

NANOPARTÍCULAS CERÂMICAS: PROPRIEDADES, APLICAÇÕES E IMPLICAÇÕES

¹Mitzi Hass Wakamatsu,^{1,2}Rafael Salomão

1) Universidade Federal do ABC,
Programa de Pós-Graduação em Nanociências e Materiais Avançados
Rua da Catequese, 242 CEP 09190-370 Santo André, SP

2) Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Materiais
Avenida Trabalhador São-carlense, 400 CEP 13560-970 São Carlos, SP
rsalomao@sc.usp.br

RESUMO

As principais vantagens do uso de nanopartículas cerâmicas (NPC) em produtos e processos decorrem de sua elevada estabilidade química (quando comparadas a outras classes de nanopartículas), de suas rotas de síntese bem conhecidas e, de forma geral, de seu custo acessível. A combinação dessas vantagens técnicas com o grande investimento em pesquisa e desenvolvimento observado na última década resultou em um significativo aumento no número de patentes e publicações nessa área. No entanto, recentemente, diversos trabalhos baseados em eco-toxicologia, ética e implicações sociais dessas tecnologias têm apontado riscos e impactos potenciais associados a seu uso. Em relação às NPC, suas amplas possibilidades de utilização, motivaram diversas pesquisas em relação à sua toxicidade e persistência ambiental. O presente trabalho apresenta uma análise crítica em relação a diversas classes de nanopartículas utilizadas como matérias primas cerâmicas, desde sua síntese, propriedades, aplicações, até a necessidade de regulamentação.

Palavras-chave: nanopartículas cerâmicas, nanotecnologias, inovação, toxicidade, degradação ambiental.

1 Introdução

"Nanopartícula" é um termo empregado para designar qualquer porção sólida da matéria em que pelo menos uma de suas dimensões esteja na escala nanométrica (≤ 100 nm). Este valor arbitrário representa o valor limite em que as propriedades e características se diferem do mesmo material na forma *bulk*, em virtude da presença de efeitos de superfície. Estes efeitos de superfície estão relacionados por dois

importantes aspectos: i) a superfície do material apresenta diferenças na forma em que os átomos e moléculas se combinam e ii) em nanopartículas, uma grande porção do material se comporta como superfície ⁽¹⁻³⁾. Desta maneira, torna-se importante estabelecer uma visão crítica sobre o desenvolvimento e uso de nanopartículas. Estes desenvolvimentos e aplicações serão descritos nas seguintes seções.

Produtos e processos que contêm nanopartículas adicionadas em sua composição receberam investimentos profusos durante a última década. Apesar das dificuldades em se compilar dados do governo e de instituições privadas para pesquisa e desenvolvimento, o mercado para produtos baseados em nanotecnologia foi estimado em 10-20 bilhões de dólares para 2010 ⁽⁴⁻⁷⁾. O uso de nanopartículas também é crescente, como ilustrado pelo número de patentes no mundo registradas entre 1990 e 2009 (Figura 1; palavras-chave usadas para esta busca de patentes: nanopartículas, nanobastões, nanofios, nanocristais, nanotubo e nanotubo de carbono).

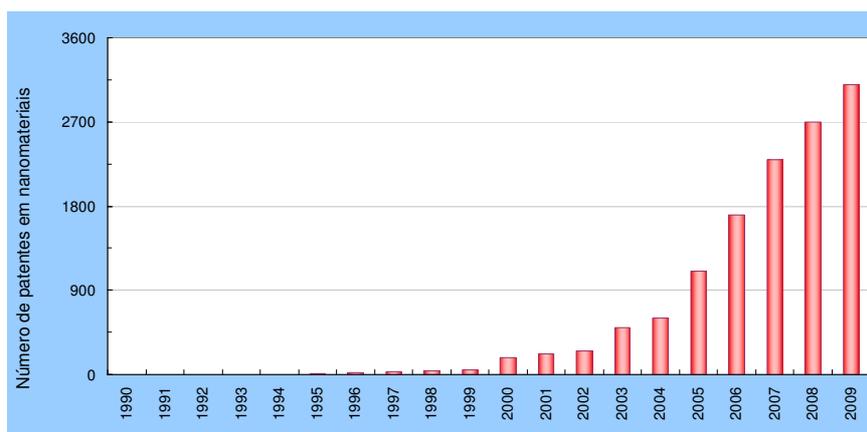


Figura 1: Evolução do número de patentes em nanomateriais.

