

MICRO E NANO MANUFATURA: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Washington Moreira Cavalcanti
washington.cavalcanti@hotmail.com
UFMG

Christianne Lacerda Soares
chrislacerda3@hotmail.com
UFMG

Resumo: Os sistemas de manufatura passam hoje por significativas mudanças, tendo que se readaptar e reinventar a cada dia para serem capazes de atender à alta demanda do mercado. Em se falando de máquina, ainda na Revolução Industrial propagada pelo mundo no século XIX, a maior parte do maquinário era de grande porte e de funcionamento a vapor. A manufatura industrial foi capaz de reduzir o tamanho, não só de suas máquinas e componentes, mas também do produto final, para adaptar-se a essa nova realidade. De modo a atender as necessidades do mercado que cada vez mais utiliza componentes minúsculos na composição de seus produtos é que surgiram a micro e a nano manufatura, criando técnicas e processos capazes de fabricar peças e componentes tão pequenos, mas com excelentes propriedades e atendendo as tolerâncias dimensionais requeridas. O campo de rápido crescimento da nanotecnologia e seus produtos coloca de frente interessantes desafios de processos de produção para os gestores e empresas. A nanotecnologia é representativa de uma nova geração de processos produtivos cuja amplitude ainda é difícil de prever, e que se apresentam em rápida evolução. A natureza da nanotecnologia como um setor em ágil crescimento e em constante evolução, é uma excelente aplicação para mercados ainda inexplorados. Neste estudo, serão abordados os principais processos de micro e nano manufatura, os métodos necessários para o controle de qualidade das peças e o futuro desta tecnologia que se desenvolveu rapidamente ao redor do mundo, possibilitando avanços colossais principalmente nas áreas da medicina e da informática.

Palavras Chave: Micro manufatura - Nano manufatura - Nano metrologia - Nanotecnologias - Produção Industrial

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de manufatura passam hoje por significativas mudanças, tendo que se readaptar e reinventar a cada dia para serem capazes de atender à alta demanda do mercado. Em se falando de máquina, ainda na Revolução Industrial propagada pelo mundo no século XIX, a maior parte do maquinário era de grande porte e de funcionamento a vapor. Os principais equipamentos utilizados nessa época, como a máquina de tear, a máquina de semear e o motor dos barcos a vapor, pesavam toneladas e ocupavam grandes espaços e instalações físicas que possibilitassem seu funcionamento; na época, o que era considerado tecnologia de ponta, hoje já se manifesta obsoleto, mostrando assim que o avanço tecnológico é irrefreável.

Em se considerando a tecnologia da informática, o primeiro computador eletrônico, construído em 1946, denominado ENIAC¹ (Electronic Numerical Integrator and Calculator) pesava 30 toneladas e ocupava 180m² de área construída. Hoje, os computadores são distinguidos entre máquinas consideradas ainda de grande porte, como os notebooks e laptops, e máquinas extremamente leves e versáteis, de menor porte, como os I-pads, smartphones e alguns modelos de celulares, capazes de executar a maior parte das funcionalidades de um computador normal.

Assim como na área da informática, a manufatura industrial também foi capaz de reduzir o tamanho, não só de suas máquinas e componentes, mas também do produto final, para adaptar-se a essa nova realidade. De modo a atender as necessidades do mercado que cada vez mais utiliza componentes minúsculos na composição de seus produtos é que surgiram a micro e a nano manufatura, criando técnicas e processos capazes de fabricar peças e componentes tão pequenos, mas com excelentes propriedades e atendendo as tolerâncias dimensionais requeridas.

O campo de rápido crescimento da nanotecnologia e seus produtos coloca de frente interessantes desafios de processos de produção para os gestores e empresas. A nanotecnologia é representativa de uma nova geração de processos produtivos cuja amplitude ainda é difícil de prever, e que se apresentam em rápida evolução. A natureza da nanotecnologia como um setor em ágil crescimento e em constante evolução, é uma excelente aplicação para mercados ainda inexplorados.

Neste estudo, serão abordados os principais processos de micro e nano manufatura, os métodos necessários para o controle de qualidade das peças e o futuro desta tecnologia que se desenvolveu rapidamente ao redor do mundo, possibilitando avanços colossais principalmente nas áreas da medicina e da informática.

2. HISTÓRICO

A micro manufatura encontra-se presente já há algumas décadas. É difícil definir exatamente quando os microcomponentes começaram a ser fabricados, mas pode-se afirmar que os mesmos aperfeiçoaram-se principalmente após a II Guerra Mundial, onde o avanço das tecnologias computadorizadas foi sendo cada vez maior.

Já a nanotecnologia, afirmam alguns especialistas, ganhou seu lugar definitivo nas intenções de pesquisas pelo mundo após a publicação do professor K. Eric Drexler em 1986 intitulada *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*; em português, *Mecanismos da Criação: A Era Vindoura da Nanotecnologia* (tradução nossa). Nesta publicação, o professor

¹ Referência tirada do site Museu do Computador, disponível em: http://www.din.uem.br/museu/hist_nomundo.htm.

Eric apresentou sua pesquisa visionária de uma tecnologia tão avançada, capaz de construir praticamente qualquer coisa com precisão absoluta e sem poluição.²

A própria indústria da nanotecnologia, se tornou possível após desenvolvimentos na microscopia que começaram a dar frutos em 1980 (Fiorino, 2010). Segundo o autor, a capacidade para manipular materiais em nível de escalas molecular e atômica, criou um potencial para novas classes de produtos com propriedades distintas e inovadoras.

