

NANOTECNOLOGIA E A FABRICAÇÃO DE ULTRAPRECISÃO UTILIZANDO FERRAMENTAS SÓLIDAS

Paulo André de Camargo Beltrão¹

Resumo. Nanotecnologia é a próxima grande tecnologia e provocará uma grande revolução na humanidade. Feynmann fez uma previsão que levou 30 anos para se tornar realidade. Apesar de a maior parte dos cientistas que trabalham neste campo estimarem que esta revolução ainda levará cerca de 20 anos para que ocorram as primeiras inovações tecnológicas importantes, certamente os seus impactos superarão os das revoluções provocadas pela mecânica e pela informática nos séculos passados. Na abordagem da tecnologia denominada nanotecnologia molecular, o objetivo será manipular os átomos individualmente, tornando possível registrar tudo o que a humanidade escreveu até o presente em um cubo de um décimo de milímetro de face. O objetivo final desta e das pesquisas atualmente em andamento é chegar ao controle preciso e individual dos átomos. Entusiastas dizem que através dela será possível estocar dados, criar energia ou reduzir a poluição. Por outro lado, existe uma abordagem tradicional, a de se utilizar as técnicas de fabricação de ultraprecisão e fabricar componentes e dispositivos com tolerâncias na região nanométrica. O presente artigo pretende trazer uma revisão geral sobre nanotecnologia e mostrar os últimos avanços na técnica de fabricação de ultraprecisão com ferramentas sólidas, notadamente a usinagem diamantada.

Palavras-Chave: Nanotecnologia, Nanotecnologia molecular, Usinagem de ultraprecisão, Usinagem no modo dúctil.

Abstract: Nanotechnology is the great next technology and it will nettle a great revolution in humanity. Feynmann made a forecast that took 30 years to become a reality. Most of the scientists that work in this field esteem that with this new technology it will take about 20 years to start to see the first important technological innovations, but certainly their impacts will overcome the mechanics and the computer science

¹ Doutor em Manufacturing Systems pela Cranfield University - Inglaterra. Professor do PPGEM e do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. e-mail: beltrao@cefetpr.br

revolution's that occurred during the last centuries. In the approach of the technology denominated molecular nanotechnology the objective will be to manipulate the atoms individually, making it possible to register everything that humanity has written until the present in a cube of a tenth of millimeter of face. The final objective of this and of the researches now under process, is to bring the necessary and individual control of the atoms. Enthusiasts say that through this technology it will be possible to stock data, to create energy or to reduce pollution. On the other hand, a traditional approach use the techniques of production with ultra-precision manufacturing to make components and devices with tolerances in the nanometric scale. The present article intends to bring a general revision on nanotechnology and to show the last progresses in the technique of ultraprecision production with solid tools especially with the diamond machining technology.

Keywords: nanotechnology, molecular nanotechnology, ultraprecision machining, machining in the ductile regime.

1. Introdução

Ainda não existe um termo único aceito como definição de Nanotecnologia. A revista Nanotecnologia (Nanotechnology Journal, 1990) que se apresenta exclusivamente como Ciência e Engenharia na escala nanométrica, define nanotecnologia como “o conjunto de todas as tecnologias associadas que permitem a fabricação sob duas abordagens: uma denominada de cima para baixo (top-down) de elementos miniaturizados esculpidos na forma desejada a partir de uma peça de material (Wills-Moren; Read, 1988), e uma chamada de baixo para cima (bottom-up) da construção da mesma estrutura átomo por átomo ou molécula a molécula, que é também chamada de nanotecnologia molecular” (Krummenacher, 1994).

Na Europa ou nos Estados Unidos o termo Nanotecnologia é freqüentemente usado para descrever a ciência dos fenômenos na escala atômica. Entretanto o termo nanociência é melhor usado para o trabalho cujo objetivo é a compreensão básica do fenômeno na escala atômica e o seu processamento. A comunidade da Engenharia de Fabricação por sua vez descreve o campo da nanotecnologia simplesmente como “o projeto e manufatura de dispositivos na faixa dos 0,1 aos 100 nanômetros (nm) ou adota a descrição de Taniguchi que diz que a nanotecnologia “integra sistemas tecnológicos de processamento de materiais, medição dimensional e controle posicional que alcançam precisões nanométricas, com resolução subnanométrica em processos de avanço e retorno controlados”(Taniguchi, 1996).

Talvez a definição mais largamente aceita seja a de que nanotecnologia é “o estudo, desenvolvimento e processamento de materiais, dispositivos e sistemas nos quais estruturas com dimensões menores do que 100 nanômetros são essenciais para obter a performance funcional requerida”. Esta definição muitas vezes é recomendada pois cobre o processo de fabricação nanométrico, o projeto, o modelamento e comportamento de estruturas nanométricas, os métodos de medição e a caracterização na escala nanométrica em particular nos seguintes casos:

- tecnologia de nanousinagem e nanofabricação;
- tecnologias de fabricação de dispositivos eletrônicos;
- microscópios de força atômica e de tunelamento (Binning; Quate; Gerber, 1986 e Strocio; Feenstra; Fein, 1989);
- materiais nanoestruturados;
- estruturas moleculares com auto-organização e automontagem;
- sistemas biológicos e biomédicos.

