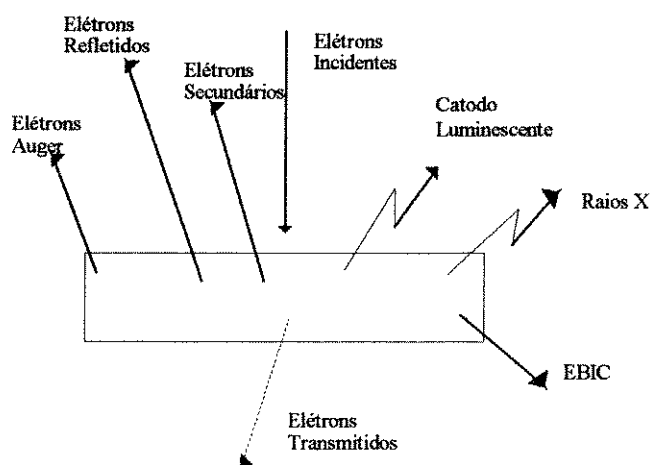


Figura 2.7 - Interação elétrons-matéria.

Quando os elétrons incidentes (E_i) alcançam a amostra, além dos elétrons refletidos utilizados no MEV, diversos tipos de sinais são emitidos pela amostra em resposta à excitação dos E_i , como indicado na Figura 2.7, propiciando cada um deles um modo especial de caracterização. Estas análises não serão discutidas aqui pois além de não serem utilizadas na interpretação dos resultados obtidos em nossos ensaios, tratam-se de técnicas de caracterização bastante sedimentadas.

2.4 - ESPECTROSCOPIA RAMAN

Esta técnica que leva o nome de um dos idealizadores, C. V. Raman (1928) [39, 40], tem origem na interação entre a radiação luminosa e a matéria, resultando transições entre estados de energias vibracionais, rotacionais e eletrônicas da matéria no sistema de análise [39, 41].

Incidindo-se uma radiação monocromática (com número de onda ν_0) sobre um sistema, seja ele sólido, líquido ou gasoso, a maior parte desta radiação é transmitida ou refletida pelo sistema sem qualquer alteração em suas características; porém, uma pequena parcela desta radiação é espalhada, e nesta porção pode-se observar além do número de onda original ν_0 , conhecido como *espalhamento Rayleigh*, componentes com novos números de onda (*espalhamento Raman*), geralmente sob a forma $\nu = \nu_0 \pm \nu_m$, também conhecidos como *radiações Stokes e anti-Stokes*.

No conjunto de números de onda da radiação espalhada pelo sistema irradiado, os novos números de onda são denominados *linhas Raman* ou *bandas Raman*, e todo o conjunto constitui o *espectro Raman*.

A origem das componentes com números de onda diversos aos da radiação monocromática incidente sobre a amostra está na transferência de energia entre ambos. Quando uma radiação com número de onda ν_0 e energia $\hbar.c.\nu_0$, atinge um sistema molecular, este pode realizar uma transição entre dois de seus estados de energia. Se a transição for de um estado com energia E_1 para um estado E_2 de maior energia, a diferença necessária à transição $\Delta E = E_2 - E_1$, será recebida da radiação. Este processo pode ser interpretado como a aniquilação de um fóton com energia $\hbar.c.\nu_0$, e a geração de outro fóton, sendo que sua energia $E = \hbar.c.(\nu_0 - \nu_m)$ será inferior em decorrência da perda da quantidade de energia empregada na transição $\Delta E = \hbar.c.\nu_m$. Isso explica o aparecimento de uma radiação com número de onda inferior. As linha espectrais correspondentes a este fenômeno são conhecidas como *linhas Stokes*.

Alternativamente, o processo interativo radiação-amostra pode provocar uma transição para um estado de energia inferior nas moléculas do sistema. Para tanto, o

excedente de energia é devolvido sob a forma de fótons. De forma análoga ao processo supradescrito, a energia destes fótons será $E = \hbar.c.(v_0 + v_m)$. As linhas Raman associadas a estes fótons são ditas anti-Stokes.

As características relevantes no espectro são as amplitudes dos desvios no número de onda da radiação espalhada em relação ao número de onda incidente, e não o número de ondas absoluto das linhas Raman.

A espectroscopia Raman permite a identificação e a avaliação do grau organizacional e da quantidade de material em cada fase presente em uma amostra, uma vez que indica as transições energéticas em um sistema molecular que formam um conjunto univocamente determinado pelas características de cada material.

Neste trabalho, a espectroscopia Raman foi utilizada como ferramenta de análise do desgaste dos filmes de diamante CVD sujeitos ao atrito em motores ultra-sônicos. A seguir, são apresentados algumas características do espectro Raman das fases do carbono relevantes à análise da qualidade dos filmes de diamante.

2.4.1 - Espectroscopia Raman do diamante sintetizado por CVD

O diamante apresenta um pico bastante característico no espectro Raman centrado em 1332 cm^{-1} (Figura 2.8). Contudo, os filmes de diamante obtidos por CVD podem não possuir uma estrutura com grau de perfeição tão alto como do diamante natural; e mais, podem conter outras fases do carbono no interior dos cristais de diamante. Desta forma, para avaliar a qualidade de um filme de diamante é necessário também o conhecimento dos espectros Raman das outras fases do carbono, e como a presença destas fases afetam o espectro do diamante.

A partir do espalhamento inelástico da luz pelos modos de excitação vibracional da amostra, é possível a obtenção de informações a respeito da organização estrutural e da composição de fase no filme [39, 42].

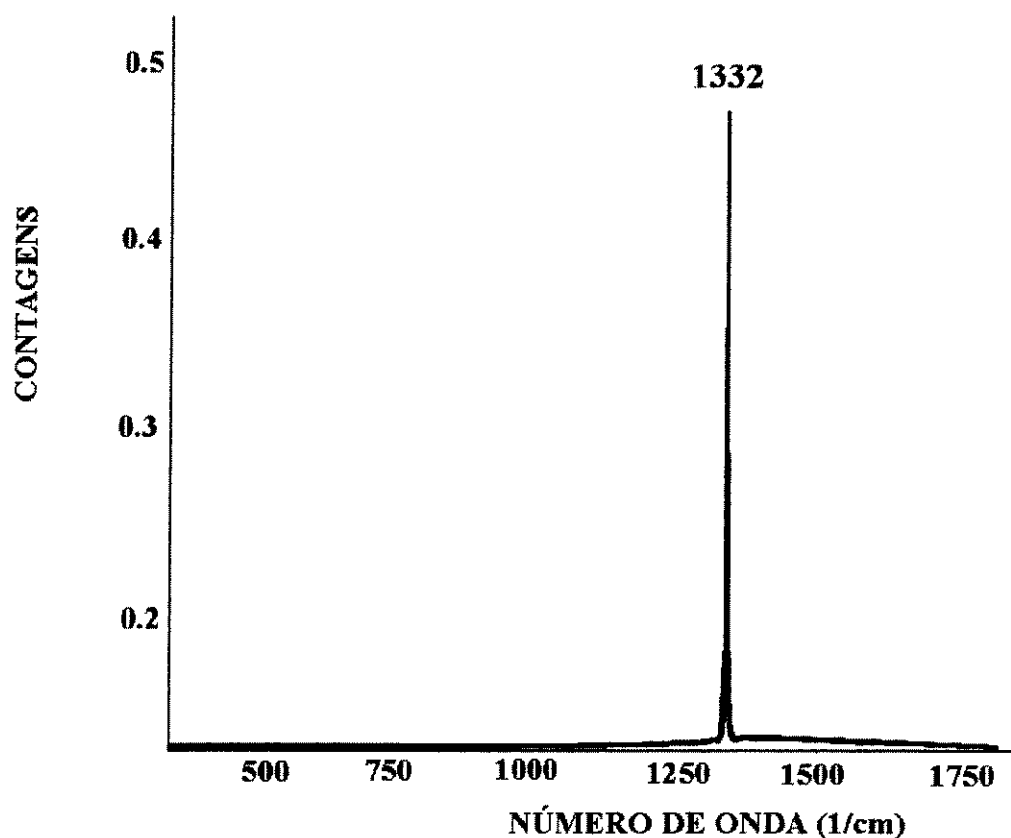


Figura 2. 8 - *Espectro Raman mostrando o pico característico do diamante natural puro* [39].

Em amostras cristalinas, os comprimentos de onda são determinados pela geometria de espalhamento e pela conservação do vetor \mathbf{k} nas transições entre estados de energia. Em outras palavras, só serão selecionados aqueles vetores de onda com $\mathbf{k} \cong 0$ ou excitações no centro da zona de Brillouin. Assim, o espectro Raman de cristais apresentará picos agudos representando os modos de energia no centro da zona de Brillouin. Estas regras de seleção também permitem transições compostas por dois fônons com momentos opostos. Este tipo de espalhamento é dito de segunda ordem [39], [42-44].

Para uma interpretação básica do espectro Raman, podem-se relacionar os diversos aspectos do material sob análise, com algumas características de seu espectro. A intensidade do sinal está relacionada à espessura do material naquela fase (correspondendo àquele número de onda ou àquela banda espectral) dentro da amostra. A largura das linhas Raman

(de primeira ordem) pode estar relacionada à perfeição da rede cristalina (quanto melhor organizado for o cristal, mais estreita a linha Raman correspondente) [39, 45].

2.4.2 - Características do espectro Raman das fases carbono

- Espectro Raman do diamante cristalino

O diamante natural, assim como os cristais de diamante sintético com estruturas de alta pureza, possuem espectros Raman identificados por meio de um pico característico com número de onda igual a 1332 cm^{-1} . Este pico corresponde ao único modo Raman ativo, permitido pelas regras de seleção para o grupo espacial O_h , uma transição de fônon de primeira ordem com simetria T_{2g} [43].

- Espectro Raman do grafite cristalino

Diferentemente do diamante cristalino, a rede formada por átomos de carbono exercendo ligações do tipo sp^2 entre si é conhecida como grafite cristalino, e muitas vezes está presente nos filmes de diamante crescidos por CVD. Dois modos Raman de primeira ordem identificam o grafite no espectro Raman. O primeiro é representado por um pico intenso e agudo em 1580 cm^{-1} , e é relacionado ao modo de vibração com simetria E_{2g} , atuando na ligação C-C no sentido longitudinal [43].

A Figura 2.9 mostra um espectro típico contendo as bandas Raman correspondentes aos modos vibracionais do grafite cristalino. O segundo modo tem sido causa de discussões na literatura [39]. A controvérsia gira em torno do fato de que a presença deste pico é restrita aos filmes de grafite com granulação fina e grãos bem cristalizados, não podendo ser detectada em amostras de grafite policristalino com granulação maior. Alguns autores inferiram que a causa deste fenômeno seja a quebra da regra de seleção que exige transições $k = 0$ pela granulação fina, permitindo que o ponto M da zona hexagonal de Brillouin possa contribuir para o espalhamento Raman com uma banda em 1357 cm^{-1} .

No grafite também pode ocorrer um pico de segunda ordem, com número de onda de 2710 cm^{-1} (2×1357), como resultado da participação de dois fônons no processo.

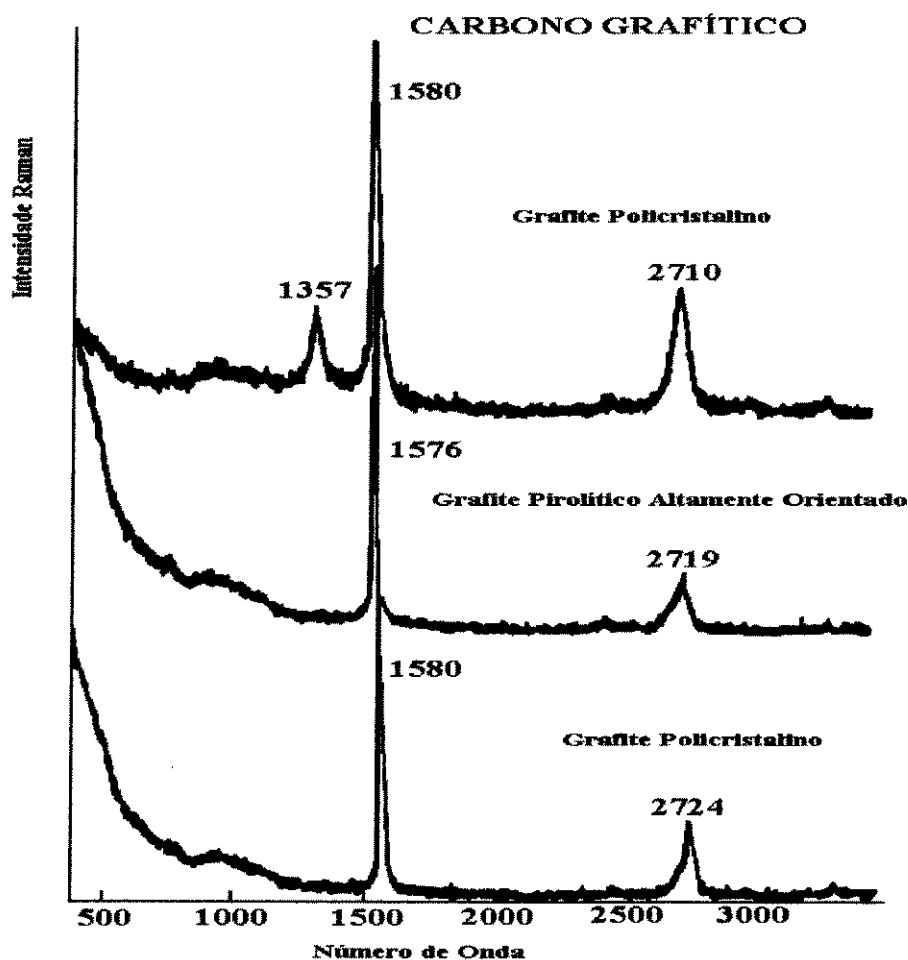


Figura 2.9 - Espectros Raman obtidos de diversos tipos de grafite cristalino [39].