Segundo Guazzelli e Perez (2009) a partir de 2007, nos países do hemisfério Norte, era possível contabilizar mais de 1.300 empresas em 76 setores de atuação, com investimentos de US\$ 14 bilhões, que realizavam pesquisas nas áreas de eletrônica, engenharia, máquinas, vestuário, defesa, veículos, agricultura, alimentação, nutrição, medicina, odontologia, cosméticos, entre outros, utilizando a nanotecnologia como base para o desenvolvimento de seus produtos.

No Brasil, segundo dados do INPI – Instituto Nacional de Propriedade Intelectual, em 1999, foram depositados os primeiros pedidos de patentes de produtos nanotecnológicos. A quantidade e a variedade de patentes depositadas em 2005, já era superior a 140 e continuam a aumentar significativamente a cada ano³.

Neste panorama é imprescindível ter uma estratégia de longo prazo em relação a nanotecnologia. O desenvolvimento de uma base metrológica avançada na escala nanométrica é condição ímpar para desenvolver esta tecnologia em classe industrial. É essencial a ampla discussão e o envolvimento de todos os atores para responder aos desafios apresentados pela nanotecnologia.

3. MATERIAIS USADOS NA MICRO E NANO MANUFATURA

Juntamente com o avanço das tecnologias de micro e nano manufatura, não só os maquinários e pesquisas precisaram se aperfeiçoar como também toda uma gama de materiais e combinações foi necessária para proporcionar prosperidade aos estudos.

Em relação aos materiais que podem ser utilizados nestes processos, esses são os mais diversos. Sem a pretensão de citar todos eles, no Quadro 1 abaixo foram citados alguns materiais utilizados nessas tecnologias como a relação dos produtos que estes podem gerar:

Quadro 1: Materiais, componentes e produtos de micro e nano manufatura

Material	Componente	Produtos
Piezocerâmicas zircônio	Acelerômetro	Câmeras, tablets, smartphones
Silício	<i>Wafers</i>	Circuitos integrados para computadores
Silício micro-cristalino	Células fotovoltaicas	Energia solar
Compósitos de polímeros	Resistores	Computadores, circuitos eletrônicos em geral
Níquel, ferro e cobalto	Microestruturas galvanizadas	Visor 3D, OLED, luz de reforço

² Matéria em inglês disponível no site: <http://pubs.acs.org/cen/coverstory/8148/8148counterpoint.html>.

³ Referência retirada da Base Brasileira de Pedidos de Patente, disponível em: <http://www.inpi.gov.br>.

Material	Componente	Produtos
Metais (ligas de titânio, aço inox), cerâmicas (hidroxiapatita, zircônio) e polímeros (etileno, silicone)	Pinos, modelos, braços, osso artificiais, componentes diversos	Próteses médicas-odontológicas
Prata e silicato	NANOXClean®	Princípio antimicrobiano para aplicação em vestuário, pisos e revestimentos, ar condicionado, embalagens etc

Fonte: Os autores (2013)

A gama de materiais utilizados na manufatura de micro e nanocomponentes tende a crescer a cada dia, pois determinados materiais que são utilizados em escala macro e micro têm suas propriedades alteradas quando utilizados na escala nano. A informação é confirmada pelo Peter Schulz citado na reportagem de Moretti (2012), que assevera que um material não tóxico em dimensões micrométricas pode se transformar em tóxico quando dimensionado na escala manométrica devido ao aumento da radioatividade. O mesmo Professor exemplifica por meio da comparação da dissolução de sal grosso e sal refinado em uma mesma quantidade de água; os efeitos certamente serão diferentes.

Sendo assim, será necessário que o homem seja capaz não só de inventar ferramentas e processos capazes de suportar essa tecnologia, mas também reinventar materiais ou composições de materiais que sejam “produzíveis” e que não sejam prejudiciais à saúde da população.

4. FERRAMENTAS E PROCESSOS DE MICRO E NANO MANUFATURA

Hoje, no mercado, existem vários tipos de processos e ferramentas, já largamente utilizadas em escala industrial, que possibilitam a utilização da micro e da nano manufatura.

Para Guazzelli e Perez (2009), o verbete nanotecnologia refere-se a coisas extremamente pequenas, invisíveis ao olho nu e a quaisquer outros instrumentos, exceto aparelhos muito poderosos. Está associada a uma medida, a um tamanho. Não é um objeto, é muito diferente da expressão biotecnologia, por exemplo, que se refere à manipulação de seres vivos.

Todos os produtos manufaturados ou fabricados obviamente são constituídos de átomos. Guazzelli e Perez (2009) descrevem que as nanotecnologias conseguem criar novos materiais sintéticos ou modificar os existentes a partir dos átomos ou moléculas. Qualquer estrutura pode ter seu tamanho reduzido; operações de industrialização com ferramentas e processos nanotecnológicos podem ser aplicados em praticamente qualquer produto manufaturado, em toda a amplitude do setor industrial.