Desta forma fica claro que a nanotecnologia agrega aspectos da Engenharia, da Física, da Química e da Biologia. Isto inclui o processamento de materiais por remoção, transformação de superfícies, junção para identificação, manipulação e montagem de moléculas individuais, etc. Muitas técnicas de alta resolução tais como raios-X, feixe de elétrons ou microscopia de força atômica têm sido desenvolvidas para a pesquisa dos fenômenos físicos da matéria na escala subnanométrica ou atômica. Através destas técnicas físicas, análises e até mesmo a manipulação de estruturas nesta escala têm sido possíveis. Ao mesmo tempo, enquanto a Química vinha sendo tradicionalmente envolvida em pesquisa e síntese de pequenas moléculas, com a nanotecnologia a construção de maiores e mais complexas moléculas passa a ser de enorme interesse (Taniguchi, 1986). Isto permitiu que rapidamente as pesquisas levassem a Engenharia Biomédica a um estudo de natureza interdisciplinar na escala nanométrica com grandes avanços recentes. É principalmente nesta área que o termo nanociência é usado quando se refere ao trabalho que tenta entender o fenômeno na escala molecular e atômica estabelecendo que a base científica na escala nanométrica é atualmente alcançável e onde os produtos e processos nanotecnológicos são o objetivo final. A nanociência pode então ser compreendida como nanotecnologia na sua infância, e nas quais os produtos finais desta tecnologia ainda não foram encontrados.

Exemplos incluem a química molecular, a química de materiais nanoestruturados e a computação quântica de alta velocidade e baixo consumo de energia.

2. O que é um nanômetro

Em nanotecnologia, nanociência e nanometrologia precisa-se da capacidade de medir e controlar movimentos na faixa do nanômetro em termos de

deslocamento, tamanho e perfil. O termo Nano vem do grego nanos, que significa anão. Um nanômetro (1 nm) é igual a 10^{-9} metros (10^{-9} m) ou um (1) bilionésimo de um metro ou ainda aproximadamente 80.000 vezes menor que o diâmetro de um cabelo humano e 10 vezes o diâmetro do átomo de hidrogênio.

3. Processos Nanotecnológicos

Materiais processados numa resolução e controle nanométrico são aplicados tanto para medir, fabricar e controlar grandes componentes tais como espelhos de telescópios ópticos e de raios-X, quanto na fabricação de micro partes em pequenos dispositivos tais como circuitos integrados ou acelerômetros (Figura 1). Os processos de ultraprecisão ou de nanotecnologia top-down incluem:

- usinagem com ferramentas diamantadas ou CBN de geometria definida (torneamento) incluindo a usinagem no modo dúctil de vidros, cerâmicas, etc (Beltrão, 1998);
- usinagem com ferramentas diamantadas ou CBN de geometria não definida (retífica, brunimento e polimento) incluindo a usinagem no modo dúctil de materiais frágeis (Schroeter, 1997);
- processos de corrosão química como usinagem de gravação (por processos de litográficos, fotográficos e elétricos) como microacelerômetros fabricados com esta técnica e utilizados na indústria automobilística;
- processos biológicos.

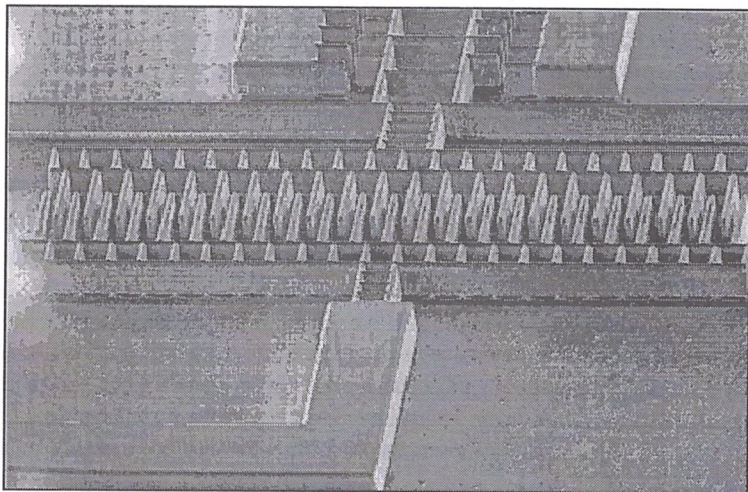


FIGURA 1. Microacelerômetro no qual "pentas" são deslocados, uns em relação aos outros, sob efeito de uma elevada aceleração. (Enciclopédia Universal, 2006)