Entre alguns tipos de nanopartículas, aquelas baseadas em materiais cerâmicos (NPC) receberam atenção significativa. Comparadas a outras classes de nanopartículas, as NPCs tendem a ser altamente estáveis comparadas às metálicas. As rotas de síntese das NPCs estão bem estabelecidas e são relativamente baratas ⁽³⁾. Nas últimas décadas, o desenvolvimento de produtos e processos contendo NPCs gerou novas aplicações para estes materiais. Alguns exemplos são apresentados na Tabela 1 ⁽⁸⁻¹³⁾.

Ainda mais recentemente (por volta de 2002, especialmente na Comunidade Europeia e no Japão), programas de pesquisa baseados em toxicologia, ecotoxicologia,

ética e percepção pública da ciência e tecnologia expressaram uma crescente preocupação em relação aos potenciais benefícios que algumas das aplicações das nanopartículas anunciavam possuir. Até o momento, benefícios descobertos em condições de laboratório podem não ser reproduzidos em escala comercial. Da mesma forma, preocupações têm sido observadas sobre o uso abusivo da palavra "nano" tanto em rotulagem quanto em solicitações de fundos de pesquisa. Finalmente, foi observado o imenso potencial destes materiais em impactos ao meio ambiente e à saúde humana. Em razão de uma ampla gama de aplicações, nanopartículas de carbono têm sido extensivamente estudadas sob estes novos aspectos e diversos efeitos prejudiciais e inesperados foram observados, como alta toxicidade e persistência ambiental ^(5,7,14).

Tabela I: Aplicações de nanopartículas cerâmicas.

| | Matéria prima | Partícula (nm) | Aplicação |
|------------|--|----------------|---|
| Óxidos | Al ₂ O ₃ , Al(OH) ₃ | 200–10 | Ultra-polimento, reforço mecânico em compósitos, ligante cerâmico para refratários, catálise, estabilizante para espumas |
| | MgO / Mg(OH) ₂ | 200–80 | Produção de etanol, agente anti-chama para polímeros, suporte para produção de nanotubos de carbono |
| | SiO ₂ , microssférica | 300–50 | Agente ligante para fibras de celulose em papel, clarificante de águas, agente antiestático para filmes poliméricos, construção civil |
| | TiO ₂ (rutile), ZnO | 100–5 | Pigmento branco, filtro solar |
| | TiO ₂ (anatase) | 200–10 | Semicondutores, catálise, superfícies "auto-limpantes", barreira hidrofóbica e bactericida |
| | ZrO ₂ , CeO ₂ | 100–20 | Células a combustível e de hidrogênio |
| | Argilas | 300–100 × 1–10 | Catálise, dosagem controlada de fármacos, nanocompósitos, tintas, perfuração de poços, agente barreira em filmes poliméricos |
| Não-óxidos | Negro-de-fumo | 200–50 | Pigmento (preto), reforço em borrachas, tintas |
| | Grafite expandido | 300–100 × 1–50 | Pigmento (preto), lubrificante para altas temperaturas, precursor do grafeno |
| | Grafeno | 300–100 × 0.5 | Semicondutores, reforço mecânico |
| | Nanotubos/fulerenos | 1,000 × 5, 1 | Condutor, semicondutor, lubrificante, reforço mecânico, sensores |
| | Diamante e SiC | 500–50 | Ultra-polimento, revestimentos superficiais |

2 Conceitos fundamentais em nanopartículas cerâmicas

Inicialmente, é importante mencionar que as propriedades de materiais podem mudar (em alguns casos, ajustadas ou projetadas) quando seu tamanho oscila em torno de valores próximos a 100 nm. Este valor arbitrário foi escolhido, pois, nesta faixa, os primeiros sinais de "efeitos de superfície" e as propriedades incomuns encontradas em nanopartículas costumam ocorrer e estão diretamente relacionados ao tamanho destas partículas.