Um ponto importante a respeito da presença do grafite nos filmes de diamante, é que o grafite apresenta uma eficiência de espalhamento de $500 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}/\text{sr}$, enquanto que a eficiência no diamante em 1332 cm^{-1} , é de apenas $9 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}/\text{sr}$. A intensidade Raman no espectro do grafite é portanto, cerca de 50 vezes superior a do diamante. Em termos práticos, isto torna a espectroscopia um método bastante eficaz na avaliação de porcentagens de fases gráficas em filmes de diamante, mas por outro lado, ineficaz na avaliação da presença de diamante em outros tipos de carbono [39], [44].

- Espectro Raman do carbono amorfo

Ao sofrer hibridização na forma sp^2 , o carbono não necessita obrigatoriamente formar grafite cristalino. Se a energia no processo for baixa, pode ocorrer também a formação de material amorfo em uma das diversas formas [39].

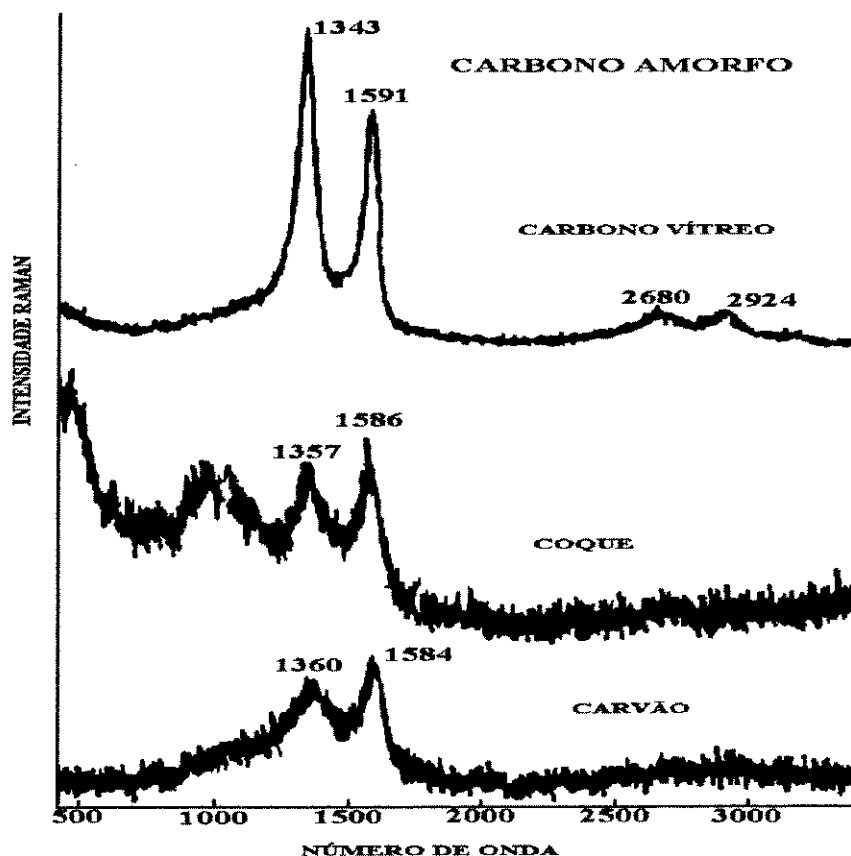


Figura 2.10 - Espectros comparativos entre diferentes formas de carbono amorfo [39].

Por apresentar hibridização idêntica a do grafite (com ligação sp^2), este material pode também ser referido de um modo geral como *fase gráfitica*. No espectro Raman, esta semelhança se reflete como uma situação limite para o alargamento das bandas do grafite cristalino devido à diminuição do grau de organização da rede. A Figura 2.10 apresenta espectros Raman de vários tipos de carbono amorfo. Alguns destes espectros apresentam ainda picos próximos a 1357 e 1580 cm^{-1} , prováveis degenerescências das linhas espectrais do grafite cristalino, recebendo a denominação, para este caso, de bandas D e G, respectivamente [43].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Fukui, “Técnicas de Microscopia de Tunelamento de Elétrons e de Microscopia de Força Atômica Aplicadas à Análises de Grafite HOPG ”, Dissertação de Mestrado, DSIF/FEE/UNICAMP (1992).
- [2] C. B. Duke, “Tunneling in Solids”, Academic New York, (1969).
- [3] P. A. Tipler, “Física Moderna”, 1ª ed. trad., Guanabara Dois, Rio de Janeiro, (1981).
- [4] R. M. Eisberg, “Fundamentos da Física Moderna”, 1ª ed. trad., Guanabara Dois, Rio de Janeiro, (1979).
- [5] R. M. Eisberg, R. Resnick, “Física Quântica”, 4ª ed. trad., Campus, Rio de Janeiro, (1988).
- [6] A. Beiser, “Concepts of Modern Physics”, 2nd rev. ed., McGraw-hill, New York, (1977).
- [7] K. N. Mukhin, “Experimental Nuclear Physics”, Vol. 1, 1st ed., Eng. Trans., Mir, Moscow, (1987).
- [8] G. Binnig, H. Rohrer, Rev. Mod. Phys., 59 (1987) 615.
- [9] Y. Kuk, P. J. Silverman, Rev. Sci. Instrum., 60 (1989) 165.
- [10] P. K. Hansma, J. Tersoff, J. Appl. Phys., 61 (1987) R1.
- [11] G. Binnig, H. Rohrer, Helv. Phys. Acta, 55 (1982) 726.
- [12] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel, Appl. Phys. Lett., 40 (1981) 178; Physica 109&110B (1982) 275.
- [13] R. H. Fowler, L. Nordheim, Proc. R. Soc. London, A119 (1928) 173.
- [14] D. P. E. Smith, G. Binnig, Rev. Sci. Instrum., 57 (1986) 2630.
- [15] B. Drake, R. Sonnenfeld, J. Schneir, P. K. Hansma, G. Slough, R. V. Coleman, Rev. Sci. Instrum., 57 (1986) 441.
- [16] B. Drake, R. Sonnenfeld, J. Schneir, P. K. Hansma, Surf. Sci., 181 (1987) 92.
- [17] G. Binnig, H. Rohrer, IBM J. Res. Develop., 30 (1986) 355.
- [18] C. F. Quate, Phys. Today, Aug. (1986) 26.
- [19] Ch. Gerber, G. Binnig, H. Fuchs, O. Marti, H. Rohrer, Rev. Sci. Instr., 57 (1986) 221.
- [20] G.W. Stupian, M. S. Leung, Rev. Sci. Instrum., 60 (1989) 181.

- [21] D. Tománek, S. G. Louie, H. J. Mamin, D. W. Abraham, R. E. Thomson, E. Ganz, J. Clarke, *Phys. Rev. B.*, 35 (1987) 7790.
- [22] M. J. Vasile, D. Grigg, J. E. Griddth, E. Fitzgerald, and P.E. Russel, *J. Vac. Sci. Technol. B*9(6), (1991) 3569.
- [23] T. R. Albrecht, S. Akamine, T. E. Carver, C. F. Quate, *J. Vac. Sci. & Technol. A*, 8(4), (1990) 3386.
- [24] Y. Martin, C. C. Williams, H. K. Wickramasinghe, *J. Appl. Phys.*, 61 (10), (1987) 4723.
- [25] Y. Martin, H. K. Wichramasinghe, *Appl. Phys. Lett.*, 50 (20), (1988) 1455.
- [26] J. E. Stern, B. D. Terris, H. J. Manin, D. Rugar, *Appl. Phys. Lett.*, 53 (26) (1988) 2717.
- [27] Y. Martin, C. C. Williams, H. K. Wickramasinghe, *J. Appl. Phys.*, 61 (1987) 4723.
- [28] Y. Martin, H. K. Wickramasinghe, *Appl. Phys. Lett.*, 50 (1987) 1455.
- [29] D. Sarid, V. Elings, *J. Vac. Sci. Technol.*, B9 (2) (1991) 431.
- [30] T. R. Albrecht, C. F. Quate, *J. Appl. Phys.*, 62 (7) (1987) 2599.
- [31] C. E. Hall, "Introduction to Electron Microscopy", McGrall Hill N. York, (1966).
- [32] P. Burggraaf, "Scanning Electron Microscopy for Production", *Semiconductor International*, Aug (1983).
- [33] R. M. Eisberg, "Fundamentos da Física Moderna", ed. trad., Guanabara Dois, (1979).
- [34] C. E. Hall, "Introduction to Electron Microscopy", McGrall Hill N. York, (1966).
- [35] M. S. Chung, T. E. Everhart, "Simple Calculation of Energy Distribution of Low-Energy Secondary Electrons Emitted From Metals Under Electron Bombardment", *J. Appl. Phys.*, 45 (2) (1974).
- [36] E. S. Meieran, P. A. Flinn, J. R. Carruthers, "Analysis Technology dor VLSI Fabrication", *Proc. IEE*, 75(7) (1987).
- [37] B. Konemann, J. Mucha, G. Zwiehoff, "Bult-in Test for Complex Digital Integrated Circuits", *IEEE J. Solid States Circ.*, SC-15 (1980).
- [38] K. Lohnert, E. Kubalek, "Caracterization of Semiconducting Materials and Devices by EBIC and CL Techiniques", *Microscopy of Semiconductors Materials*, (1983).

- [39] C. R. Rodrigues, "Síntese e Caracterização de Diamantes pelo Método CVD para Aplicação em Dispositivos Eletrônicos", Tese de Doutorado, DSIF/FEE/UNICAMP, (1993).
- [40] C. V. Raman, K. S. Krishnan, "A New Type of Secondary Radiation", *Nature*, 121 (1928) 501.
- [41] D. A. Long, "Raman Spectroscopy", McGraw Hill Inc., (1977).
- [42] R. J. Nermanich, J. T. Glass, G. Luckovsky, R. E. Shroder, *J. Vac. Sci. Technol.*, A6 (3) (1988) 1783.
- [43] D. S. Knight, W. B. White, "Characterization of Diamond Films by Raman Spectroscopy", *J. Materials Research*, 4 (2) (1989).
- [44] P. Lespade, A. Marchand, "Caracterisation de Materiaux Carbones par Microspectrometrie Raman", *Carbon*, 22 (4/5) (1984), 375-385.
- [45] A. M. Bonnot, *Phys. Rev. B*, 41 (9) (1990) 6040.

CAPÍTULO III

CONCEITOS BÁSICOS DE TRIBOLOGIA

3.1 - INTRODUÇÃO

O termo “Tribologia” tem sido utilizado desde 1966 (H. P. Jost) para descrever de forma genérica e unificada a ciência e tecnologia dos fenômenos correlacionados com o atrito, desgaste e lubrificação. A palavra tribologia é derivada dos prefixos gregos “tribo” cujo significado é o ato esfregar superfícies em movimentos relativos e “logos” (estudo) [1-4].

O conceito de atrito foi introduzido há mais de dois mil anos atrás por Aristóteles [2] e tem sido amplamente estudado em termos de fatores puramente externos, como resistência ao movimento, mudanças nas dimensões e formatos, aquecimento, ruído, vibrações, e eletrificações dos corpos sob interação [1]. Sabe-se que os efeitos tribológicos têm manifestações macroscópicas, porém os fenômenos de causa ocorrem principalmente no nível micro e nano-métrico [3].

A partir de 1930 procurou-se estabelecer uma descrição qualitativa das leis de atrito e desgaste baseada nos resultados empíricos observados no nível microscópico dos fenômenos sob estudo. Este desenvolvimento deu origem aos conceitos do atrito mecânico-molecular e de deformação-adesão, além da diferenciação dos tipos de desgaste baseado em conceitos elementares transformações físico-mecânicas de superfícies. Recentemente, o progresso da microscopia óptica, e com o advento de novos tipos de microscópios (microscopios eletronicos de varredura, transmissão, microscopia de força atômica) tornou possível a obtenção de informações mais precisas sobre as mudanças na estrutura das superfícies durante o atrito, as quais devem permitir a elaboração de modelos mais precisos

e adequados para o entendimento dos processos microscópicos e nanoscópicos relacionados ao atrito.

A tribologia moderna pode ser subdividida em seis campos de conhecimento associados as suas aplicações:

- i) Tribo-análise - consiste de premissas teóricas da tribo-mecânica, física e química. Trata dos problemas relativos à sistematização do processo de atrito básico e seu modelamento com o objetivo de modelar os resultados da interação de contato entre sólidos sob condições específicas.
- ii) Ciência de tribo-materiais - dedica-se ao estudo e controle de estruturas e propriedades de materiais, associando os resultados experimentais com as pesquisas teóricas de tribologia com o objetivo de sedimentar as ciências da tribo-engenharia e da tribo-tecnologia.
- iii) Tribo-tecnologia - dedica-se ao desenvolvimento de métodos de produção, e estudos e projetos de componentes aplicados em sistemas sujeitos ao atrito.
- iv) Tribo-engenharia - compõe o conjunto de sistemas de engenharia nos quais os processos de atrito e desgaste ocorrem. Abrange o estágio final do processo de desenvolvimento e montagem de componentes e elementos de atrito, incorporando os avanços em tribo-análise, ciência de tribo-materiais e tribo-tecnologia.
- v) Tribo-monitoramento - engloba o grupo de sistemas e processamentos utilizados em testes, diagnósticos, monitoramento contínuo e regulação das características das junções.
- vi) Tribo-informática - conjunto de sistemas, processamento e armazenagem de informações tribológicas.