Quadro 2: Aplicação de produtos e processos de micro e nano manufatura

Setor Industrial			
Nanomateriais	Propriedades	Aplicação	Indústria
Materiais à base de carbono	Elétricas, mecânicas, térmicas, tribológicas	Pneus, tecidos, suporte para catalisadores, camadas protetoras do desgaste, transplantes, armazenamento de energia etc.	Automobilístico, Têxtil, Medicina e Saúde, Energético, Aeronáutico e Espacial, Construção

Setor Industrial			
Nanomateriais	Propriedades	Aplicação	Indústria
Nanocompósitos	Mecânicas, elétricas, biológicas	“Drug delivery”, implantes, material dentário, parabrisas, materiais leves e fortes etc.	Automobilístico, Têxtil, Medicina e Saúde, Energético, Aeronáutico e Espacial, Construção
Metais e ligas (Óxidos)	Magnéticas, mecânicas, catalísticas, antibacterianas	Saúde, materiais estruturais, recobrimento, armazenamento de hidrogênio etc.	Automobilístico, Medicina e Saúde, Energético, Aeronáutico e Espacial, Construção
Biológicos	Auto-organização, reconhecimento molecular	Sistemas de auto-organização (DNA, proteínas), atuadores, sensores, filtros etc.	Medicina e Saúde, Energético
Nano-polímeros	Mecânicas, permeabilidades de gás, não inflamáveis	Transporte de produtos, empacotamento, aparelhos domésticos, prédios, equipamento esportivo, acabamento de superfícies etc.	Medicina e Saúde, Energético, Construção
Nano-vidros	Ópticas, eletrônicas	Dispositivos ópticos, LEDs, tintas, fotônica, sistema de comunicação etc.	Medicina e Saúde, Energético, Aeronáutico e Espacial, Construção
Nano-cerâmicos	Mecânicas, térmicas, elétricas, difusividade	Óptica, engenharia de precisão, armazenamento de dados etc.	Automobilístico, Medicina e Saúde, Aeronáutico e Espacial, Construção

Fonte: Adaptado de Kuznetsov (2010)

Os processos de micro e nano manufatura são utilizados para a manufatura de elementos plásticos, metálicos e compósitos para a produção de peças pequenas, em particular para produções em larga escala, demandadas por indústrias de microtecnologias (Guazzelli e Perez, 2009). Recentes tecnologias desenvolvidas para a conformação de metais em escala micrométrica foram identificadas, assim, os efeitos provocados pelo tamanho reduzido atingem diretamente as peças miniaturizadas, seus processos produtivos e equipamentos utilizados.

Abaixo serão detalhados alguns destes processos e suas particularidades.

4.1 MICRO EXTRUSÃO

Esta técnica é utilizada para obter peças longas e forma complexa na transversal. (MILANEZ, 2012). Assemelha-se ao processo de macro extrusão, onde o punção força o material da peça para o deslocamento necessário à obtenção da forma pretendida. Na micro extrusão, “[...] o atrito é um dos fatores que mais influenciam o resultado, sendo que a força necessária para vencer o atrito é maior no processo de micro extrusão do que no processo macro (CAO et. al, 2004 apud MILANEZ, 2012). A Figura 1 apresenta um pino microextrudado com diâmetro de 1mm partindo do diâmetro de 1,5 mm e ângulo de extrusão 30°:

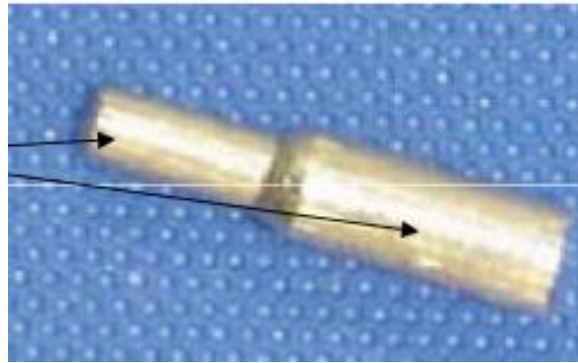


Figura 1: Pino microextrudado

Fonte: Milanez, 2012, p. 26

4.2 MICROFORJAMENTO

O micro forjamento é outro processo utilizado para a obtenção de peças em escala micrométrica; entretanto, neste caso o autor considerou também peças com diâmetro de até 2 mm (MILANEZ, 2012). Os fatores principais a serem considerados neste processo referem-se ao atrito peça-ferramenta e a influência do tamanho de grão (MILANEZ, 2012). O micro forjamento é utilizado para a fabricação de peças com geometria complexa ou não, em escala micrométrica, como microjoelhos, microengrenagens e micropinos; a Figura 2 mostra o processo em 3 estágios da fabricação de um micropino de relógio, de diâmetro 2mm na ponta final :

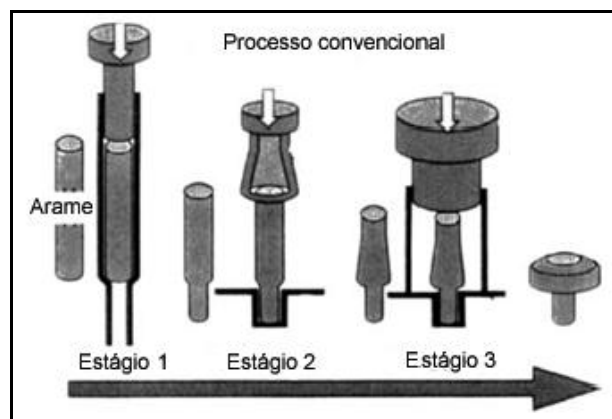


Figura 2: Micro forja em 3 estágios

Fonte: Milanez, 2012, p. 27

No processo de microforjamento demonstrado na Figura 2, observa-se que no estágio 1 o arame é impelido para baixo, forçando-o a estreitar sua extremidade inferior. Já no estágio 2, dentro do molde, pelo mesmo processo alarga-se seu diâmetro no ponto médio, fazendo com que o mesmo fique um pouco maior que o diâmetro na base inferior. No último estágio, a ferramenta empurra a peça dentro de um molde que limita sua deformação, achatando sua base superior, criando-se assim o modelo da peça final. Neste ponto, o diâmetro da peça é de 2mm.