4. Nanotecnologia, suas Origens e Histórico

4.1 Engenharia de Precisão

De certa forma, pode-se dizer que as técnicas de fabricação convencionais pouco mudaram desde os tempos pré-históricos. De fato, a fabricação de um objeto requer frequentemente a extração de matérias-primas, um processamento sobre esses materiais (ataque químico, arranque de material, aplicação de pressão), de junção ou montagem (por soldagem, por fixação) antes da obtenção final do objeto desejado, que pode ser, por exemplo, um carro ou um computador. No decorrer desse processo de fabricação, uma grande quantidade de energia é utilizada e muito refugo é gerado. Já a manufatura de alta precisão é um desenvolvimento que tem ganhado corpo nos últimos 200 anos e acelerado seu processo de desenvolvimento nos últimos 25 anos em termos de pesquisa, desenvolvimento e aplicação na inovação de produtos. Este desenvolvimento tem sido conduzido em função das maiores demandas para melhor performance dos produtos, altas confiabilidades, maiores vidas úteis e miniaturização de dispositivos. Este desenvolvimento é largamente conhecido como engenharia de precisão e hoje em dia é entendido como fabricação com tolerâncias melhores que 1 parte em 10^4 ou 1 parte em 10^5 (Beltrão, 1988 e Schroeter, 1997). As raízes históricas da Engenharia de Precisão podem ser buscadas no desenvolvimento de relógios e cronômetros e, claro, na óptica como na manufatura de lentes e espelhos para telescópios e microscópios. A maior contribuição neste campo foi feita no desenvolvimento de máquinas e instrumentos de alta precisão no final do século 19 e início do século 20 com as máquinas de "ruling" destinadas à confecção de retículos para a espectrografia de difração (Taylor 1949 e Hirst; Howse, 1969). Hoje máquinas-ferramenta de ultraprecisão controladas por computador, utilizando ferramentas de geometria definida e não definida podem posicionar a ferramenta em relação à peça numa resolução da ordem de 1 nm (Shore, 1995).

Todavia a precisão de fabricação alcançável inclui não somente ferramentas de corte de geometria definida e abrasivas, mas também processos de feixe de energia tais como feixes de elétrons e iônicos além de sistemas de sonda para medição superficial e manipulação molecular. Desta forma a fabricação de ultraprecisão tem progredido da precisão micrométrica para a precisão nanométrica. Entretanto esta tecnologia de cima para baixo tem sido acrescida das tecnologias de baixo para cima, tais como aquelas que possibilitam que nanoestruturas ajam como máquinas-guia e ativem a síntese de grandes moléculas nisto incluída a nanotecnologia molecular com promessas da construção através dos átomos.

4.2 Feynmann

Embora o primeiro a cunhar a expressão nanotecnologia tenha sido

Taniguchi, pode-se considerar que o conceito de nanotecnologia, principalmente do que é chamado de nanotecnologia molecular, tenha sido enunciado primeiramente pelo físico americano Richard Feynmann (prêmio Nobel de 1965) em sua palestra de abertura do encontro anual da Sociedade Americana de Física no Instituto de Tecnologia da Califórnia, em 1959. Ele chamou sua palestra de “there is plenty of room at the bottom”, (numa tradução livre como: “há muito lugar lá embaixo”), com o objetivo de chamar a atenção sobre as possibilidades de miniaturização de dispositivos e de processos (Feynmann, 1960). Na introdução, Feynmann perguntou “porque não seria possível escrever os 24 volumes da Enciclopédia Britânica na cabeça de um alfinete”. Ele afirmou que se pudéssemos aumentar o tamanho da cabeça de um alfinete 25.000 vezes a área seria igual à necessária para acomodar todas as páginas da referida Enciclopédia. Desta forma bastaria reduzirmos o tamanho da escrita em 25 mil vezes para que o problema fosse solucionado. Ele argumentou que o Microscópio Eletrônico de Varredura poderia ter melhorado sua resolução e estabilidade com objetivo de “ver os átomos” e previu a possibilidade de arrumar os átomos da maneira que se quisesse dentro dos limites da estabilidade química, construindo pequenas estruturas que conduzissem à síntese molecular ou atômica dos materiais. Com os devidos descontos, suas previsões foram impressionantemente precisas. Ele não usou o termo nanotecnologia, mostrando precisamente o potencial da miniaturização extrema e da possibilidade de auto-organização e automontagem de moléculas. Neste contexto de auto-organização e construção com as moléculas o trabalho de outro americano, K. E. Drexler, foi desenvolvido.

4.3 Taniguchi

O termo nanotecnologia foi primeiramente introduzido pelo Prof. Norio Taniguchi, do Instituto de Ciências de Tóquio, em 1974, na Conferência Internacional de Engenharia de Produção, em Tóquio, patrocinada pelo College International pour la Recherche en Productique (CIRP). Taniguchi usou a palavra para descrever a usinagem ultrafina, o processamento de materiais na escala de precisão nanométrica, trabalho que começou em 1940 pelo estudo dos mecanismos da usinagem de materiais duros e frágeis tais como os cristais de quartzo, silício e alumina pelo processo ultrasônico. Taniguchi também previu o comportamento das precisões a serem obtidas ao longo dos anos (Figura 2). É possível observar que, pela previsão, a precisão de fabricação possível através da usinagem de ultraprecisão atingiria a marca de 1nm nos primeiros anos do século 21 o que realmente ocorreu (Taniguchi, 1974 e 1992).