Os desenvolvimentos recentes da tribologia têm sido aplicados em diversas áreas como por exemplo em novos materiais (polímeros, cerâmicas, materiais compostos, filmes de diamante CVD, etc.), indústria de filmes finos, equipamentos de informática (mecatrônica, leitura e armazenamento de dados , etc.). Porém, em muitos trabalhos de desenvolvimento a tribologia tem sido tratada primeiramente como uma “caixa preta” nos projetos de fabricação. Frequentemente, após o término do primeiro protótipo podem

ocorrer problemas tribológicos, os quais são resolvidos por métodos de tentativa e erro nos projetos. Com o avanço da tribologia torna-se possível introduzir avanços nos primeiros estágios dos projetos, com a prevenção dos problemas e ganho de tempo entre a produção do protótipo e do produto final.

3.2 - NATUREZA DAS SUPERFÍCIES

Em geral, as superfícies sólidas, quando analisadas na escala microscópica, estão longe de serem planas, apresentando diversos tipos de perfis de rugosidade. A Figura 3.1 apresenta uma ilustração típica de uma superfície em escala microscópica (a) com picos e vales de diferentes alturas e geometrias. Nesta mesma figura, apresenta-se a ilustração de duas superfícies em contacto, com diferentes tipos de contacto, sem deformação (b) ou com deformação (c).

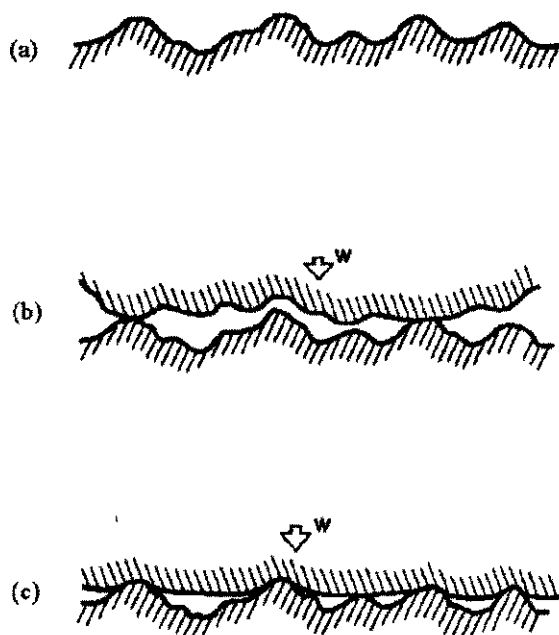


Figura 3.1 - *Natureza das superfícies e suas interações durante o contato* [1].

Quando uma superfície como a indicada na Figura 3.1 (a) é colocada em contato com outra sob a ação de uma carga aplicada W o contato físico entre as asperidades de cada superfície é estabelecido. Se A_i representa a área de um ponto de contato particular em uma posição i , e p_i é a pressão local produzida pelo contato, então:

$$W = \sum_{i=1}^M A_i p_i \quad W = \sum_{i=1}^M A_i p_i \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Quando o contato inicial é estabelecido entre duas superfícies, a somatória das áreas de contato inicial é muito pequena para suportar e transmitir a carga W com pressões finitas. Esta carga poderá então ser distribuída em regiões onde a interação é do tipo elástica (produzindo uma pressão média p^*) e regiões onde a interação não é elástica. Nestas condições, pode-se modificar a expressão anterior para:

$$W = p^* \sum_{i=1}^{M_1} A_i + \sum_{j=M_1}^{M_2} A_j p_j \quad (\text{Eq. 3.2})$$

A ocorrência das deformações nos picos das asperidades aumenta os valores das áreas de contato individuais (ver Figura 3.1 (c)) e a área de contato total A_t ajusta-se igualando à carga aplicada W de acordo com a equação (3.2).

Com o aumento de W , há um aumento proporcional em A_t . Ao mesmo tempo, o número de asperidades em contato M_1 e M_2 aumentam, e tem-se mostrado que a área de contato médio (A_t / M_t) permanece virtualmente constante [2].

3.3 - MECANISMO BÁSICO DO ATRITO

Dois fatores principais contribuem na produção do atrito entre superfícies em movimento relativo e sem lubrificantes. O fator usualmente o mais importante é a adesão

que ocorre nas regiões reais de contato, e o outro fator está relacionado com as deformações. Assumindo que não há interação entre estes dois fatores, pode-se escrever [4]:

$$F = F_{adesão} + F_{deformação} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

onde F é a força de atrito total. Dividindo pela carga W , a equação correspondente pode ser descrita em termos de coeficiente de atrito:

$$f = f_A + f_D \quad (\text{Eq. 3.4})$$

onde os sufixos A e D denotam os termos adesão e deformação.

Por meio de condições experimentais especiais é possível separar os termos adesão e deformação. Por exemplo, escolhendo-se superfícies opticamente planas, a característica rugosa torna-se bem menor, de forma que o coeficiente de deformação pode ser considerado desprezível. Assim, a força de atrito total torna-se predominantemente devida ao termo de adesão. Alternativamente, o uso de um lubrificante entre as superfícies rugosas em movimento relativo, virtualmente elimina o termo de adesão e a força de atrito medida pode ser atribuída somente à componente de deformação. No caso normal de escorregamento seco entre superfícies rugosas, a componente devida ao atrito adesional é de pelo menos duas vezes maior que a componente devida à deformação [2].

A natureza da adesão é geralmente atribuída à produção e quebra de junções a nível molecular, mas isto ainda é muito discutível. No caso de metais, a formação de junções e suas subseqüentes rupturas durante o escorregamento relativo ocorrem a nível macroscópico, mas estes processos podem ser julgados fundamentalmente como indicadores do efeito e não como causa da adesão.

3.4 - LEIS CLÁSSICAS DO ATRITO

As leis clássicas do atrito desenvolvidas a partir dos trabalhos de da Vinci, Amontons e Coulomb [1] podem ser sumarizadas nos seguintes postulados:

- 1) A força de atrito é proporcional à carga.
- 2) O coeficiente de atrito é independente da área aparente de contato.
- 3) O coeficiente de atrito estático é maior que o coeficiente de atrito dinâmico.
- 4) O coeficiente de atrito é independente da velocidade de escorregamento.

As leis clássicas têm sobrevivido por anos sem correções significativas, sendo assumidas muitas vezes como possuindo validade geral. Não obstante, na luz de avanços mais recentes, muitas delas têm se mostrado incorretas. Ao mesmo tempo, considerando as ferramentas disponíveis aos pesquisadores em tais épocas anteriores, as leis clássicas refletem notável introspecção em relação ao mecanismo de atrito seco, tendo servido como diretrizes de futuros trabalhos na direção de resultados mais precisos.

As principais limitações destas leis são as seguintes. A primeira lei é correta, exceto para altas pressões quando a área de contato efetiva aproxima-se do valor da área aparente. A segunda lei é válida somente para certos materiais (como os metais) não aparecendo em materiais elásticos e viscoelásticos (como a borracha). A terceira lei não é obedecida por nenhum material viscoelástico, existindo uma controvérsia de que os materiais viscoelásticos sequer possuem coeficiente de atrito estático [1]. A quarta lei não é válida para qualquer material, e hoje está bem estabelecido que o atrito em elastômeros exibem propriedades viscoelásticas distintas.

3.5 - TEORIA DO ATRITO GERAL

Algumas das teorias de atrito geral têm sido propostas para explicar a natureza do atrito seco, conforme descrevemos a seguir:

- **União mecânica**

Amontons e de La Hire (1699) [2] propuseram que o atrito pode ser atribuído à união mecânica dos elementos ásperos da superfícies. Este mecanismo fornece uma explicação para a existência do coeficiente de atrito estático e também explica o atrito

dinâmico como a força necessária para elevar as asperidades da superfície superior acima das presentes na superfície inferior.

- Atração molecular

Tomlinson (1929) e Hardy (1936) [2] atribuíram a força de atrito à dissipação, quando os átomos de um material são “arrancados” do espaço atrativo de sua contraparte na estrutura da superfície. Trabalhos posteriores atribuíram o atrito adesional ao processo de ruptura das ligações cinético-moleculares no qual a energia é dissipada devido a quebra de ligações, ao ciclo de relaxação e aos esforços das moléculas das superfícies em contato.

- Forças eletrostáticas

É o fenômeno que ocorre em superfícies metálicas onde o atrito que pode ser explicado pelo fluxo de elétrons que produz grupos de cargas de polaridades opostas na região de interface. Estas cargas são responsáveis pela retenção da superfícies por atração eletrostática.

- Solda, quebra e ranhura

A teoria proposta por Bowden (1950) [2] é bem aceita no atrito entre metais. Altas pressões desenvolvidas nos pontos de contato individuais causam uma solda local, formando junções que são subsequenteiramente quebradas pelo escorregamento relativo das superfícies. A deformação do material é devido às ranhuras através das asperidades da superfície.

As leis clássicas do atrito foram formuladas como resultado de experiências realizadas durante décadas, e as teorias descritas acima devem ser revistas na tentativa de explicar teoricamente a natureza das características de atrito observadas para uma gama de condições operacionais bastante diferentes. Com o surgimento de métodos de medidas e de controle mais precisos sobre os ensaios, serão bem-vindas novas teorias mais adequadas para o entendimento dos fenômenos de atrito.

3.6 - DESGASTE E ABRASÃO

O desgaste e abrasão são fenômenos complexos que dependem das combinações entre processos, incluindo mecanismos mecânicos, mecânico-químicos e termoquímicos.

Cada vez mais tem sido dada atenção às questões relativas ao desgaste, como ele pode ser medido, quais os fatores que afetam sua intensidade e como ele pode ser minimizado ou controlado [4].

Grandes desafios são encontrados em projetos onde há um compromisso entre fatores conflitantes como máxima adesão com mínimo desgaste, uma vez que é lógico assumir que estes fatores ocorrem simultaneamente.

Três mecanismos de desgaste distintos podem ser identificados no escorregamento relativo entre corpos rígidos, sendo que eles dependem da rugosidade das superfícies:

- Desgaste abrasivo

Para superfícies com textura bastante áspera pode-se considerar que a causa do desgaste por abrasão é devida à concentração de tensão mecânica local produzida pelo atrito adesional e pela união mecânica entre os picos das asperidades, ou pela união das trilhas formadas pelos desgastes anteriores. As características desta forma de desgaste são cortes ou micro-cortes e riscos nas superfícies dos corpos em atrito.

- Desgaste por fadiga

Ocorrem quando as asperidades na interface de atrito dos corpos em deslocamento relativo possuem perfis arredondados, gerando falhas devido a um mecanismo de fadiga. Este mecanismo consiste de uma sequência de compressões, expansões e tensões mecânicas devido aos processos de interação entre os corpos, em suas camadas internas. Sua ocorrência se processa de uma forma relativamente branda, tornando-se significantes quando os ciclos de tensões mecânicas estão presentes durante um longo período de tempo e quando fenômeno de adesão é relativamente pequeno. Este tipo de desgaste pode ser classificado como um efeito do corpo dos materiais sujeitos ao atrito.

- Desgaste devido ao pré-tensionamento

Este tipo de fenômeno ocorre quando existe um coeficiente de atrito alto entre um corpo relativamente macio submetido a uma pré-deformação e outro possuindo uma superfície abrasiva. Este tipo de desgaste ocorre quando as camadas das superfícies do material macio citado encontram-se em um estado de máxima tensão, sendo que cortes

ou quebras podem aparecer perpendiculares à direção do deslizamento efetuado. É claro que as direções dos cortes ou quebras dependem de um conjunto complexo de condições de tensões locais, ou ainda de heterogeneidades moleculares presentes na estrutura do corpo. Além do crescimento destes cortes poder resultar na separação de partículas da superfície do corpo, poderá ocorrer também um desgaste gradual na zona de contato destes cortes devido aos seus movimentos relativos, mesmo não ocorrendo um completo escorregamento entre os corpos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - J. A. Schey, "Tribology in Metalworking", American Society for Metals, (1983).
- [2] - A. I. Svikidenok, N. K. Myshkin, T. F. Kalmykova, O. V. Kholodilov, "Acoustic and Electrical Methods in Triboengineering", Allerton Press, N. York, (1988).
- [3] - N. K. Myshkin, S. A. Chizhik, V. V. Gorbunov, "Nanoscale topography and tribological problems", Tribology International 28 (1995) 43.
- [4] - D. Tabor, "Tribology - the last 25 years", 28 (1995) 10.

CAPÍTULO IV

ESTUDO EXPERIMENTAL DOS PARES DE ATRITO

4.1 - INTRODUÇÃO

Para o estudo do desgaste causado pelo deslizamento impulsionado pelas vibrações mecânicas na frequência ultra-sônica foi utilizado como tribomedidor um motor ultra-sônico do tipo pino-sobre-chapa cujos princípios de funcionamento foram descritos no Capítulo I. Motores como estes, de impacto oblíquo e com frequência ultra-sônica, produzem movimentos baseados na soma das componentes tangenciais das forças de impacto dos pulsos. A componente tangencial da força de impacto dos pulsos é proporcional à componente normal do pulso, sendo que o coeficiente de proporcionalidade é igual ao coeficiente de atrito. A vibração em duas coordenadas na zona de contato pode ser realizada de diversas maneiras, sendo que neste trabalho foram utilizados vibradores bi-modais.

Na Figura 4.1 é mostrado o diagrama esquemático do vibrador utilizado, constituído de uma cerâmica piezoelétrica de modo acoplado e com reversão de movimento, conforme também detalhado no Capítulo II.

Os modos de vibração de ressonância longitudinal L_1 e de flexão B_2 são acoplados por assimetria da vibração piezoelétrica, realizada por meio da conexão cruzada das alimentações dos eletrodos 1-4 e 2-3.