A superfície de materiais é aceita como um maior e mais importante defeito do material. Ela representa uma interrupção repentina na regularidade do arranjo cristalino,

causando reorganização dos átomos devido à falta de átomos vizinhos ou números de coordenação menores. Estes átomos ou moléculas apresentam ligações livres ou insatisfeitas e estão sob forças internas direcionadas, reduzindo a energia de ligação interatômica ou intermolecular e as distâncias, comparando-as àquelas encontradas entre os átomos do *bulk* e moléculas. Os efeitos de superfícies afetam as primeiras dezenas de camadas atômicas abaixo da superfície, conhecida como "região de superfície", mostrada esquematicamente na Figura 2 ^(1,2,8). Suas consequências sobre as características dos materiais envolvem maior densidade atômica, menor energia de ativação para reações físico-químicas (fusão, vaporização, dissolução, difusão e oxidação), variações na energia de superfície (consequentemente na molhabilidade) e propriedades termo-mecânicas, eletromagnéticas e óticas distintas.

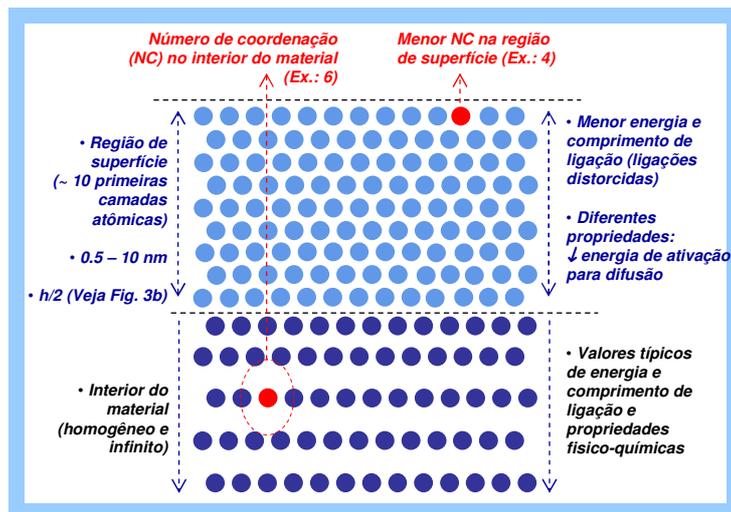


Figura 2: Representação do arranjo cristalino próximo à superfície de um material.

Para certa porção da matéria, o teor volumétrico da região de superfície (\varnothing_{Sup}) pode ser calculado como mostram as Figuras 3a e 3b. A Figura 4 descreve a dependência da \varnothing_{Sup} no tamanho da partícula. Em uma micro - ou macropartícula, os efeitos de superfície não são relevantes pois o parâmetro \varnothing_{Sup} é muito pequeno e outros efeitos, como densidade, são mais pronunciados. Entretanto, como o tamanho das partículas é reduzido à nanoescala (utilizando-se 100 nm como limite prático), o volume ocupado por uma dezena de camadas atômicas se torna relevante e os valores de \varnothing_{Sup} se tornam significativos (aproximadamente 90%_{vol}, ver Figura 4).

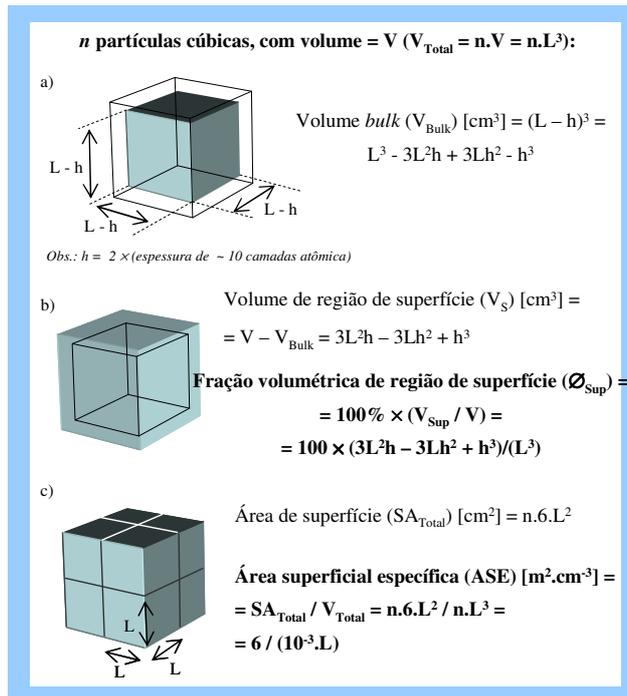


Figura 3: Relações utilizadas nos cálculos de volume e área superficial.