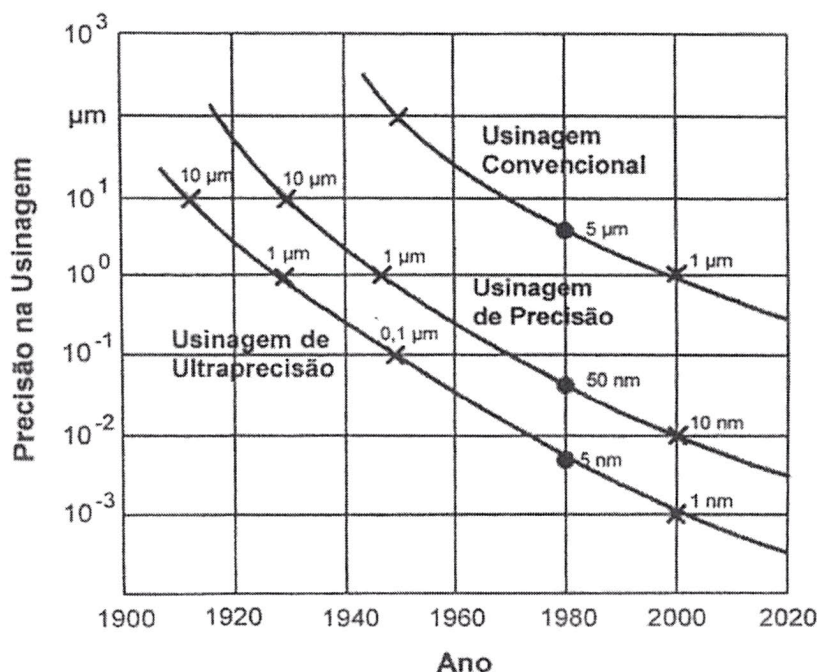


FIGURA 2. Tendências no Desenvolvimento da Precisão através da Usinagem de Ultraprecisão (Schroeter, 1997)

Subseqüentemente, o Prof. Taniguchi esteve à frente da pesquisa usando feixes de energia (elétrons por exemplo) para a fabricação destes materiais com precisões nanométricas

4.4 Drexler

K. Eric Drexler foi estudante no MIT. Ele se tornou mundialmente conhecido pelo conceito nanotecnologia molecular que abrange tecnologia de manufatura baseada no conceito de bottom-up (Drexler, 1992) da manufatura molecular popularizada no seu livro *Engines of Creation*, publicado em 1986. Ele postulou a possibilidade de mobilizar estruturas moleculares de escala nanométrica no sentido de fazê-las agir como máquinas e assim ativar e guiar a síntese de grandes moléculas. Suas idéias incluem bilhões de máquinas tipo robôs chamadas de montadores os quais formariam a base de uma tecnologia de manufatura molecular capaz de construir qualquer coisa átomo a átomo ou molécula a molécula. As idéias de Drexler ganharam muita publicidade com a primeira proteína produzida pela DuPont em 1987 e com a manipulação de 35 átomos de xenônio por Eigler e Schweitzer em 1990 no laboratório de pesquisa da IBM na Califórnia usando um microscópio de tunelamento (Figura 3).

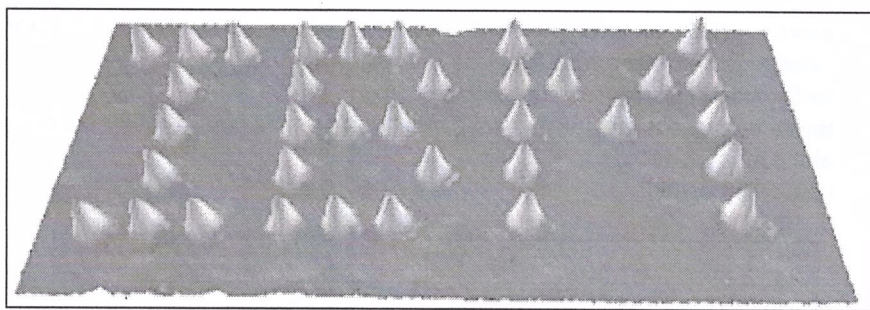


FIGURA 3. Arranjo de 35 átomos de Xenônio sobre Níquel realizado com um microscópio de tunelamento (McKeown, 1997).

O principal objetivo da pesquisa de Drexler e seus colegas está baseada na manufatura molecular através do projeto e construção de um manipulador molecular. Em 1994, Krummenacher e Lewis imaginaram que seriam necessários ainda 20 anos de extensas pesquisas para que os avanços em técnicas de manufatura utilizando moléculas altamente reativas se tornassem realidade (Krummenacher, 1994). Em diversos aspectos, muitos cientistas permanecem de alguma forma céticos sobre as idéias de manufatura molecular de Drexler e advertem sobre os perigos do excesso de expectativas talvez irreais sobre a nova tecnologia. Talvez a melhor definição da nanotecnologia molecular de Drexler seja a de controlar as reações químicas com objetivo de construir materiais e dispositivos complexos (incluindo máquinas moleculares), resultando em controle preciso da estrutura da matéria no nível molecular. O aspecto positivo da publicidade sobre o trabalho de Drexler é de que a Nanotecnologia encoraja a pesquisa interdisciplinar e um maior conhecimento público sobre o assunto.