O sentido de deslocamento pode ser invertido pelo chaveamento dos pares de eletrodos com conexão cruzada. Isso muda a fase do modo de flexão e tem como resultado a alteração da direção do movimento elíptico nos pontos nodais da superfície do vibrador piezoelétrico. Foi aplicada a frequência de ressonância na faixa de 20 a 36,2 kHz sobre o motor ultra-sônico. Foram utilizados pinos de alumina com dimensões $4 \times 4 \text{ mm}^2$ por 2 mm

de espessura, cortados por serra de diamante e fixados por colagem sobre o piezovibrador. A força de carga P aplicada entre o pino (de alumina ou de diamante CVD) e o slider (deslizador ou linor) de aço foi de 20 N.

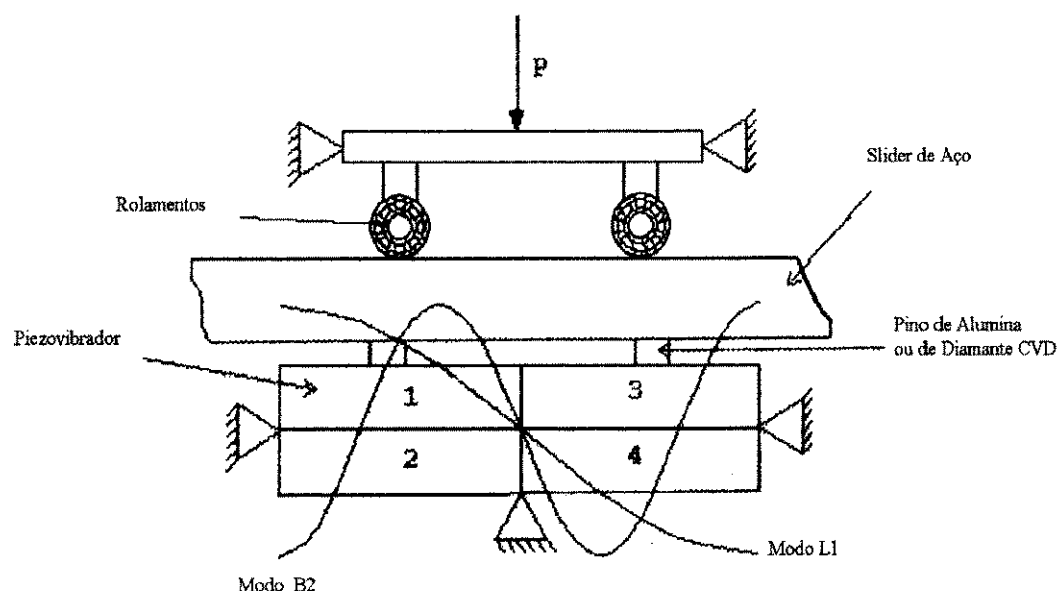


Figura 4.1 - Diagrama esquemático do motor ultra-sônico, com vibrador piezoelétrico de modos acoplados para reversão de movimento, utilizado como tribo-testador.

Todos os testes de desgaste foram realizados em laboratório a pressão normal, temperatura de 28°C e umidade relativa de 70%.

As experiências da microtopografia e da trilha de desgaste da superfície foram realizadas por Microscopia de Varredura de Elétrons e Microscopia de Força Atômica. A transferência de materiais de uma superfície a outra do par em atrito foram medidas pela microanálise de MEV (raios-X K_{α} característicos dos elementos).

4.2 - MATERIAIS

Os materiais utilizados neste estudo foram selecionados em função de suas características tribológicas, como maior resistência ao desgaste, coeficiente de atrito e superfícies de pouca rugosidade. Esta seleção visou atender a forte dependência dos motores ultra-sônicos em relação às características tribológicas dos materiais empregados no acoplamento piezo-estator-rotor (ou deslizador) quando analisados sob torque e velocidade de operação.

Três tipos de materiais foram escolhidos: a cerâmica de alumina, o diamante CVD e o aço inox (0,45% C).

A cerâmica de alumina (corundum) utilizada nos ensaios era composta por cristais de Al_2O_3 (95,1%) e SiO_2 , BaO , CrO_2 , MnO , e outros óxidos, com densidade de $3,85 \text{ g/cm}^3$ e com dureza Vickers de 1230 HV50. O estudo da rugosidade de superfície da peça revelou valores médios e máximos, medidos por MFA, de $R_a = 195 \text{ nm}$ e $R_{\text{max}} = 1690 \text{ nm}$, respectivamente. Neste trabalho, a rugosidade média R_a e a rugosidade média R_{max} foram obtidas em função das alturas relativas máximas das asperidades em áreas típicas da superfície amostradas com dimensões de $15 \times 15 \text{ }\mu\text{m}$.

A síntese de diamantes por CVD a baixa pressão possibilita a deposição de filmes de diamante sobre vários materiais, além do crescimento de filmes de diamante auto-sustentados. Este processo tem viabilizado aplicações antes restritas devido a escassez dos diamantes naturais e ao alto custo dos processos de síntese de diamantes a altas pressões [1, 2].

A morfologia dos diamantes CVD é policristalina e estruturada tipicamente em grãos com superfícies facetadas, correspondendo as orientações cristalinas $\langle 111 \rangle$ ou $\langle 100 \rangle$ [1, 2]. A estrutura da superfície granular possui uma forte dependência dos parâmetros utilizados na técnica de CVD e das condições de crescimento, as quais são usualmente otimizadas para alta taxa de crescimento e alta qualidade do filme de diamante, definida pela obtenção predominantemente de ligações $\text{sp}^3 \text{ C-C}$.

Os filmes de diamante foram sintetizados utilizando um reator de CVD de filamento quente, descrito na literatura [2, 3]. O método consiste na passagem de uma mistura de gases portadores de carbono como CF_4/CH_4 , cada uma com 2,0 vol % diluídos em hidrogênio gasoso a uma pressão de 40 Torr e um fluxo total de $75 \text{ cm}^3/\text{min}$. As deposições foram realizadas em substratos de silício <100> ou de molibdênio, sob uma temperatura de aproximadamente 1093 K. As espessuras dos filmes obtidos situam-se em torno de $100 \mu\text{m}$, e tipicamente com rugosidade média $R_a = 3,0 \mu\text{m}$ e o tamanho lateral dos grãos situa-se na faixa de 5 a $15 \mu\text{m}$. A Figura 4.2 (a) mostra a imagem de MEV do filme de diamante CVD e a Figura 4.2 (b) mostra a micrografia de MFA da cerâmica de alumina, ambas antes do desgaste.

O aço-carbono 0,45 wt % foi endurecido por austempera, resfriado com óleo. Os resultados de medição de dureza apresentaram uma dureza Vickers de 540 HV 30. A rugosidade da superfície foi medida por microscopia de força atômica, apresentando valores médios de $R_a = 15 \text{ nm}$ e rugosidade máxima de $R_{\text{max}} = 145 \text{ nm}$.



Figura 4.2 (a) - Imagem do filme de diamante CVD por MEV, antes de submetê-lo ao atrito ($\times 5000$).

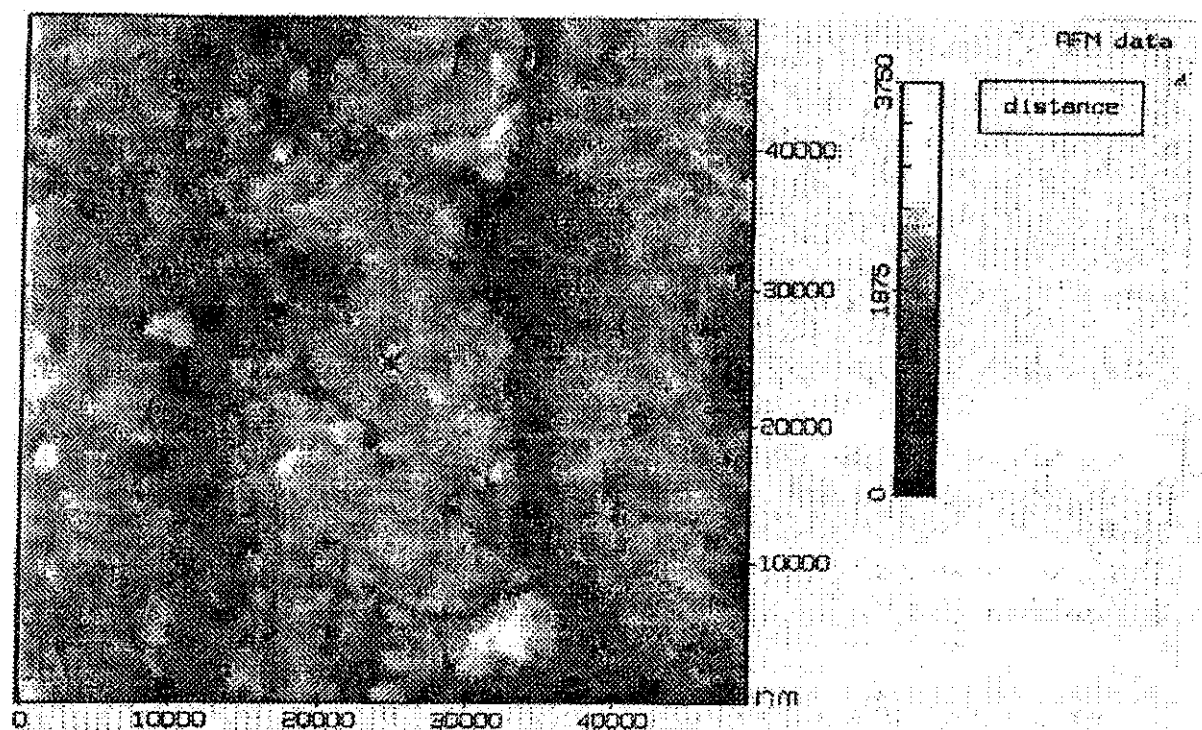


Figura 4.2 (b) - Imagem da cerâmica de alumina por MFA antes de ser submetida ao atrito.

4.3 - TOPOGRAFIA E ATRITO DE SUPERFÍCIE

Foram realizados os seguintes testes com o objetivo de uma maior compreensão do processo de interação dos elementos acionadores dos motores ultra-sônicos:

1. Deslizamento forçado do slider em contato com o pino sem a aplicação de vibração ultra-sônica externa sobre os pares em atrito do aço com diamante CVD e aço com alumina.
2. Deslizamento dos pares em atrito de aço-alumina e aço-diamante CVD com a aplicação de vibração ultra-sônica externa para a produção do movimento de escorregamento.
3. Deslizamento do par diamante CVD-alumina com a aplicação de vibração ultra-sônica externa para a produção de movimento de escorregamento.

As imagens tridimensionais de MFA foram realizadas no modo altura constante, utilizando cantilevers em formato de “V” com ponta integrada e constante de força de 0,06 N/m. Os parâmetros típicos usados foram força de 0,1 nN e velocidade de varredura de 28,4

Hz. Esta técnica fornece excelente resolução vertical, sendo que o equipamento utilizado inclui software de processamento digital de imagens, cujas possibilidades de medições relevantes à este trabalho são: cálculo de parâmetros de rugosidade de superfície como rugosidade máxima R_{max} , rugosidade média R_a , perfis de rugosidade e histograma de rugosidade.

Deve ser tomado extremo cuidado para prevenir medições “artificiais” devido a fatores como: geometria do conjunto cantilever-ponta, forças excessivamente altas ou baixas e velocidades de varredura acima do tempo de resposta mecânica do cantilever. Convém ressaltar ainda que as imagens obtidas pela microscopia de força atômica resultam da convolução da densidade de estados eletrônicos totais entre a ponta de prova e a amostra [4].

4.4 - PAR AÇO-DIAMANTE CVD SEM VIBRAÇÃO ULTRA-SÔNICA

Procurou-se analisar o comportamento do par em atrito aço-diamante CVD sem a aplicação de vibração ultra-sônica para a obtenção de informações como coeficiente de atrito e seu processo de desgaste, as quais serviriam como base de comparação para os ensaios subseqüentes.

Os materiais analisados foram montados no triboanalisador de tal modo que a peça de aço ficava no slider e o diamante no estator piezoelétrico.

Os deslizamentos foram realizados sem a presença de lubrificantes, sendo que os testes apresentaram um coeficiente de atrito dinâmico de 0,8. Os deslizamentos foram limitados pelas dimensões da amostra em aproximadamente 1 cm de excursão.

A Figura 4.3 mostra a topografia do aço na região central da amostra, após o ensaio. A partir dela, observam-se as trilhas de desgaste após cinco reversões de deslizamento. A deformação plástica foi o principal mecanismo de dano observado na superfície do aço. Não foi detectada geração de vibrações na interface

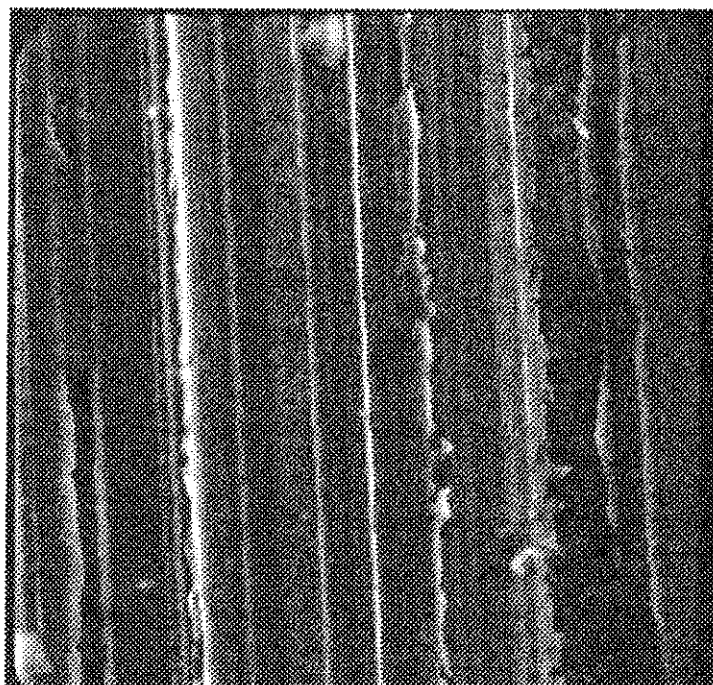


Figura 4.3 - *Imagem de MEV do desgaste do aço pelo diamante CVD sem a presença de vibração ultra-sônica externa (x2400).*

Os materiais analisados foram montados no triboanalisador de tal modo que a peça de aço ficava no slider e o diamante no estator piezoelétrico.