4.3 MICROUSINAGEM

A micro usinagem, por sua vez, consiste em se obter peças miniaturizadas por meio da remoção de material visando um melhor acabamento superficial. Maranhão, Silva e Davim (2012) asseveram que os processos de usinagem convencionais como o torneamento, fresamento e retificação já encontram-se bem estabelecidos e deveriam ser a primeira escolha entre os processos de micro usinagem. Os mesmo autores citam ainda as vantagens do processo de cisalhamento: alta precisão dimensional e geométrica, alta qualidade superficial a relativo baixo custo.

Entretanto, existem também as desvantagens, relacionadas às dificuldades de se reduzir as dimensões da máquina ferramenta pela necessidade de se remover cavacos com espessuras mínimas, sendo assim também mandatório reduzir o avanço e a profundidade de corte (MARANHÃO, SILVA E DAVIM, 2012). Sendo assim, as pesquisas têm sido direcionadas para a miniaturização da máquina-ferramenta e algumas outras já visam a micro usinagem pelo processo a laser.

A micro usinagem já vem sendo utilizada em várias áreas que demandam microcomponentes como telecomunicação, automobilístico, eletrônica e biomédica (MARANHÃO, SILVA E DAVIM, 2012). Na Figura 3 abaixo é possível ver uma linha de ferramentas para a micro usinagem com larguras entre 0,5 e 2,5 mm.






	Corte	Canal	Torneamento	Torneamento reverso	Rosqueamento
Baixo avanço	MACR	MABR	MAFR	MABR	MATR
					

Figura 3: Ferramentas para micro usinagem

Fonte: Sandvik, 2008, p. 13

Dentre as aplicações da micro usinagem, destaca-se o setor médico-odontológico que vem apresentando avanço tecnológico inigualável e inúmeras possibilidades e alternativas aos seres humanos. Dentre os microprodutos surgidos, destacam-se parafusos micro usinados utilizados em implantes dentários, ósseos e de coluna, além de próteses ortopédicas. A Figura 4 mostra uma micro-pastilha de diâmetro 1.8 mm em processo de usinagem:



Figura 4: Microusinagem em pinos

Fonte: Sandvik, 2008, p. 15

A aplicabilidade dos considerados microprodutos requer matéria-prima que não apresente problemas dimensionais e de corrosão, indo de encontro aos aços inoxidáveis e ligas exóticas, como por exemplo o titânio.

4.4 LITOGRAFIA

A litografia é a tecnologia utilizada para produzir, entre outros produtos, os chips de silício, que por sua vez aplicam-se a circuitos de processamento de dados ou ao armazenamento de informações nos equipamentos eletrônicos existentes. Antes de utilizar a técnica, o processo inicia-se com a extração do silício da areia para a formação de uma barra ou cilindro de cristal tão puro que o mesmo possui cerca de 99,99% de silício (SAMPAIO, 2010). Esta barra é ilustrada na Figura 5:



Figura 5: Barra de silício

Fonte: <http://www.tecmundo.com.br/artigos-imprimir.asp?c=23660>

Em seguida, a barra é cortada, formando os chamados wafers onde a tecnologia litográfica será aplicada; os wafers de silício então passam por processos de ajustes que

envolvem a remoção de imperfeições, preparação de superfície, polimento e recebimento de substâncias químicas que possibilitarão a impressão do circuito (SAMPAIO, 2010).

Finalmente, a tecnologia litográfica é aplicada. Sampaio (2010) ilustra que o processo se assemelha à impressão de uma gravura. O mesmo autor descreve o procedimento:

O desenho dos circuitos é criado em uma máscara – em um tamanho bem maior do que o do chip – e projetado através de lentes sobre as camadas que foram adicionadas depois do polimento. Os locais onde a luz incide sobre o wafer são impressionados pela luz – não muito diferente do que acontece em uma fotografia – e tratados com agentes químicos para remover as partes indesejadas no circuito. Essa é a impressão dos caminhos dos elétrons. (SAMPAIO, 2010, [s.p.]). A Figura 6 mostra como ficam os wafers após a impressão:

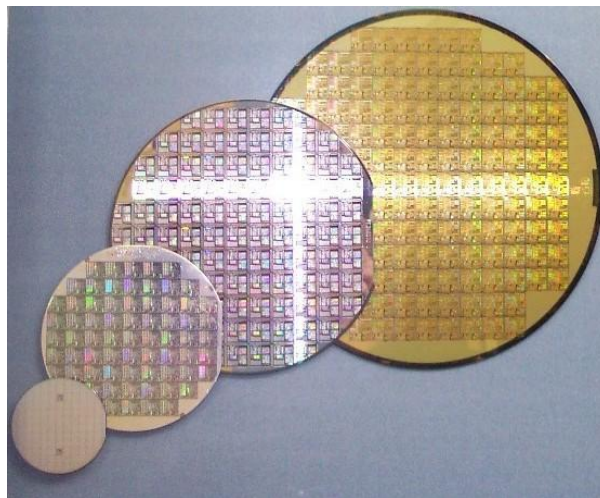


Figura 6: Wafers de silício

Fonte: <http://www.tecmundo.com.br/artigos-imprimir.asp?c=23660>

O último processo envolve o corte dos chips que poderão, então, ser aplicados no produto final.