5. Nanotecnologia e a sua Importância

Nanotecnologia é formada por um grupo de tecnologias genéricas que estão se tornando muito importantes em diversos campos industriais e oferecem diversas melhorias nos padrões de vida ao redor do mundo. É uma outra maneira de pensar os problemas e suas soluções que correntemente obstruem novos desenvolvimentos e que, uma vez solucionados, aumentariam a riqueza da humanidade (Rohrer, 1995). A árvore da Nanotecnologia mostra em termos gerais a criação de riqueza através de novas oportunidades que estão nascendo da pesquisa em ciência e da engenharia baseada em tecnologias de microsistemas, ciência nanométrica e nanotecnologia (Figura 4). As principais forças neste campo dos sistemas micrométricos aos nanométricos são:

- novos produtos que possam trabalhar numa microescala ou por tolerâncias de ultraprecisão;
- melhores performances dos sistemas;
- miniaturização motivada pelo trinômio “menor, mais rápido e mais barato”;
- alta confiabilidade;
- menores custos.

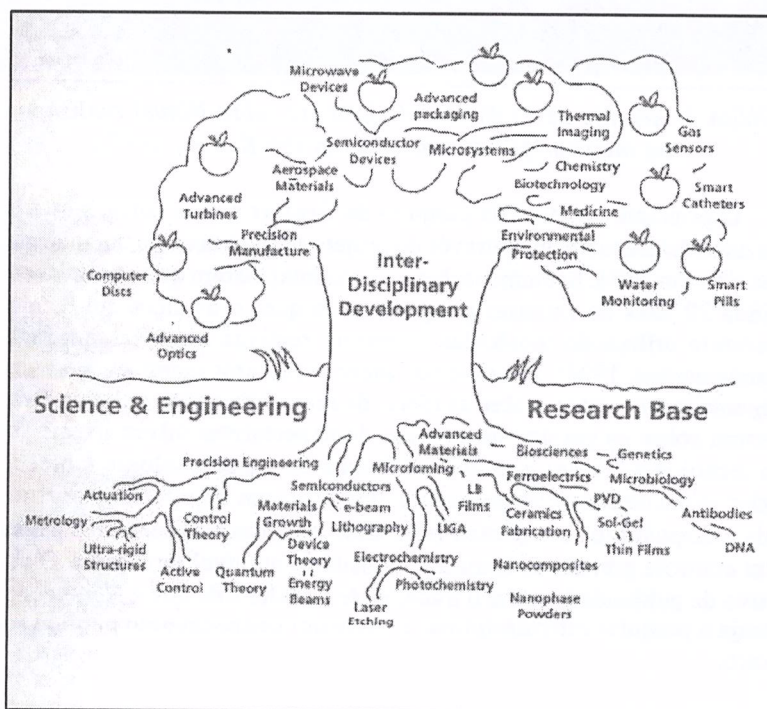


FIGURA 4. A Árvore das Oportunidades Comerciais da Nanotecnologia (McKeown, 1997)

6. Usinagem de Ultraprecisão

A usinagem de ultraprecisão é uma tecnologia de usinagem para produção de peças mecânicas e ópticas com precisão no campo sub-micrométrico e em alguns casos abaixo da faixa do nanômetro. Nesta, são empregadas ferramentas diamantadas ou de CBN em máquinas-ferramenta especialmente projetadas para esta função visando obter superfícies de alta precisão sob condições controladas de temperatura, umidade e isolamento do meio ambiente (Precision Diamond Machining, 1987 e Contour Tool, 1997). Engenharia e usinagem de ultraprecisão tais como o corte, a retificação e o

superacabamento têm sido desenvolvidas nos últimos 30 anos com objetivo de gerar superfícies com precisão nanométrica em macro componentes tais como:

- mancais de ultraprecisão – elementos de rotação e/ou mancais hidrodinâmicos a gás ou líquidos utilizados para desenvolver tecnologia de manufatura que será utilizada na próxima geração de memórias de alta performance, televisões de alta definição em grande escala e gravadores de disco;
- espelhos e lentes para sistemas ópticos operando primeiramente nos comprimentos de onda visível, ultravioleta e Raios-X;
- pesquisa em Engenharia Biomédica que serão intensificadas pela maior precisão e menor custo de máquinas e processos especializados.

6.1 Máquinas e Instrumentos de Ultraprecisão

Visando à utilização na maior parte dos processos de manufatura nanotecnológica, máquinas e instrumentos de ultraprecisão são necessários para controlar as relações espaciais tridimensionais da ferramenta com a peça em precisões da ordem de 0,1 nm ou talvez menores. As ferramentas podem ser:

- ferramentas sólidas para ações de corte, abrasão ou mecânico-químicas;
- ferramentas de feixes energéticos;
- ferramentas de varredura por sonda tais como os microscópios de tunelamento, microscópio de força atômica ou sondas magnéticas, térmicas ou químicas.