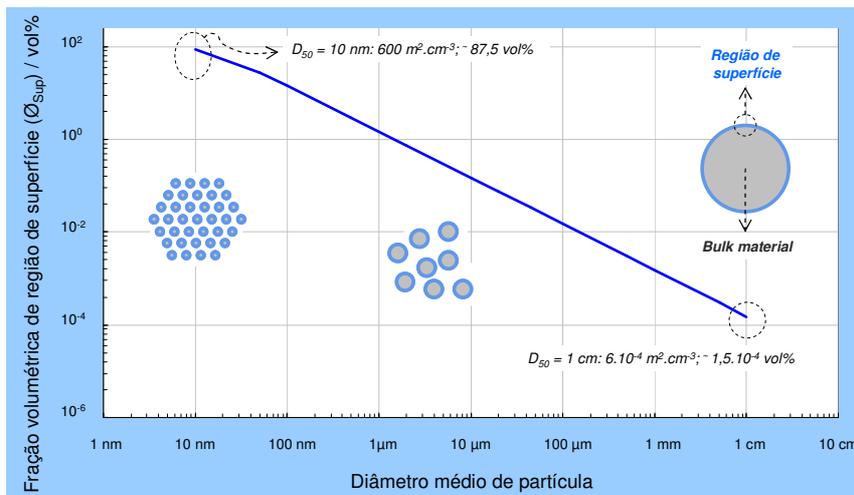


Figura 4: Variação da fração volumétrica de região de superfície com o tamanho médio da partícula.

Nanopartículas combinam altos valores de ϕ_{Sup} com outro aspecto geométrico importante: sua imensa área superficial específica (SSA). A área superficial específica pode ser definida como a área superficial total (usualmente dada em metros quadrados) que uma determinada porção de material (massa, grama ou volume, cm^3) apresenta. A área superficial específica pode ser calculada utilizando-se o tamanho médio da partícula e a densidade real assumindo que estas partículas sejam perfeitamente

esféricas ou medidas por métodos de absorção, como BET (designado de acordo com ⁽¹⁵⁾). Nanopartículas podem apresentar valores significativos de $10\text{--}1,000\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ dependendo do tamanho e forma. Como a maioria das reações químicas ocorre na superfície, as nanopartículas apresentam uma reatividade muito maior do que o mesmo material na forma bulk ⁽³⁾.

A dependência da área de superfície específica com o tamanho de partícula pode ser demonstrada considerando-se que: a) A superfície das partículas seja uniforme e livre de defeitos; b) Todas as partículas tenham o mesmo tamanho e forma; c) Que sejam simétricas (cubos ou esferas) (Figura 3). A menor área de superfície específica que uma certa porção do material com um certo volume pode assumir é em uma esfera. Se o volume V for dividido em duas esferas menores, cada uma com um volume $V/2$, a soma da área de superfície específica dessas duas esferas será maior que a área de superfície específica de uma única esfera. A Figura 5 descreve a dependência da área de superfície específica no tamanho de partícula baseada nas fórmulas apresentadas na Fig 3c.