Os deslizamentos foram realizados sem a presença de lubrificantes, sendo que os testes apresentaram um coeficiente de atrito dinâmico de 0,8. Os deslizamentos foram limitados pelas dimensões da amostra em aproximadamente 1 cm de excursão.

A Figura 4.3 mostra a topografia do aço na região central da amostra, após o ensaio. A partir dela, observam-se as trilhas de desgaste após cinco reversões de deslizamento. A deformação plástica foi o principal mecanismo de dano observado na superfície do aço. Não foi detectada geração de vibrações na interface.

4.5 - PAR AÇO-DIAMANTE CVD E AÇO-CERÂMICA DE ALUMINA COM VIBRAÇÃO ULTRA-SÔNICA

Nesta etapa do trabalho, procurou-se analisar o comportamento dos pares em atrito aço-diamante CVD e aço-cerâmica de alumina na presença de vibração ultra-sônica.

Foram realizadas experiências no processo de desgaste através de análises micrográficas da superfície de pares em atrito, na presença de vibrações ultra-sônica com o objetivo de relacionar estes fenômenos às instabilidades dos motores ultra-sônicos.

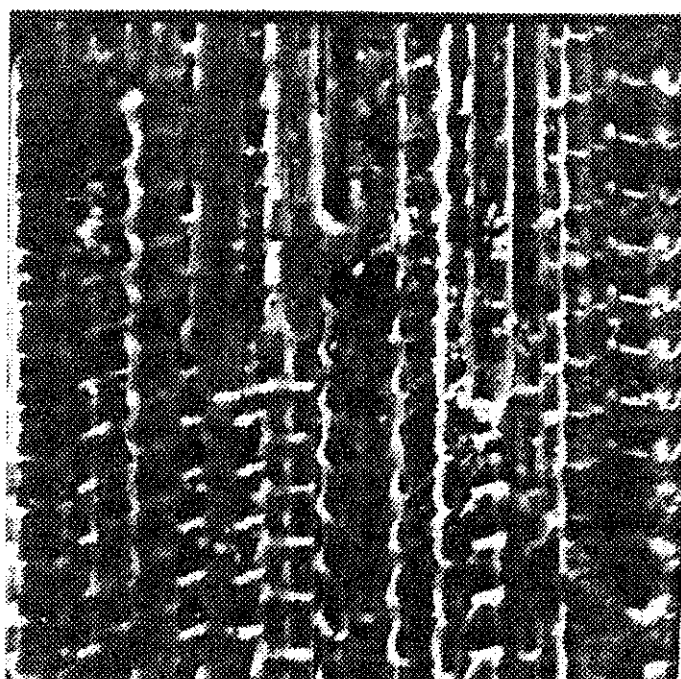
Os testes foram realizados aplicando-se uma frequência de oscilação sobre o piezoestator de 36,2 kHz. Uma vez que a velocidade de escorregamento do slider é diretamente proporcional a frequência aplicada ao vibrador piezoelétrico e ao coeficiente de atrito entre o slider e o piezoestator, obtém-se diferentes velocidades entre os testes de escorregamento dos pares cerâmica de alumina-aço e diamante CVD-aço. Para o par cerâmica de alumina-aço a velocidade de escorregamento apresentada foi de 0,12 m/s e de 0,07 m/s para o par diamante CVD-aço.

Imagens diferentes das obtidas na sequência de teste anterior, foram observadas ao se aplicar vibração externa para a produção de movimento de escorregamento. A Figura 4.4 (a) mostra uma imagem de MEV da superfície do aço com corrugações resultantes do deslizamento entre os pares diamante CVD-aço com vibração ultra-sônica, e a Figura 4.4 (b) apresenta o perfil de secção das corrugações medido por MFA no sentido longitudinal do deslocamento.

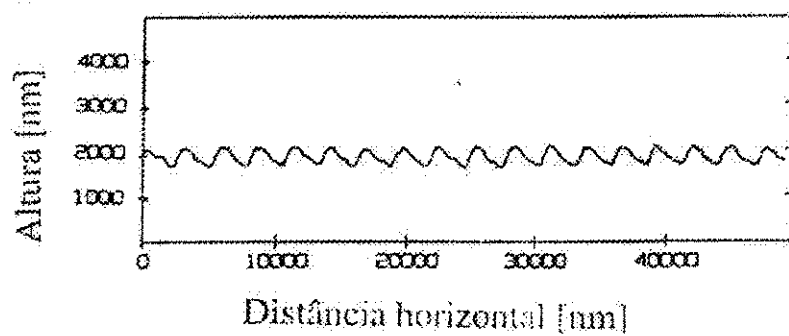
A Figura 4.5 (a) mostra uma imagem de MEV das corrugações produzidas na superfície do aço como resultado da interação do par cerâmica de alumina-aço na presença do ultra-som, e a Figura 4.5 (b), o perfil medidos por MFA das corrugações no sentido longitudinal.

As estruturas periódicas foram criadas mesmo após vários movimentos reversíveis, realizados por um acionador de movimento sem qualquer sistema de sincronismo. Pode-se notar que os movimentos elípticos da superfície do pino recoberto com filmes de diamante CVD ou por cerâmica de alumina provoca “indentações” nas superfícies do aço, resultando em um padrão periódico de desgaste.

Isso induz a pensar em um sistema auto-sincronizado e não-linear do processo de interação do par em atrito mecânico assistido por vibração ultra-sônica.

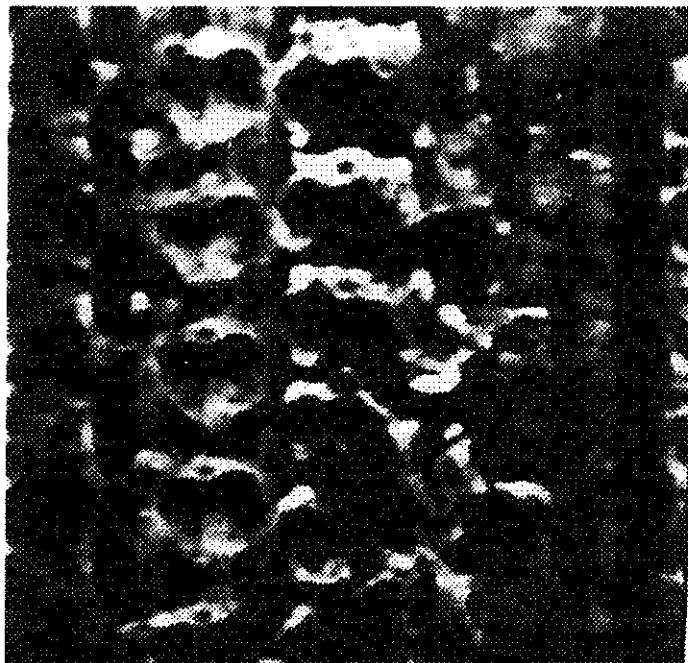


(a)

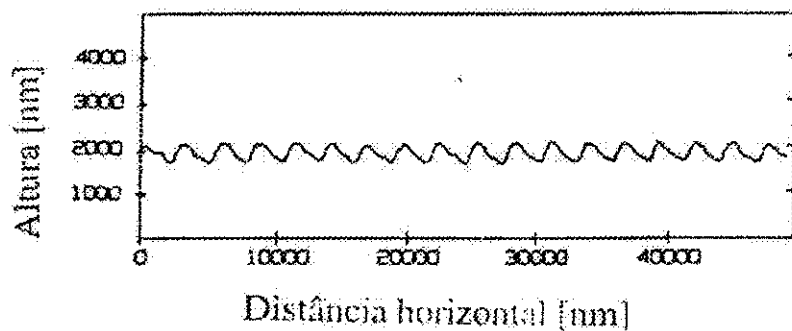


(b)

Figura 4.4 - (a) Imagem de MEV da superfície do aço após a interação do par em atrito diamante CVD-aço, na presença de vibração ultra-sônica externa (x2400) e **(b)** perfil das corrugações na superfície do aço medido por MFA.



(a)



(b)

Figura 4.5 - (a) Imagem de MEV da superfície do aço após a interação do par em atrito cerâmica de alumina-aço, na presença de vibração ultra-sônica externa (x4500) e (b) perfil das corrugações na superfície do aço medido por MFA.

É interessante notar nestas imagens da superfície do aço que o caminho deformado foi produzido pela frequência de vibração principal e pela quinta harmônica do vibrador piezoelétrico. As distâncias entre os “dentes” são de apenas dezenas de micron e o tamanho dos cristais na superfície do tribovibrador também são da ordem de micron.

A eficiência do motor ultra-sônico com o par em atrito aço-diamante CVD foi bastante baixa. Comparada com o par em atrito aço-alumina, o mesmo motor apresentou força de tração de $F = 7 \text{ N}$ para a alumina e somente $F = 0,02 \text{ N}$ para o diamante,. Este resultado era esperado uma vez que o diamante apresenta um coeficiente de atrito bem menor.

A natureza do atrito na presença de vibrações ultra-sônicas difere de forma significativa ao escorregamento regular relativo e atualmente não há um modelo para o atrito sob influência ultra-sônica.

Análises experimentais mostram que as vibrações reduzem o coeficiente de atrito aparente porém, a redução do atrito depende de diversas variáveis, as quais são insuficientes para formalizar uma lei que poderia ser usada para estimar a redução de atrito em condições generalizadas.

A diferença entre o atrito estático e dinâmico não é uma propriedade intrínseca da região de interface, mas uma consequência da natureza complexa do movimento de todo o sistema durante o escorregamento.

As deformações plásticas influenciam fortemente na formação de degraus e contribuem para a instabilidade nos deslocamentos dos motores ultra-sônicos. Estes dados são significativos nas aplicações dos motores ultra-sônicos quando utilizados como motores de passo.

As deformações periódicas na superfície do aço devido à interação ultra-sônica apresentaram períodos de 3750 nm para o par aço-alumina, e de 3000 nm para o par aço-diamante, ambas medidas por MFA.

O comprimento de onda do ultra-som com frequência de 36,2 kHz nos sólidos situa-se na faixa de alguns centímetros. Isso significa que não pode ocorrer ressonância local nas dimensões dos cristais. A razão para tal diferença na deformação periódica pode ser atribuída a efeitos não-lineares e condições de interfaceamento.

A imagem de MEV da superfície desgastada no ponto de reversão é mostrada na Figura 4.6. O principal efeito da influência do diamante CVD sobre o aço durante o teste foi a deformação plástica, sendo que fragmentos do desgaste não foram observados neste caso.



Figura 4.6 - Imagem de MEV do slider de aço analisado na área de reversão de deslocamento. O par em atrito utilizado foi diamante CVD-aço (x1200).

Um resultado diferente foi observado na interface cerâmica de alumina-aço, conforme pode ser visto na Figura 4.7; neste caso foram detectados fragmentos fora da trilha de desgaste. Notou-se também a formação de óxidos em breve período de tempo, que surgiu durante o deslizamento. As investigações indicaram que os fragmentos do desgaste são compostos de óxido de material transferido da trilha de desgaste, principalmente o ferro. O mesmo processo de oxidação não foi observado no caso de deslizamento sem vibrações ultra-sônicas.

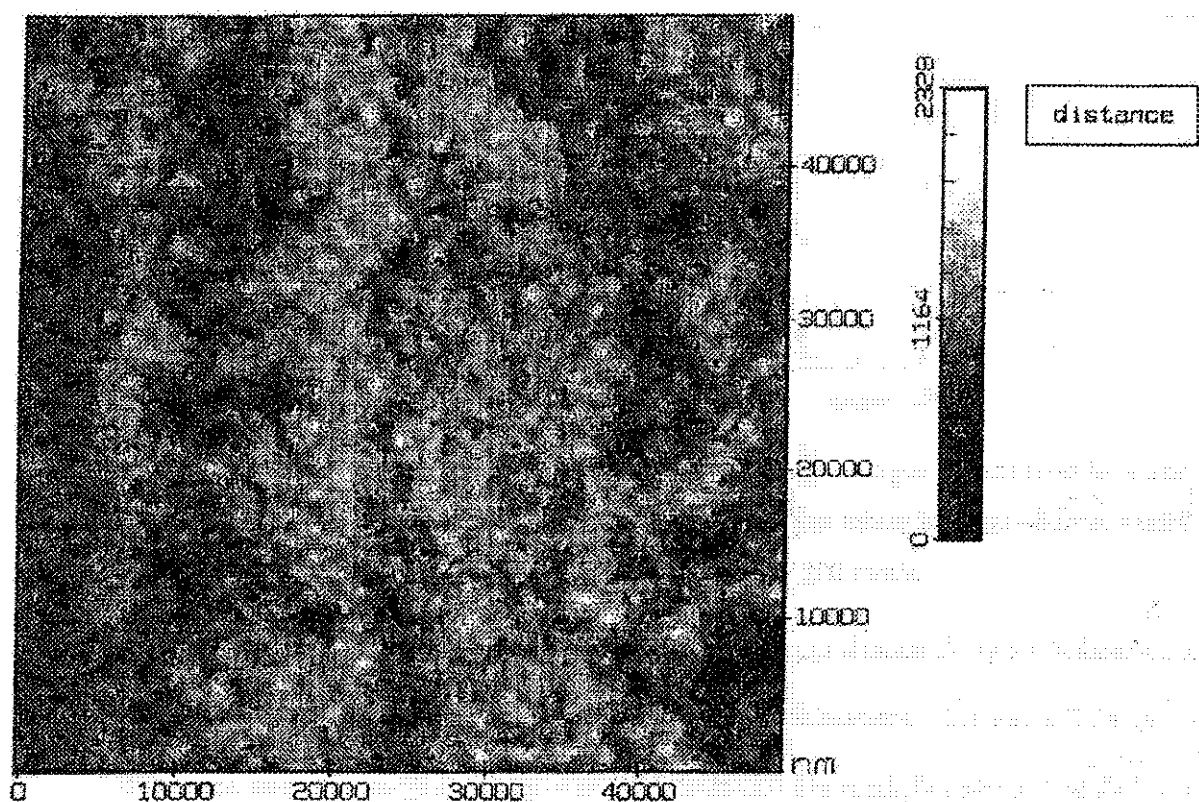


Figura 4.7 - Imagem de MFA dos fragmentos de desgaste do par cerâmica de alumina-aço, assistido por vibração ultra-sônica.