Este processo envolve não somente tecnologia de ponta, com maquinários extremamente automatizados e altamente produtivos, como também toda a infraestrutura da organização deverá ser preparada para o processo. É necessário que os empregados utilizem equipamentos e vestuário especial que evite a contaminação além de um sistema de limpeza de ar extremamente eficiente, já que os chips em escalas micro e manométricas tornam-se impróprios para uso ao contato de mínimas quantidades de particulado e poeira.

5. MICRO E NANO METROLOGIA

Acompanhando as tecnologias da miniaturização de componentes, os sistemas metrológicos relacionados à micro e nano manufatura não poderiam permanecer no passado. Para medir com precisão e exatidão peças tão pequenas, foi necessário que também a tecnologia de medição avançasse e criasse novas ferramentas capazes de lidar com as escalas um milhão de vezes e bilhão de vezes menores que o metro, respectivamente.

A metrologia, também conhecida como ciência da medição, é considerada por Achete (2005) como crítica para o desenvolvimento e compreensão de qualquer novo fenômeno. O mesmo autor assevera ainda que o avanço da nanometrologia é fundamental para assegurar a qualidade de peças nano manufaturadas e que no Brasil o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) tem o papel essencial de regular e auxiliar a evolução

dessa tecnologia (Achete, 2005). Os principais desafios do INMETRO para regulação da micro e nanometrologia estão descritos abaixo:

- A. Desenvolvimento de métodos de medida na escala manométrica;
 - procedimentos de medidas primárias;
 - procedimentos de medidas de referência.
- B. Desenvolvimento de instrumentação e procedimentos de calibração;
- C. Desenvolvimento de padrões e materiais de referência;
- D. Controle metrológico (certificação) de parâmetros, propriedades, processos tecnológicos, sistemas de medição, etc. (Archete, 2005, p. 15)

A micro e nanometrologia, segundo Kuznetsov (2010), agem como balizador na produção de novos materiais e dispositivos em escala micro e nanométrica, em função do alto grau de precisão e confiabilidade. Ao permitir controle preciso das propriedades dos materiais, a nanometrologia é parte indispensável na evolução da nanotecnologia. O desenvolvimento e adoção de padrões de medidas e instrumentação científica adequada requer aprimoramento constante, pois as técnicas de medidas desenvolvidas para materiais convencionais em muitos casos não podem ser simplesmente aplicadas em nanoestruturas.

Enquanto o papel do INMETRO volta-se mais para a regulação e criação de novas formas de controle metrológicas no país, as indústrias voltam suas perspectivas para a concepção de novos métodos e maquinário apropriado para fornecer medidas precisas em peças miniaturizadas.

Algumas dessas preciosas ferramentas já puderam ser utilizadas no mercado enquanto tantas outras encontram-se ainda em fase de teste e desenvolvimento. Dentre as primeiras, é possível destacar o método chamado Metrologia Multissensor 3D de Ultraprecisão, que realiza medições por meio de coordenadas, direcionado a peças e componentes extremamente pequenos (BALDO, 2012). A Figura 7 elucida o processo de uma máquina multissensor de medição por coordenadas de ultraexatidão:

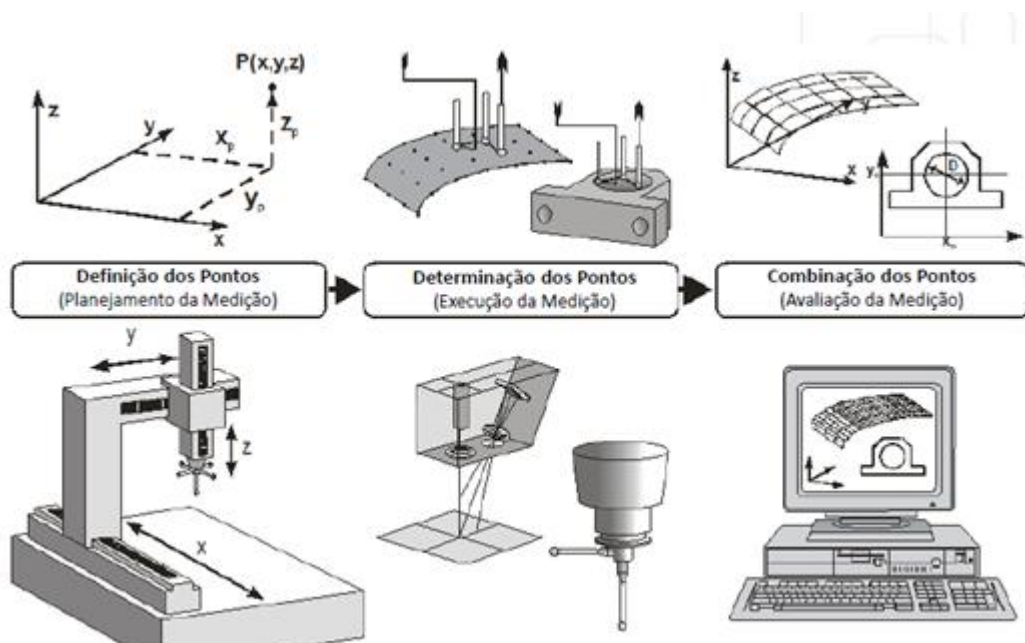


Figura 7: Processo de Medição de Ultraexatidão

Fonte: Baldo, 2012, p. 11

Na Figura 7, observa-se que não se trata de procedimento complexo mas sim de capacidade de maquinário. A medição é realizada por meio da definição dos pontos em uma primeira etapa. Na segunda etapa, o planejamento desta medição dos pontos é realizada e na última etapa a combinação dos pontos permite ao software agrupa-los e mostrar os resultados solicitados. Neste caso, a máquina funciona com sensores de toque de superfície; entretanto, já existem no mercado máquinas que funcionam com sensores óticos.

Neste cenário, “A Metrologia Multissensor 3D de Ultraprecisão oferece soluções de medição e avaliação dimensional de componentes com dimensões milimétricas, geometrias micrométricas e incertezas submicrométricas” (BALDO, 2012, p. 15). A resolução das escalas é de $0,001\mu\text{m}$ e o erro máximo admissível são tão mínimos quanto $0,30\mu\text{m}$ (BALDO, 2012, p. 16).

Existem ainda outro equipamento denominado Máquina Multissensor de Medição por Coordenadas com Tomografia de Raios X, que realiza tomografias por completo (inclusive de estruturas internas visíveis e não visíveis) de forma não destrutiva, além de realizar investigação avançada em materiais em busca de trincas, contaminantes, distribuição do material, etc (BALDO, 2012). Esta técnica, denominada metrotomografia 3D de Raios X, permite a amplificação de imagens em até 20x, mensurando estruturas tão mínimas quanto $0,02\mu\text{m}$ (BALDO, 2012). Uma de suas principais aplicações é a realização de inspeção não destrutiva em galerias internas e microfuros de refrigeração de palhetas de turbinas a gás que operam em velocidade e temperatura elevadas (BALDO, 2012). A Figura 8 exemplifica uma inspeção metrotomográfica 3D nessas palhetas:

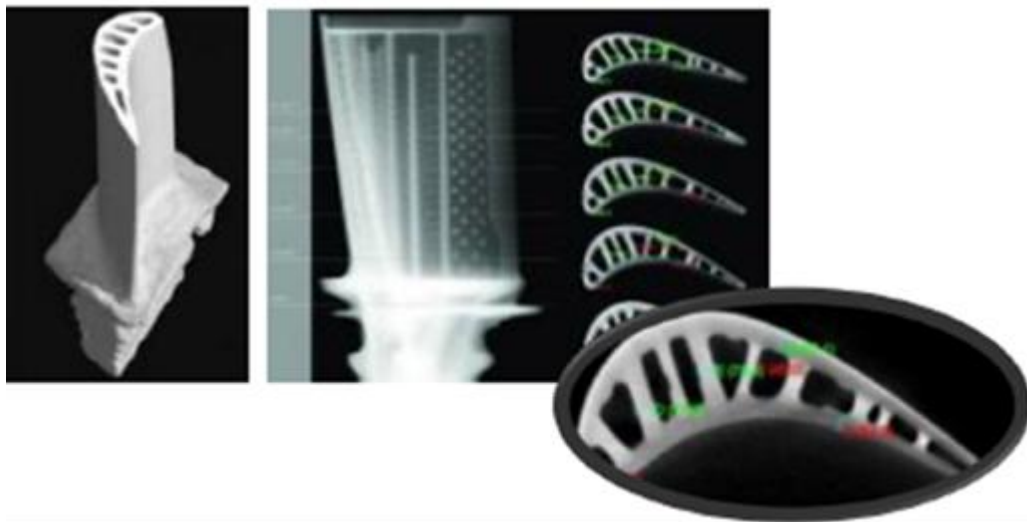


Figura 8: Inspeção não destrutiva metrotomográfica em galerias internas de palhetas

Fonte: Baldo, 2012, p. 33

Neste tópico, foram apresentadas algumas das tecnologias já disponíveis para executar inspeções dimensionais e ensaios diversos em peças micro e nano manufaturadas. Claramente, essas não são as únicas metodologias e equipamentos disponíveis no mercado para efetuar tais medições mas são algumas dos mais avançados e por isso, apresentam custo ainda elevado. À medida que as atividades relacionadas à micro e nano manufatura forem evoluindo, a



metrologia associada a esse processo deverá igualmente se antecipar às necessidades que surgirão do progresso micro e nano tecnológico.