As máquinas de ultraprecisão podem ser classificadas em:

- grandes máquinas-ferramenta com Comando Numérico Computadorizado (CNC) para medição e formação convencional de partes de grande porte; isto significa trabalho com nanotolerâncias em macro-componentes;
- instrumentos para aplicações metrológicas em componentes micrométricos e macrométricos;
- máquinas muito pequenas desde poucos milímetros até dimensões micrométricas.

Em qualquer caso existem 11 princípios fundamentais para a construção de máquinas-ferramenta com alta precisão para a escala nanométrica que podem ser sumarizados em (Corbett; McKeown, 1998):

- estruturas das máquinas;
- projeto cinemático e semicinemático;
- princípio do alinhamento de Abbe;
- transdutores de deslocamento direto;
- redes de metrologia;

- guias e elementos de rotação;
- acionamentos;
- estabilidade térmica;
- servo-acionamentos e controle;
- compensação de erros;
- projeção de erros.

6.2 Ferramentas Sólidas

Nos últimos 30 anos tem-se observado grande avanço nas máquinas CNC para torneamento diamantado e para a retificação de materiais frágeis, como os vidros e cerâmicas, com baixos níveis de dano sob a superfície após a usinagem. Durante este período, aplicações para a usinagem de torneamento diamantado foram incorporadas nos processos de fabricação de componentes tais como os substratos de memória de discos para computador, espelhos e lentes não esféricas de alta performance, substratos de espelhos para Raios-X, etc. Ferramentas sólidas para a usinagem de corte ou de abrasão, com espessuras de cavaco menores do que 1 μm , resultam em grandes forças de corte e altas temperaturas na região dos gumes de corte. Na profundidade de corte na faixa de 1nm a 100nm, este aumento nos esforços de corte são causados pela necessidade de superar muitas vezes a força de agrupamento dos átomos (Puttick et al, 1989 e Moriwaki; Okuda, 1989). Na faixa entre 0,1 μm e 10 μm , as forças de corte reduzem bastante já que o processo de usinagem ocorre em função das falhas nos grãos cristalinos, movimentação de discordâncias nos materiais dúcteis e fratura entre os grãos devido a microtrincas nos materiais frágeis. Para profundidades de corte maiores do que 10 μm os defeitos são causados pelas falhas dúcteis mais comuns na faixa de multi-grãos, ou por falha frágil nos contornos de grão. Fica claro desta forma que ferramentas sólidas não são ideais para o processamento atômico dos materiais (McKeown, 1986). A maior parte dos materiais de alta performance desenvolvidos nos últimos 25 anos são essencialmente duros e frágeis. Entretanto os novos processos de retificação abrasiva com ferramentas de granulometria de diamantes ou CBN muito fina e ligante metálico têm produzido na usinagem o que se denominou “usinagem no regime dúctil” de materiais frágeis (Blackley; Scattergood, 1994) como o óxido de titânio (Figura 5). Estes processos junto com ferramentas monocortantes começaram a substituir os processos convencionais de polimento e lapidação para a preparação de superfícies espelhadas sobre vidros principalmente para os componentes de alto custo, com formas diferentes das planas e esféricas.

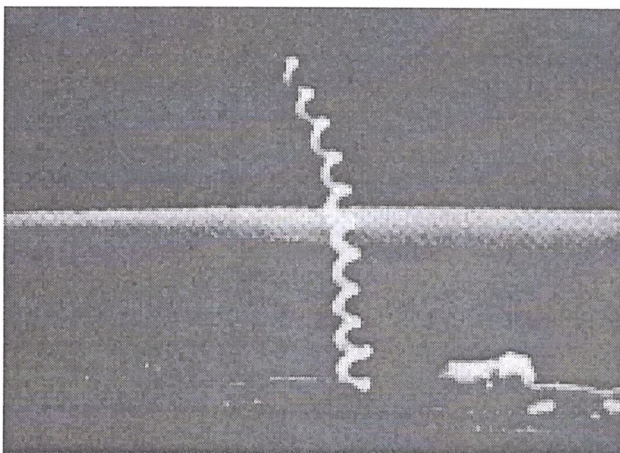
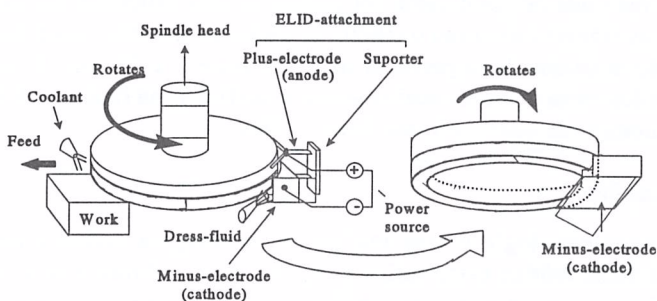


FIGURA 5. Cavaco de Óxido de Titânio após Usinagem no Modo Dúctil (Magnificação de 10.000 x) (Samuels 1982)

Todavia, ferramentas abrasivas com granulometria muito fina podem ser extremamente ineficientes durante o processo em função do entupimento ou empastamento da ferramenta com cavacos do material que está sendo usinado. Isto acaba levando a numerosas operações de dressamento do rebolo, o que provoca o surgimento de novas superfícies abrasivas sobre a ferramenta. Para evitar este problema, uma técnica recente chamada de dressagem eletrolítica no processo (Electrolytic In-Process Dressing – ELID) tem sido utilizada para superar o problema do empastamento (Figura 6) (Beltrão, 1998). Por meio desta técnica o ligante metálico da ferramenta é permanentemente atacado eletricamente num processo controlado fazendo com que a ferramenta seja limpa e aumentada a vida da mesma.