A adesão entre a superfície do metal e da cerâmica resultaram na transferência do material do aço para a cerâmica de alumina. A superfície da cerâmica foi recoberta por material de aço transferido do slider, e a rugosidade média da superfície da cerâmica diminuiu fortemente, como mostrado na Figura 4.7. Esta imagem mostra as partículas dos fragmentos do desgaste em alta concentração presentes na superfície da alumina, na forma de ruído nas imagens de MFA.

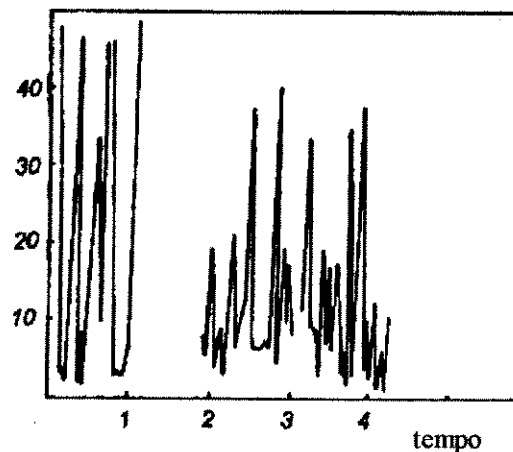


Figura 4.8 - *Concentração de partículas geradas na interface do par em atrito cerâmica de alumina-aço durante o deslizamento relativo produzido por vibrações ultra-sônicas a uma velocidade de escorregamento de 200 mm/s.*

As medições da concentração de partículas, por um sistema de fluxo laminar de ar limpo, geradas pelo tribotestador para velocidades de deslizamento: 0,1 m/s e 0,24 m/s, e diferentes forças de cargas na interfaces. Os resultados das medições são apresentados na Figura 4.8.

Com a aplicação de vibração ultra-sônica há conseqüentemente uma maior agitação atômica, elevando a temperatura local tanto no vibrador ultra-sônico como no slider, devido a transferência de energia. Este aumento de temperatura torna-se ainda maior quando utilizado o par cerâmica de alumina-aço; tal comportamento é entendido pois a cerâmica de alumina possui um coeficiente de atrito maior que o diamante CVD. Em ambos os casos, as deformações plásticas resultaram em pequenas pontas na superfície do aço.

O processo de oxidação na superfície do aço, mostrou-se mais acentuado ao utilizar o aço sobre cerâmica de alumina do que o aço sobre diamante CVD, na presença de vibração ultra-sônica. Tal fato pode ser atribuído às cerâmicas de Al_2O_3 , sob condições triboquímicas aliadas as sonoquímicas, na região de interface dos materiais, gerando oxigênio reativo [1].

4.6 - PAR DIAMANTE CVD-CERÂMICA DE ALUMINA COM VIBRAÇÃO ULTRA-SÔNICA

Os diamantes têm como características: extrema dureza, alta condutividade térmica e inércia química. Seu coeficiente de atrito entretanto é bastante reduzido.

As condições típicas de ensaio foram: frequência de excitação de 20 kHz, pressão normal de contato de 20 N, velocidades de deslocamento do slider entre 0.07 a 0.12 m/s , massa do vibrador de 50 g e umidade relativa do ar de aproximadamente 70%.

O tribomedidor utilizado nestes ensaios foi o mesmo dos testes anteriores, sendo que os pares em atrito utilizados nesta fase foram diamante CVD sobre cerâmica de alumina e diamante CVD sobre diamante CVD, ambos os casos na presença de vibração ultra-sônica.

Na Figura 4.9 temos uma imagem de MEV para um diamante CVD antes de ser submetido ao atrito ultra-sônico.

Os resultados obtidos demonstraram que, surpreendentemente, o diamante CVD rugoso tem desgaste rápido das estruturas verticais quando submetidos ao atrito na presença do ultra-som com o par de alumina ou com o próprio diamante CVD. Suas aplicações no motor ultra-sônico devem ser focalizadas em aplicações de posicionamento com a movimentação de pequenas cargas.

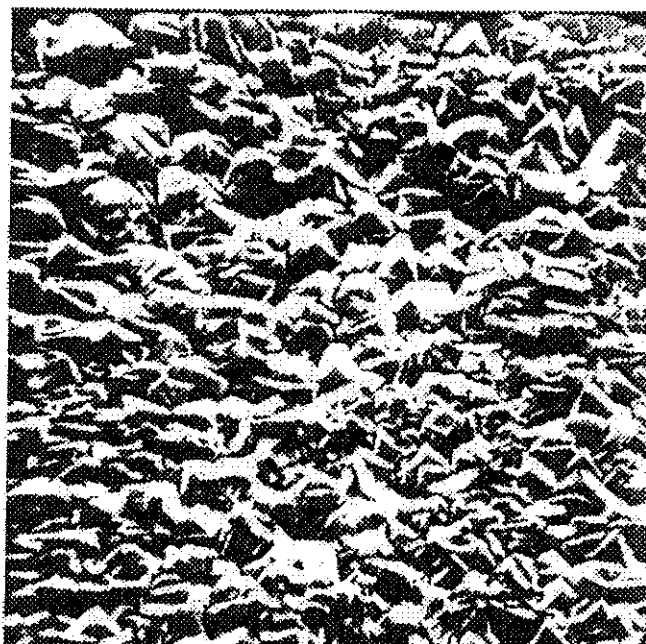


Figura 4.9 - *Imagem do filme de diamante CVD por MEV, antes de submetê-lo ao atrito (x1800).*

A partir desta reavaliação dos resultados, foi necessária uma compreensão dos fenômenos envolvidos neste processo, por tratar-se de um eficiente processo de polimento de filmes de diamante CVD.

4.7 - PROCESSO DE POLIMENTO DOS FILMES DE DIAMANTE CVD ASSISTIDO POR ULTRASOM

Os diamantes CVD, para várias aplicações necessitam de polimento superficial. Um processo mais eficiente de polimento dos filme de diamante CVD viabilizaria aplicações mecânicas como recobrimento de peças cujas superfícies necessitem de baixo coeficiente de atrito, por exemplo. Pesquisas de dispositivos eletrônicos baseadas em substratos de filmes de diamante CVD também seriam beneficiadas com a possibilidade de interfaces mais homogêneas.

Atualmente o polimento do filme de diamantes CVD está baseado nos métodos tradicionais de polimento de lâminas de silício, empregados em microeletrônica, e que são ainda bastante ineficientes para o diamante. Seria um grande avanço para aplicações industriais uma técnica simples e rápida que pudesse ser utilizada no acabamento de filmes de diamante CVD.

A seguir são apresentados os resultados dos testes de polimento realizados em filmes de diamante CVD assistidos por vibração ultra-sônica. Foram utilizados os pares diamante CVD sobre diamante CVD e cerâmica de alumina sobre diamante CVD. O tribotestador utilizado nos testes de polimento foi basicamente o mesmo utilizado nas análises anteriores.



Figura 4.10 - *Imagem de MEV do polimento de diamante sobre diamante após 10 s de polimento assistido por ultra-som (x6000).*

A Figura 4.10 mostra uma imagem de MEV com o resultado dos testes de diamante sobre diamante após 10 s de polimento. Note que, este pequeno intervalo de tempo é o suficiente para suavizar as asperidades dos picos dos cristais.

O efeito do polimento ultra-sônico na morfologia da superfície do diamante é mais evidente após 60 s, como mostrado na Figura 4.11. A rugosidade média R_a decaiu de 3 μm para aproximadamente 0,5 μm . A presença de fragmentos nesta imagem indica um mecanismo de fraturas das asperidades dos cristais no processo de polimento. Estes fragmentos podem ser removidos da superfície polida através de lavagem ultra-sônica numa mistura de etanol com acetona.

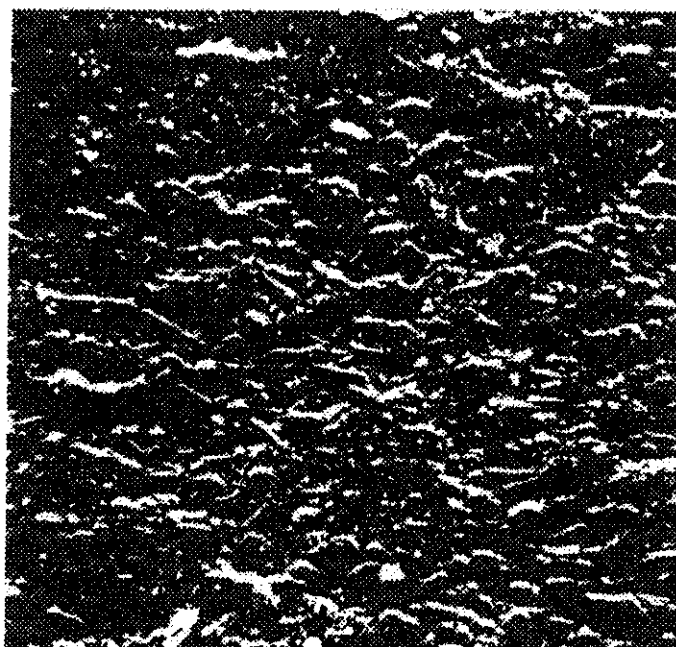


Figura 4.11 - *O mesmo filme mostrado na figura 4.10 após 60s de polimento assistido por ultra-som (x6000).*

Embora o modelamento das forças que atuam no polimento da superfície possa ser muito complexo, uma estimativa da máxima intensidade de forças de vibração F , pode ser obtida a partir da equação [1]:

$$F \geq mAw^2 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde: m é a massa do vibrador, A é a máxima amplitude e w é a frequência de vibração. A desigualdade é devida à queda das forças presentes na interação do par em atrito, tendendo igualar-se no limite de oscilações livres do oscilador.

Substituindo na equação 4.1 uma amplitude de vibração de polimento com intervalo entre 2 a 5 μm , uma frequência de 20 kHz e um intervalo de tempo de 50 μs , a força de oscilação que a cerâmica piezoelétrica imprimiria sobre a interface de polimento estaria no intervalo $F \geq 40 - 100 \text{ N}$. A tensão mecânica induzida por esta força é responsável pelo mecanismo de polimento com alta taxa de desgaste. Por exemplo, um cristal de 1 μm de altura e 1 μm de base estaria sujeito a uma pressão tangencial maior ou igual ao intervalo de $0,4 \times 10^{14}$ a $1,0 \times 10^{14} \text{ N/m}^2$, resultando num valor acima do módulo de Young para monocristal de diamante que é de $10,5 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$.

Entretanto, vale a pena ressaltar que no polimento de alumina sobre diamante as tensões mecânicas na interface apresentaram valores superiores aos do diamante sobre diamante, que é aceitável uma vez que o par cerâmica de alumina sobre diamante CVD apresenta um maior coeficiente de atrito. Os resultados revelaram um grande número de fraturas na superfície do diamante CVD, predominantemente nas interfaces dos grãos. O que é uma clara evidência experimental de que as tensões mecânicas induzidas no polimento com alumina sobre diamante são maiores quando comparados ao par diamante sobre diamante.

Os resultados experimentais do polimento dos filmes de diamante por alumina, com frequência de 20 kHz, podem ser vistos nas Figuras 4.12-4.13. Nas Figuras 4.12 (a)-(c) são mostrados imagens tridimensionais da superfícies do filme de diamante CVD; antes do polimento Figura 4.12(a).