7. FUTURO DA NANOMANUFATURA

As perspectivas para o futuro da nanotecnologia podem ser direcionadas a vários rumos, com os benefícios antecipados e riscos potencialmente impactantes; inúmeros setores da economia podem ser beneficiados e muitos aspectos da sociedade alterados. Segundo dados do NanotecProject - Project on Emerging Nanotechnologies (2013), em português, ProjetoNanotec – Projeto em Nanotecnologias Emergentes (tradução nossa) estima-se que governos, empresas e investidores de risco aplicaram aproximadamente \$ 12.000.000.000 dólares em todo o mundo em pesquisa e desenvolvimento de nanotecnologia no ano de 2006. As empresas estão aplicando este investimento sobre a primeira geração de produtos de nanotecnologia. As entradas de Consumer Products – produtos de consumo - mais do que duplicou entre 2006 e 2007, quando cerca de 500 produtos de empresas em 20 países foram colocados no mercado.

Segundo a ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (2010), do ponto de vista tecnológico, nos últimos anos têm ocorrido um aumento no volume de investimentos governamentais e privados nacionais e internacionais em nanotecnologia. As agências de financiamento têm lançado programas com objetivo de incentivar novas pesquisas, principalmente porque os estudos mostram que através da nano manufatura será possível obter materiais e dispositivos com excelentes índices de resistência, custo e precisão.

Para Azevedo & Ferreira (2006), algumas aplicações relacionadas com a nanotecnologia e nano manufatura podem ser divididas nas seguintes áreas:

- I. Manufatura: Peças mecânicas avançadas estruturas menores, de peso leve e com alto desempenho, que resistam a elevadas temperaturas e possibilitem redução no custo de produção e de lançamento de novos produtos. Manipulação molecular com uso de auto-organização, automontagem, autorreplicação e nucleação. Será possível obter materiais compactos e com menos matéria-prima, envolvendo materiais semicondutores, plásticos, polímeros, cerâmicas, borrachas, metais, materiais isolantes e materiais biológicos.
- II. Medicina: Produção de nanodispositivos que funcionem como elementos reparadores de enfermidades diversas. Construção de nanorobôs, que podem ser macromoléculas com configurações espaciais para possibilitar movimentos parecidos com os de um robô, será capaz de se movimentar no interior do corpo humano à procura de agentes infecciosos.
- III. Tecnologia de Informação e Eletrônica avançada: Produzir e disponibilizar computadores minúsculos, com as dimensões muito reduzidas, mais potentes que os supercomputadores atuais, associado a um custo de fabricação extraordinariamente reduzido.
- IV. Ecologia e Biociência: Desenvolvimento de nanopartículas ou nanocatalisadores capazes de remover contaminantes onde não há eficácia de outros processos químicos.
- V. Aeroespacial: A nanotecnologia permitirá a fabricação de foguetes, de estações orbitais, etc., mais sólidas, mais confiáveis e a um custo reduzido. Na aviação comercial, será possível o desenvolvimento de equipamentos de reconhecimento aéreo, aparelhos aviônicos de última geração com capacidade de coleta e processamento da informação.



Há vários direcionamentos para a fabricação de uma diversidade de nanomateriais, no entanto, conforme descrito por CAO (2004), as rotas de produção aplicadas têm sido focadas principalmente nos métodos de abordagens químicas. Uma abordagem diferente é a fabricação em nanoescala de estruturas com diversas técnicas físicas. Ainda segundo o autor, ao comparar o processo químico de fabricação e novas técnicas físicas de manufatura para nanoestruturas, observa-se um crescimento desta última, que produz principalmente, microestruturas para a indústria de semicondutores.

A nanotecnologia hoje ultrapassa, em termos de avanço tecnológico, tudo aquilo que já se havia descoberto sobre os processos de micromanufatura. Apesar de proporcionar avanços incríveis nas áreas, principalmente, da transmissão de energia (fibras de alumínio com nanopartículas) e na área médica (resinas dentárias), sua eficácia gera alguns transtornos quando se trata de segurança e fim de vida útil no meio ambiente. O Professor Peter Schulz do Instituto de Física Gleb Wataghin, da Unicamp (MORETTI, 2012) questiona sobre ainda serem desconhecidos os efeitos a longo prazo da utilização de nanomateriais em medicamentos para os seres humanos.

Mesmo frente a essas incertezas ainda vividas pela falta de informação sobre as consequências do uso prolongado da nanotecnologia, muito já tem sido feito no ramo de pesquisas. De acordo com Moretti (2012):

“Em oito anos, houve incentivo a 412 projetos de pesquisa e desenvolvimento em áreas como simulação e modelagem, nanobiotecnologia e nanotubos de carbono. O plano também apoiou a fundação de laboratórios regionais estratégicos e concedeu bolsas de mestrado (12), doutorado (6) e jovens pesquisadores (175 propostas). Segundo dados do próprio MCTI, o Brasil conta, atualmente, com 5.500 pesquisadores, entre alunos e professores, que se dedicam à nanociência.

Segundo a ABDI (2010), por não possuir ainda uma base de dados sistematizada sobre o mercado de produtos, processos e serviços baseados em nanotecnologia, o Brasil deve observar atentamente a cadeia de valor da nanotecnologia e seus componentes. Nos próximos anos, o mercado apresentará setores que terão taxas de crescimento expressivas até 2013, como: eletrônicos, aplicações biomédicas e bens de consumo final (com taxas de 30,3%, 56,2% e 45,9%, respectivamente). Outros setores convencionais como farmacêutico, automotivo e defesa responderão por parcelas menores do mercado global de nanotecnologia (de 1 a 7%).