- * Coolant and Dressing-fluid are the same grinding fluid
- * Copper or graphite is usually used for the minus-electrode
- * Isolation between the machine and the wheel can be usually eliminated if the machine-frame and the plus-pole for the ELID are put to earth

FIGURA 6. Diagrama do Processo ELID (Beltrão, 1998)

O processo de usinagem no modo dúctil em máquinas-ferramenta CNC parece estar se tornando competitivo na produção de dispositivos ópticos complexos num menor tempo e a mais baixo custo. Com o uso de avançadas máquinas-ferramenta com CNC, elementos de reflexão e transmissão podem ser produzidos com danos abaixo da superfície em níveis bastante inferiores, podendo ser considerados praticamente isentos destes danos eliminando a necessidade de polimento final dos componentes produzidos (Gee et al, 1993 e Beltrão et al 1997). Isto é bastante vantajoso na fabricação de óptica complexa (Bifano, 1998), incluindo componentes ópticos fora de eixo tais como segmento de um espelho de grande porte para telescópios. Com o objetivo de atingir a usinagem no modo dúctil em materiais frágeis, a espessura dos cavacos normalmente se encontra na casa dos 100 nm. Estas espessuras dos cavacos são necessárias para manter a tensão nos materiais dentro das faixas para que o material se comporte de forma dúctil ao invés de maneira frágil. Esta habilidade para usinar os materiais de forma dúctil é extremamente apropriada para a usinagem de componentes de grande porte cerâmicos ou bi-metálicos tais como as pás de turbinas, bicos-guia das mesmas pás, bicos injetores de tinta, etc, com alta precisão sem induzir micro-trincas no material, o que em última análise levaria a uma redução de vida do componente (Blake, 1988 e Blake; Scattergood, 1990). Claramente os tipos de máquina ferramenta capazes de produzir estes componentes com as qualidades mecânicas requeridas, em precisões aproximando-se do regime nanométrico precisam de desenvolvimento apropriado. Alta rigidez estrutural entre a peça e a ferramenta, controle preciso do posicionamento da ferramenta mesmo sob condições de vibração produzidas pelo processo são essenciais para alcançar o regime dúctil.

Recentemente uma máquina denominada de Tetraform concebida originalmente no Laboratório Nacional de Física numa estrutura de junta pinada de forma tetraédrica tem conseguido resultados ainda mais expressivos neste campo. A máquina originalmente foi projetada para usinagem no modo dúctil de materiais frágeis tais como o silício, os vidros, o quartzo, as cerâmicas, etc, produzindo acabamento superficial na faixa entre 1 e 20 nm. Entretanto, já foram obtidos nesta máquina acabamentos superficiais na faixa dos 6 Angstroms (Å) em amostras de quartzo (Load Point, 2004).

7. Conclusões

A nanotecnologia é uma realização tecnológica difícil e importante. Apesar da parte teórica estar suficientemente desenvolvida e de a comunidade científica estar certa de sua viabilidade, existem numerosos e complexos problemas técnicos a serem resolvidos, cuja solução não é ainda precisamente conhecida. Várias vias de pesquisa estão em curso atualmente. Da mesma forma, a duração e a quantidade de esforços a serem dispendidos para se alcançar o sucesso são, ainda meras suposições. Pelas situações analisadas

parece que a melhor abordagem para a chamada nova tecnologia seja utilizar o melhor das abordagens física e química com a nanotecnologia molecular e as de engenharia para encontrar precisões de fabricação na faixa entre 0,1 a 100 nm. Neste sentido a aplicação de técnicas de usinagem de ultraprecisão tem mostrado potencial principalmente na fabricação de peças complexas em materiais de alta performance.

8. Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer ao Prof. John Corbett, titular da cátedra de Engenharia de Precisão na Universidade de Cranfield, pelas valiosas informações e aos colegas da Universidade de Cranfield pelos demais dados fornecidos.

9. Referências Bibliográficas

BELTRÃO P. A.; Analysis of the Potential for Ductile Mode Machining of Ferroelectric Ceramic Materials, **PhD. Thesis**, Cranfield University, Cranfield, UK, 1998.

BELTRÃO P. A.; GEE A. E.; CORBETT J.; WHATMORE R. W.; GOAT C. A.; Impey S. A.; em: Kunzmann H.; Wäldele F.; Wilkening G.; Corbett J.; McKeown P.; Weck M.; Hümmeler J.; eds., **Progress in Precision Engineering and Nanotechnology**, (Proc. of 9th IPES and 4th UME, Braunschweig, Germany, May 1997) PTB Braunschweig und Berlin Presse, Braunschweig, Germany, 1997, pp.578-81.