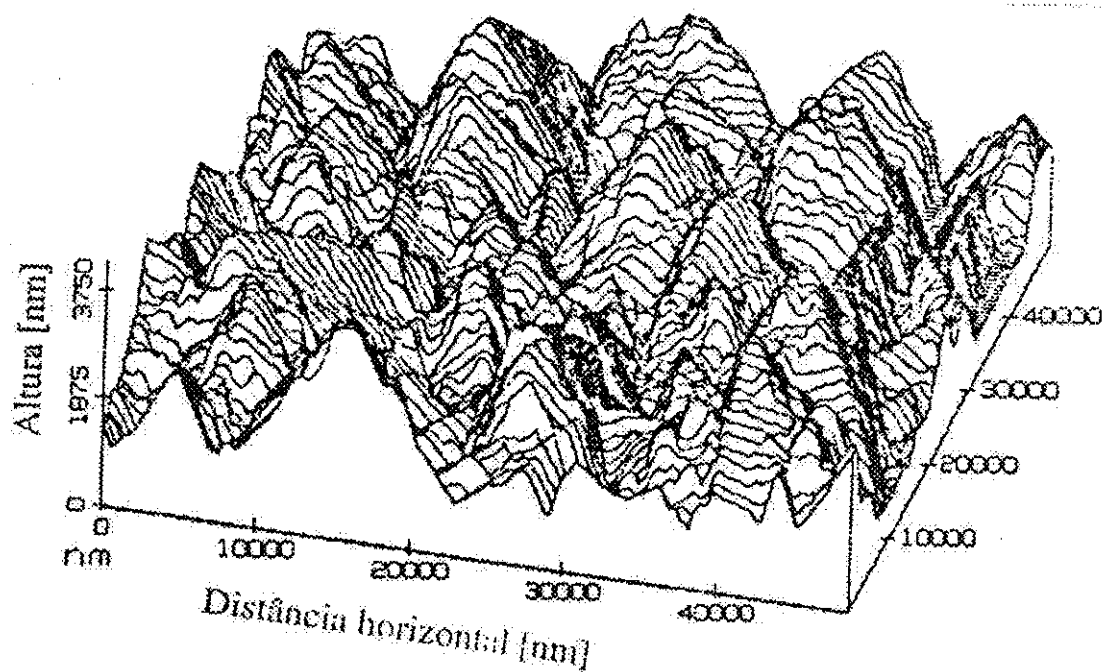


Figura 4.12(a) - *Imagem tridimensional por MFA do filme de diamante antes do polimento.*

Na figura 4.12(b), o mesmo filme após 30 s de polimento de alumina sobre diamante assistido por vibração ultra-sônica, e na figura 4.12(c), o filme após 60 s de polimento.

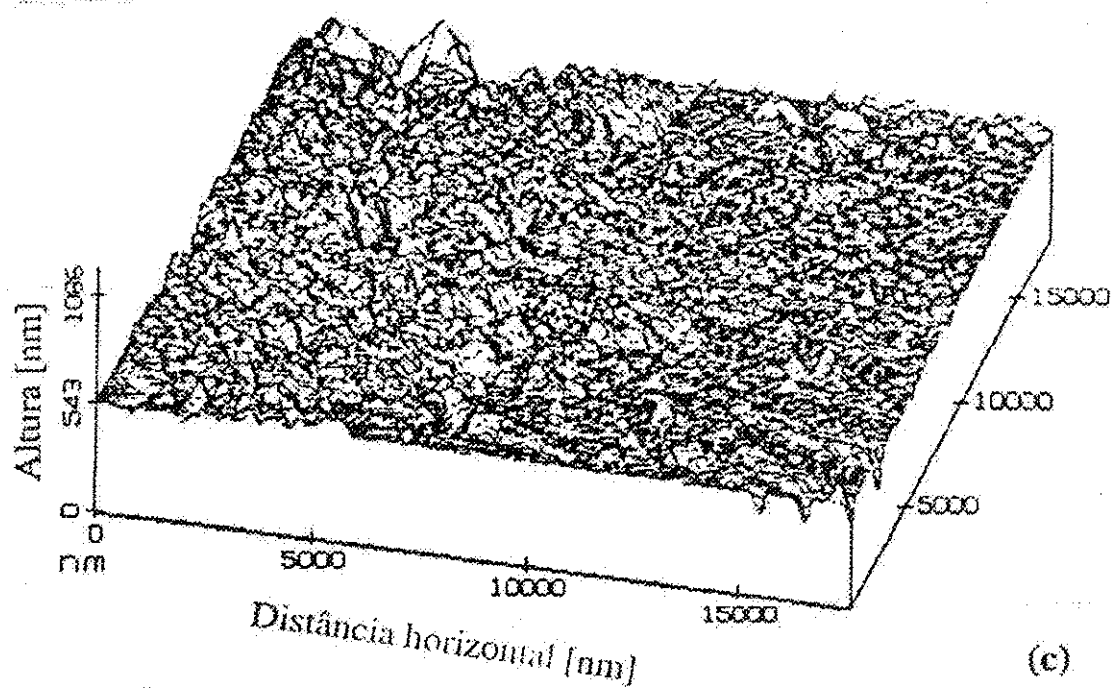
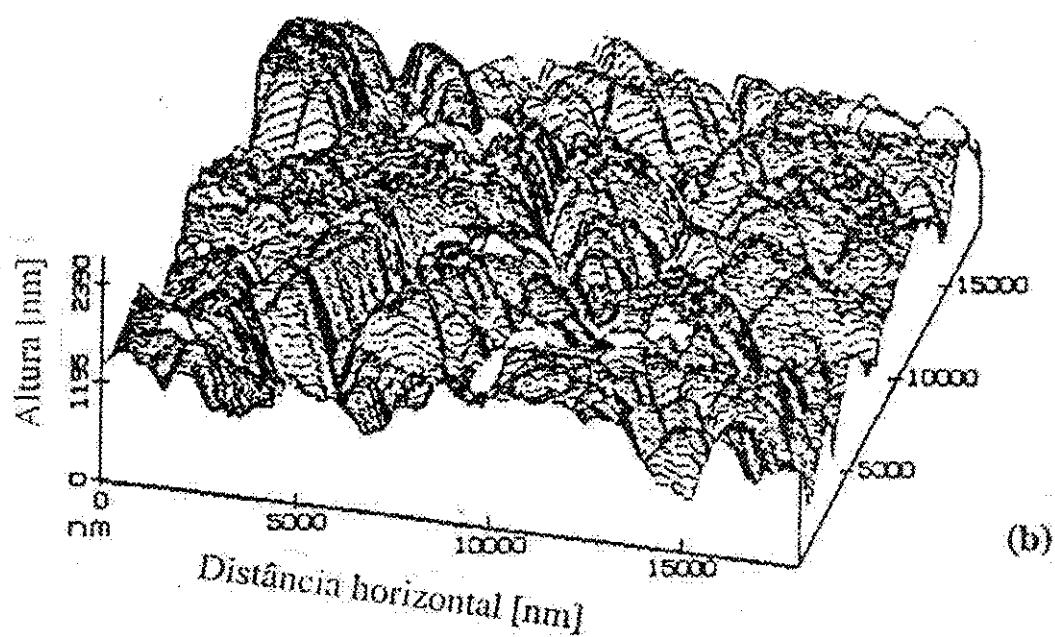


Figura 4.12 (b)-(c) - *Imagens tridimensionais por MFA do filme de diamante polido por cerâmica de alumina, assistido por vibração ultra-sônica, sendo que em (b) ilustra-se após 30 s de polimento e em (c) ilustra-se após 60 s de polimento.*

As Figuras 4.13(a)-(c) mostram a sequência das secções laterais correspondentes às Figuras 4.12(a)-(c). A rugosidade média do filme antes do polimento era $R_a = 1729$ nm [ver Figura 4.13(a)], decaindo para $R_a = 924$ nm após 30 s de polimento [ver Figura 4.13(b)], e após 60 s de polimento decai ainda mais resultando em rugosidades médias de $R_a = 43$ nm [ver Figura 4.13(c)]. Os testes foram realizados com os mesmos parâmetros empregados nos testes de diamante sobre diamante.

Para amostras de diamante, com a mesma rugosidade inicial R_a , não houve diferença apreciável entre as taxas de polimento ao se utilizar o par diamante sobre alumina ou diamante sobre diamante. Numa primeira avaliação trata-se de um resultado curioso, uma vez que a alumina é um material que cede à compressão mais facilmente que o diamante. Contudo, as evidências experimentais reiteram nossa sugestão de um mecanismo de fratura ultra-sônica no polimento das asperidades.

A Figura 4.14 mostra os espectros Raman. Na Figura 4.14(a) o filme de diamante antes do polimento, na Figura 4.14(b) o mesmo filme após 10 s de polimento ultra-sônico de diamante sobre diamante e na Figura 4.14(c) o filme após 60 s de polimento. O pico centrado em 1330 cm^{-1} corresponde a ligações sp^3 de C-C, e a completa ausência de picos na região ao redor dos 1580 cm^{-1} , que corresponde a ligações sp^2 de C-C, indicam que o filme de diamante CVD utilizado é de boa qualidade.

Note que o pico 1330 cm^{-1} está presente nos três espectros acima, sendo que o decaimento da intensidade é esperado, uma vez que este é diretamente proporcional à espessura do filme [5].

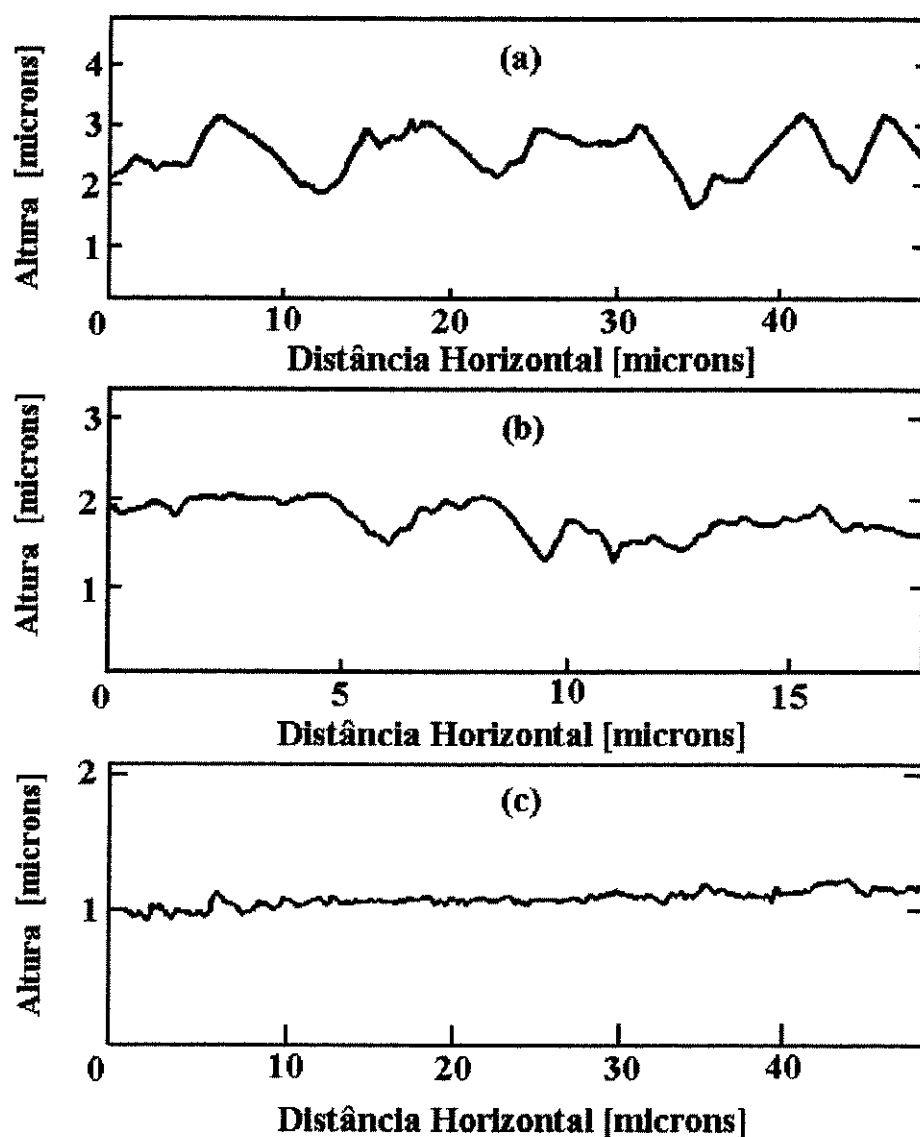


Figura 4.13 - Sequência de perfis de secção lateral dos passos de polimento de diamante sobre alumina. (a) Rugosidade inicial medida foi $R_a = 1729 \text{ nm}$, (b) após 30 s de polimento foi $R_a = 924 \text{ nm}$ e (c) após 60 s foi $R_a = 43 \text{ nm}$.