Em termos de futuro da nanotecnologia no Brasil, conforme descrito em estudo da ABDI (2010), as competências nacionais concentram-se nos seguintes temas: nanopartículas, nanotubos, nanocristais, nanoestruturas e nanocompósitos.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A “Micro e Nano Manufatura” busca utilizar as propriedades de objetos nanométricos e desenvolver seu uso em dispositivos com dimensões extremamente reduzidas. O uso e aplicação em escala industrial destes microcomponentes, compreende uma busca pela diminuição dos materiais, visando uma economia de espaço e de energia, e uma exploração de novos efeitos que ocorrem em escala nanométrica.

O uso de materiais e processos nanométricos está na linha de frente das tecnologias de setores importantes como petróleo e energia por oferecer materiais com propriedades mais avançadas e processos ambientalmente corretos e menos poluidores. Dentre as características apresentadas por estes materiais, como descrito neste estudo, destacam-se maior leveza e resistência mecânica, propriedades antiaderentes e capacidade de auto-reparo. A “Micro e Nano Manufatura” tem demandado grande interesse em setores distintos como industriais e acadêmicos, devido aos benefícios e a diversificação que podem ser alcançados no desenvolvimento tecnológico e econômico.

Esses materiais têm como grande diferencial a possibilidade de potencializar propriedades físicas e químicas em concentrações extremamente reduzidas e conferir características que não eram apresentadas anteriormente por um determinado produto. Faz-se necessário entender que produtos nanotecnológicos não se limitam aos chamados produtos de alta tecnologia, mas englobam todos os produtos que venham a apresentar novas propriedades associadas aos materiais com dimensões nanométricas, ou seja, que se estejam em escala de dezenas de nanômetros.

6. REFERÊNCIAS

ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. Panorama nanotecnologia: Série Cadernos da Indústria ABDI XIX. ABDI, Brasília, 2010.

ACHETE, C. Nanotecnologia: os desafios para metrologia na escala manométrica – Papel do Inmetro. Inmetro: Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://www.pcti.gob.mx/foncicyt/DocumentosInteres/PRESENTACIONES%20DEL%20FORO%20EN%20LO%20S%20CABOS/2-Nanotecnologia-Carlos-Achete.pdf>>. Acesso em: 30 de maio de 2013.

AZEVEDO, Adriana Faria; FERREIRA, Neidenêi Gomes. Filmes de nanodiamantes para aplicações em sistemas eletroquímicos e tecnologia aeroespacial. São Paulo, 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422006000100023#back1> Acessado em 01 de Junho de 2013.

BALDO, C. F. Novos desafios metrológico para o IPT: Metrologia na Bionano manufatura. IPT: São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://www.remesp.org.br/erapido/plugins/erapido.link/download.php?id=2308>>. Acesso em: 30 de maio de 2013.

CAO, Guozhong. Nanostructures and Nanomaterials: Synthesis, Properties, and Applications. Imperial College Press, London, 2004.

FIORINO, Daniel J. Voluntary Initiatives, Regulation, and Nanotechnology Oversight: Charting a Path. Project on Emerging Nanotechnologies is supported. Disponível em: <<http://www.nanotechproject.org/process/assets/files/8347/pen-19.pdf>> Acessado em 28 de maio de 2013.

GUAZZELLI, Maria José, PEREZ, Julian. Nanotecnologia - A manipulação do invisível. CV Artes Gráficas Ltda. São Paulo, 2009.

INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Pedidos de Patentes em Nanotecnologia. Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www.inpi.gov.br/portal/artigo/publicacoes>> Acessado em: 26 de Maio de 2013



KUZNETSOV, O. Serviços Metrológicos para Nanotecnologias. INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia. Divisão de Metrologia de Materiais (DIMCI/DIMAT). 2010. Disponível em: <http://www.desenvolvimento.gov.br/arquivos/dwnl_1296154518.pdf> Acessado em 29 de maio de 2013

MARANHÃO, C.; SILVA, L. R.; DAVIM, J. P. Comportamento mecânico na microusinagem do aço AISI 4140: Simulação numérica com validação experimental. *Ciência e Engenharia*, Vol. 21, n. 2, p. 28, 2012. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/14852/11278>>. Acesso em: 30 de maio de 2013.

MILANEZ, A. Microextrusão de peças aplicadas a materiais ferrosos e não ferrosos. 126 f. Tese (Doutor em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/49352/000835353.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 19 de maio de 2013.

MORETTI, L. Nanotecnologia da pesquisa à empresa. *Manufatura em foco*. Florianópolis, edição de 15/07/2012. Disponível em: <<http://www.manufaturaemfoco.com.br/nanotecnologia-da-pesquisa-a-empresa>>. Acesso em: 15 de maio de 2013.

NANOTECHPROJECT - Project on Emerging Nanotechnologies. Disponível em: <<http://www.nanotechproject.org>> Acessado em: 29 de maio de 2013.

SAMPAIO, L. D. Por dentro de uma fábrica de chips. *Tecmundo*. Paraná, edição de 2 de Março de 2010. Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/hardware/3749-por-dentro-de-uma-fabrica-de-chips.htm>>. Acesso em: 30 de maio de 2013.

SANDVIK. Guia do usuário: Corte e Canais. Sandvik: Suécia, 2008. Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/pt-pt/c-1029-055.pdf>>. Acesso em: 30 de maio de 2013.