BIFANO T. G.; Ductile Regime Grinding of Brittle Materials, **PhD Thesis**, North Carolina State U., Raleigh, NC, 1988.

BINNING G.; QUATE C. F.; GERBER C.; Atomic Force Microscopy, **Phys. Rev. Lett.**, vol 56, n. 9, 1986, pp.930-33.

BLACKLEY W. S.; SCATTERGOOD R. O.; **J. Eng. Ind.**, vol. 116, 1994, pp.263-6.

BLAKE P. N., Ductile-Regime Diamond Turning of Germanium and Silicon, **PhD Thesis**, North Carolina State University, Raleigh, NC, 1988.

BLAKE P. N.; SCATTERGOOD R. O.; **J. Am. Ceram. Soc.**, vol.73, 1990, pp.949-57.

Contour Fine Tooling Ltd, 4 Wedgwood court, Wedgwood way, Stevenage, Herts, England, 1997.

CORBETT J.; MCKEOWN P. A.; **Course Notes in Precision Engineering**, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University, UK, 1998.

- DREXLER K. E.; **Engines of Creation: a new era of Nanotechnology**, 1992.
Enciclopédia Universal, Lisboa: Texto, 2006 (versão eletrônica).
- FEYNMANN R.; There is Plenty of Room at the Bottom, **Engineering and Science Magazine**, vol 23, n. 22, 1960.
- GEE A. E.; SPRAGG R. C.; DUDUCH J.; CHAO C-L.; PUTTICK K.; em: IKAWA N.; SHIMADA S.; MORIWAKI T.; MCKEOWN P. A.; SPRAGG R. C.; eds., **International Progress in Precision Engineering** (Proc. 7th IPES Kobe, Japan, May 1993) Butterworth-Heinemann, Stoneham MA, 1993, pp.731-737.
- HIRST W. and HOWSE M. G. J. W., **Proc. Roy. Soc. Lond. A**, vol. 311, 1969, pp.429-444.
- KRUMMENACHER M.; Prospects in Nanotechnology; towards molecular manufacturing, New York: John Wiley and Sons, 1994.
- Load Point, Commercial Literature, **Machine Tool Technology**, pp 20-22, 2004.
- MCKEOWN P. A.; Ultraprecision Diamond Machining of Advanced Technology Components, **Advanced Manufacturing Processes**, n. 1, pp.107-132, 1986.
- MCKEOWN P. A.; Keynote Paper, **Precision Engineering Short Course**, Cranfield University, Cranfield, Oct 21-23, 1997.
- MORIWAKI T.; OKUDA K.; Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting, **Annals of the CIRP**, vol. 38, 1989, pp.115-118.
- Nanotechnology Journal ISSN 9957-4484 publicado por IOP Publishing Ltd. UK and American Institut of Physics, 1990.
- Precision Diamond Machining, Commercial Literature, **Industrial Diamond Review**, n. 3, 1987.
- PUTTICK K. E.; RUDMAN M. R.; Smith K. J.; Franks A.; Lindsey K.; **Proc. Roy. Soc. Lond. A**, vol. 426, 1989, pp.19-30.
- ROHRER H.; The Nanometre Age: Chalenge and Chance, **Microelectronic Engineering**, Elsevier Science, vol 27, 1995, pp.3-15.
- SAMUELS L. E.; Metallographic Polishing by Mechanical Methods, 3rd edition, **American Society for Metals**, Metals park, Ohio, USA, 1982,.
- SCHROETER R. B.; Usinagem de Ultraprecisão de Elementos Ópticos Transmissivos no Espectro Infravermelho, **Tese de Doutorado**, UFSC, 1997.
- SHORE P.; Machining of Optical Surfaces in Brittle Materials using an Ultra-Precision Machine Tool, **PhD Thesis**, Cranfield University, Cranfield, U.K., 1995.

STROCIO, J. A.; FEENSTRA R. M.; FEIN A. P.; Electronic Structure of the Si (111) 2x1 Surface by Scanning Tunneling Microscopy, **Europhys. Letters**, vol 8, n. 5, 1989, pp.435-40

TANIGUCHI N.; On the Basic Concept of Nanotechnology, **Proc ICPE**, Toquio, 1974.

TANIGUCHI N.; Future Trends of Nanotechnology, **Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.**, vol 26, 1992, pp.1-7.

TANIGUCHI N.; Nanotechnology Integrated Processing Systems for Ultraprecision and Ultrafine Products, London: Oxford University Press, 1996.

TAYLOR E. W.; **J. Sci. Inst.**, vol 26, 1949, pp.314-6.

WILLS-MOREN W. J.; READ R. F. J.; em: Weck M.; Hartzel R.; eds., **Ultraprecision in Manufacturing Engineering**, (Proc. International Congress for Ultraprecision Technology, Aachen, Germany, May 1988) Springer-Verlag, Berlin, 1988, pp.3-21.

9. Nota de responsabilidade

O autor é o único responsável pelo material impresso incluído neste artigo.