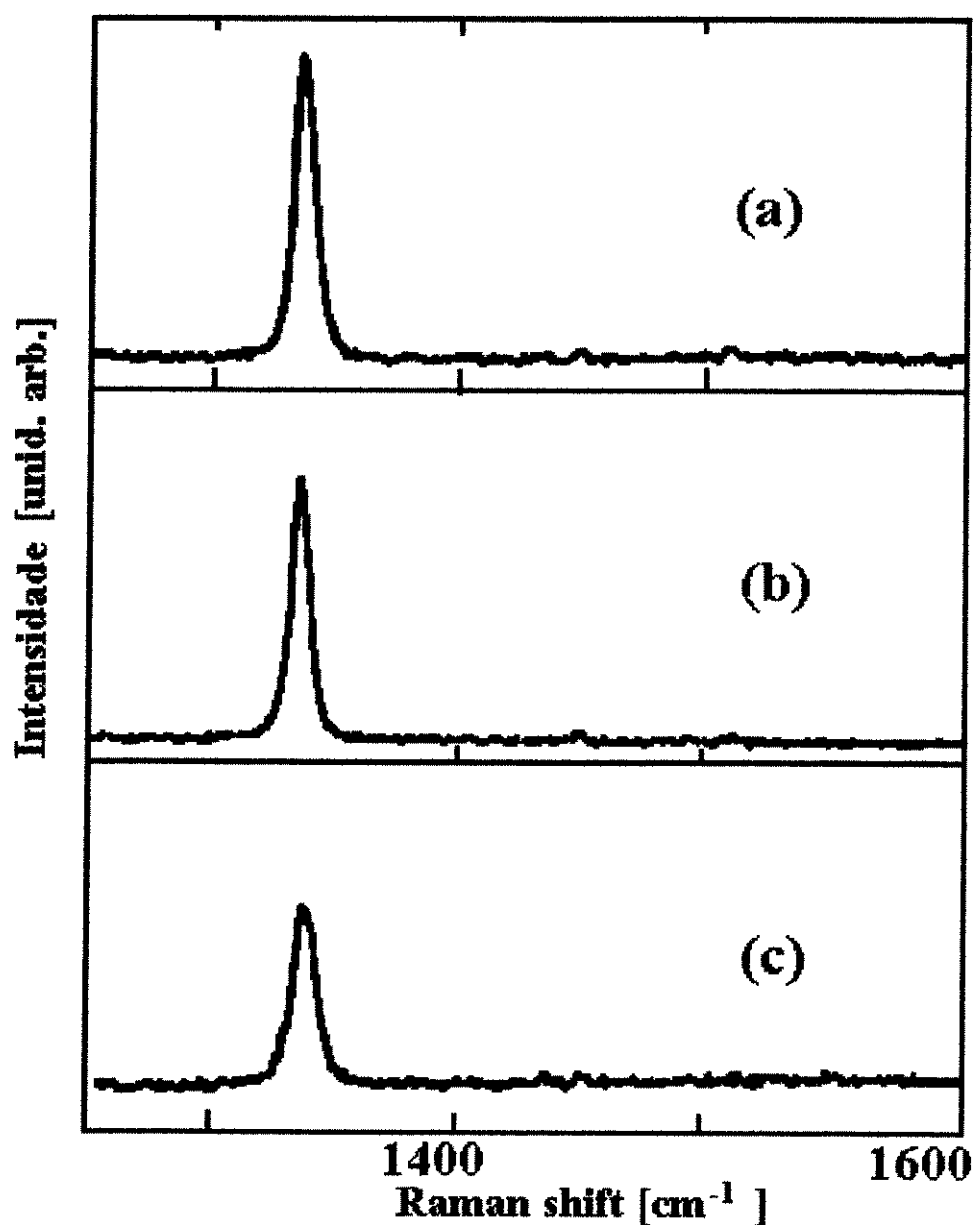


Figura 4.14 - *Espectro Raman do filme de diamante CVD polido por interação ultra-sônica de diamante sobre diamante. Em (a) antes do polimento, em (b) após 10 s de polimento e em (c) após 60 s de polimento.*

No entanto este espalhamento também pode ser resultado de contribuições de defeitos, tais como partículas de desgaste ou de contaminações devido a reações tribomecânicas.

Uma vez que o pico do carbono na fase grafite está em torno de 1580 cm^{-1} e a espectroscopia Raman é cerca de 50 vezes mais sensível para a fase grafite do que para a fase diamante [5], pode-se afirmar que o processo de polimento não produz grafitação da superfície.

Espectroscopia Raman realizada em filmes de diamante polidos pela interação ultra-sônica de alumina sobre diamante mostraram resultados qualitativos similares aos descritos acima.

A Figura 4.15 mostra a espectroscopia de raio-X obtida a partir da análise de microscopia eletrônica de varredura, que indica os picos característicos $K\alpha$ dos contaminantes na superfície de um filme de diamante após o teste de polimento de alumina sobre diamante. É possível notar que os elementos das cerâmicas são transferidos para a superfície do diamante. Esta contaminação mostra que o desgaste ultra-sônico do diamante pela alumina deve envolver possivelmente reações triboquímicas.

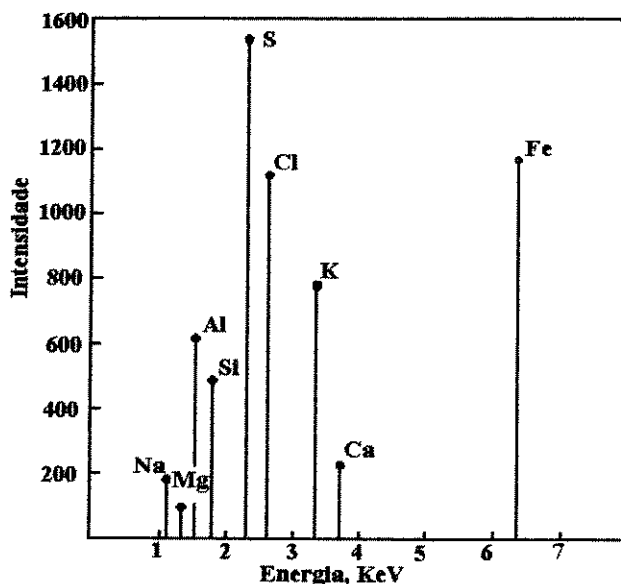


Figura 4.15 - *Espectro de raio-X da intensidade relativa da superfície de diamante polido por alumina.*

Uma das possíveis reações seria através da grafitização e subsequente oxidação da superfície devido ao aquecimento ultra-sônico da interface, efeito similar ao observado no corte de lâminas de diamante a laser com boa qualidade final [6], [7]. De qualquer modo, futuras investigações são necessárias para confirmar o processo de tribo-oxidação, uma vez que o oxigênio atômico não foi detectado na superfície da amostra polida devido a limitações inerentes ao equipamento de microscopia eletrônica utilizado. Outros produtos da oxidação são provavelmente gases como CO e CO₂, cujas identificações necessitam de outras técnicas de análise da interação.

Na Figura 4.16 é mostrado o gráfico do coeficiente de atrito estático como função do tempo de polimento para uma amostra de diamante CVD polida por diamante. Pode-se notar que o coeficiente de atrito de um filme de diamante CVD é bastante alto quando comparado a um monocristal de diamante, porém decresce rapidamente no decorrer do polimento assistido por vibração ultra-sônica. A correlação da rugosidade e o coeficiente estático também está representada na Figura 4.16. Note que na figura o coeficiente de atrito decresce de 0,53 para 0,12, assim como a rugosidade R_a , medida por MFA, foi reduzida de 2300 para 87 nm.

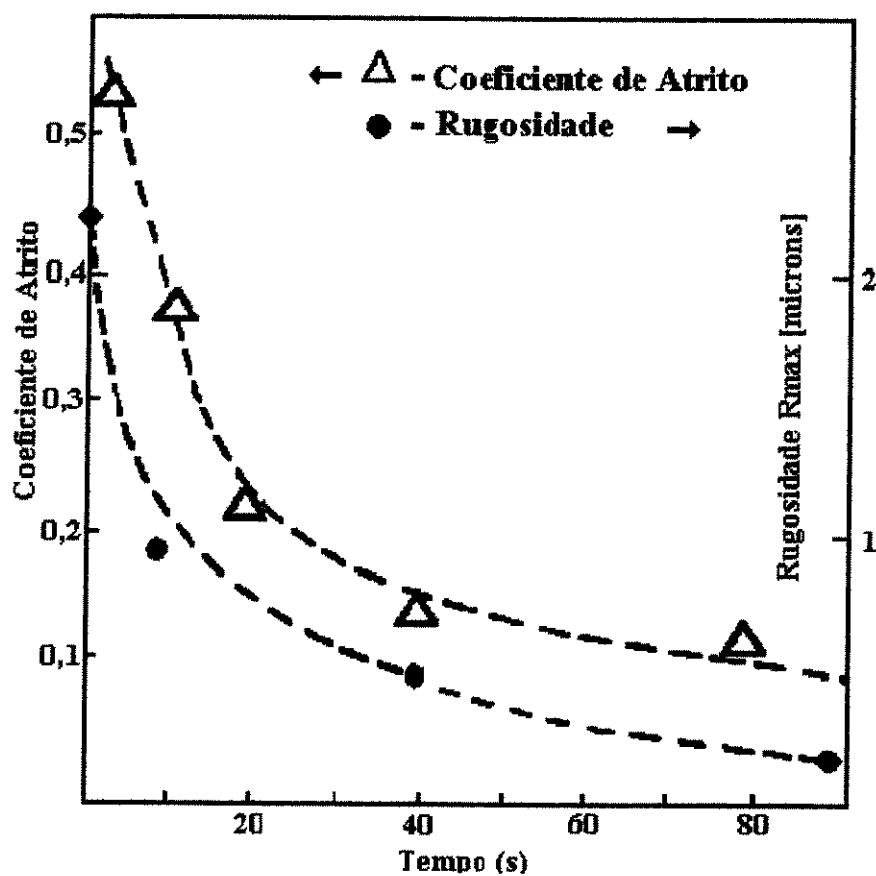


Figura 4.16 - Coeficiente do atrito estático e rugosidade em função do tempo de uma amostra de diamante CVD polida por diamante CVD, assistido por ultra-som.

Foi medido um coeficiente de atrito estático de $\mu=0,5$ entre uma amostra de diamante CVD não polido e uma amostra de aço. Após 60 s de polimento, o coeficiente de atrito estático entre o diamante e o aço decaiu para $\mu=0,2$.

Os resultados apresentados mostraram que este novo método de polimento de filmes de diamante CVD assistido por vibração ultra-sônica é eficiente e rápido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Baranauskas, M. Fukui, C. R. Rodrigues, N. Parizotto, V. J. Trava-Airoldi, "Direct observation of chemical vapor deposited diamond by atomic force microscopy", *Appl. Phys. Lett.*, **60**(13)(1992).
- [2] V. J. Trava-Airoldi, C. R. Rodrigues, M. Fukui, V. Baranauskas, "Characterization of diamond films deposited by hot filament CVD using CF₄ as doping gas by Raman spectroscopy, FTIR spectroscopy and atomic force microscopy, SPIE Proceedings - Diamond Optics V, **1759**(1992) pp. 87-96.
- [3] V. Snitka, V. J. Trava-Airoldi, V. Baranauskas, "The ultrasound effects on the tribological properties of synthesized diamond films", *J. Vac. Sci. Technol.*, **B13**(5)(1995), pp. 2124-2159.
- [4] V. Baranauskas, C. R. Rodrigues, M. Fukui, "Deformation in atomic force microscopy images caused by the interaction between the sample protusions and the cantilever", (em preparação)
- [5] D. A. Long, "Raman Spectroscopy", McGraw Hill Inc., (1977).
- [6] B. K. Gupta, A. Malshe, B. Bhusham, Vish V. Subramaniam, "Friction and Waer Properties of Chemomechanically Polished Diamond Films", *J. of Tribology* **116**(1994), pp. 445-453.
- [7] A. Grill, "Review of the tribology of diamond-like carbon", *Wear* **168**(1993), pp. 143-153.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a utilização de um motor ultra-sônico de deslocamento linear do tipo pino-sobre-chapa pudemos obter informações importantes sobre as propriedades tribológicas dos pares formados pelos seguintes materiais: aço/cerâmica de alumina, aço/diamante, cerâmica de alumina/diamante e diamante/diamante. Os resultados indicaram que o deslocamento forçado do slider sem aplicação da vibração ultra-sônica do par aço/diamante apresentou um coeficiente de atrito dinâmico de 0,8 e que o principal efeito foi a deformação plástica do aço e a sua deformação produzindo trilhas de desgaste. Com aplicação de vibração ultra-sônica (frequência = 36,2 kHz) observou-se por MFA o surgimento de estruturas periodicamente espaçadas ao longo da trilha do aço (“dentes”) sem que fosse necessário qualquer sincronismo da fonte excitadora, tanto para o caso da alumina quanto do diamante. O espaçamento entre os “dentes” corresponde a valores muito acima da frequência de excitação (5º harmônico). Estas estruturas podem ser utilizadas como elementos para a auto-sincronização do motor para funcionamento com um motor de passo, ou podem ser utilizadas como elemento de engate entre os pares para aumento da força de tração longitudinal. O par aço/alumina apresentou uma maior quantidade de partículas soltas, originadas do desgaste da alumina devido aos choques mecânicos de acionamento do cursor e também da oxidação do aço induzida pelas vibrações ultra-sônicas. Estes dois tipos de desgaste somente foram observados quando da aplicação das vibrações ultra-sônicas. O desgaste do aço é maior com a alumina do que com o diamante, indicando que a composição da alumina têm uma ação também no processo tribo-químico de oxidação do aço.

O par aço/alumina apresentou uma força de tração ($F = 7 \text{ N}$), bem maior do que o par aço/diamante ($F = 0.02 \text{ N}$), indicando que o par aço/diamante é muito menos eficiente para utilização no motor ultrasônico para o deslocamento (ou rotação) de cargas.

Os pares alumina/diamante e diamante/diamante também apresentaram desgaste induzido pelas vibrações ultra-sônicas. Em ambos os casos os pares sofreram um processo de polimento. Observa-se que o polimento do diamante é rápido, principalmente com o par alumina/diamante. Dois fatores influem neste processo. O primeiro é a composição química da alumina utilizada, a qual inclui óxidos de ferro. Estes óxidos, além do oxigênio presente na atmosfera podem oxidar o carbono de pontos da superfície onde a temperatura local seja elevada devido a dissipação das vibrações. O outro fator é a fragilidade do diamante em relação aos impactos mecânicos. Com as vibrações no sentido longitudinal, os grãos de maior altura vão sofrer a ação do impacto lateral e podem ser facilmente clivados. O aumento localizado de temperatura pode também induzir uma grafitização da superfície do diamante, provocando o seu desgaste.

Apesar da limitação dos pares de atrito nos motores ultra-sônicos, estes motores podem ser dimensionados convenientemente para aplicações de movimento de pequenas cargas com precisão. A observação do auto-sincronismo através das estruturas periódicas das trilhas pode levar ao desenvolvimento de motores muito mais confiáveis.

Esta área de pesquisa era praticamente inexistente no País e nossa esperança é que após esta tese possamos continuar este desenvolvimento, agregando outros pesquisadores e outras instituições de pesquisa, a fim de proporcionar para a indústria brasileira tecnologia para o desenvolvimento de motores ultra-sônicos especiais.