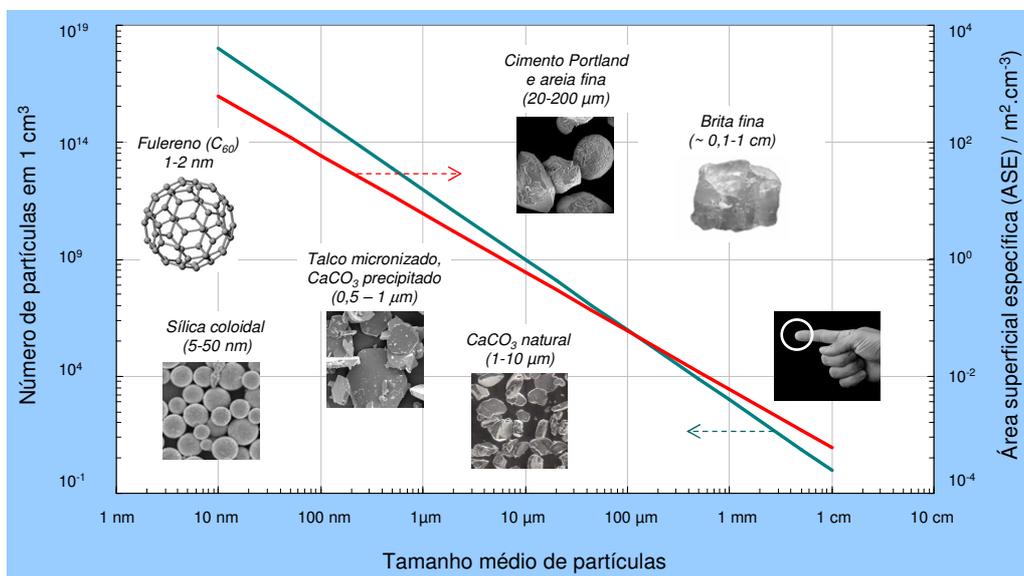


Figura 5: Variação do número de partículas e área superficial em função do tamanho médio de partículas

É importante mencionar que na realidade partículas cerâmicas normalmente apresentam defeitos como poros e fissuras na superfície, sendo altamente

assimétricas. Além do efeito geométrico de redução de tamanho, estes defeitos podem aumentar ainda mais a área de superfície específica.

Características de NPCs como tamanho, forma, distribuição de tamanho de partícula, hábito cristalino, estado de aglomeração ou dispersão são definidos ao longo da síntese. Entretanto, a compreensão de alguns métodos que podem ser utilizados para sintetizar NPCs (sendo que algumas nanopartículas podem ser produzidas de forma não-intencional, tais como poluentes a base de carbono) é fundamental para que se entenda os potenciais riscos tóxicos destes materiais, tanto à saúde humana quanto ao meio ambiente. Há uma ampla gama de métodos para produzir NPCs, que são normalmente divididos em dois grupos: Primeiro, o método conhecido como *top-down*, que ocorre quando uma porção do material é reduzido em várias unidades menores; o segundo é conhecido como *bottom-up*, quando átomos e moléculas são arranjados de maneira controlada para formar partículas ⁽³⁾.

Uma das operações mais utilizadas no processamento de cerâmicas, conhecida como moagem, é o principal exemplo de método *top-down* e tem sido descrita como inadequada na produção de nanopartículas. Mesmo quando processos de alta energia como *jet-milling* são empregados, raramente partículas de tamanho abaixo de 200 nm são obtidas, apesar do grande gasto de tempo e energia. Tal fato ocorre pois uma crescente demanda de energia é necessária para cominuição quando o tamanho de partícula é reduzido. Este tipo de processo resulta normalmente em partículas com arestas afiadas, uma ampla distribuição de tamanho e com uma alta concentração de defeitos (fissuras e impurezas). Contrariamente, técnicas *bottom-up* - baseadas em reações químicas - geram partículas com hábitos cristalinos e distribuição de tamanhos diferentes e controlados, além de serem praticamente livre de defeitos. Exemplos de ambos processos são apresentados na Tabela 2.

Os conceitos de suspensões estabilizadas, suspensões coloidais, empacotamento de partículas e dispersão têm um papel fundamental na síntese de NPCs, uma vez que a maioria das sínteses são conduzidas em meio líquido. Devido a alta área superficial específica e à instabilidade termodinâmica, NPCs tendem a formar fortes aglomerados, que são dificilmente desfeitos. Além do mais, a adsorção de

moléculas orgânicas nas superfícies das NPCs podem ser utilizadas para moldar seu tamanho e para controlar a distribuição de tamanho.

Tabela 2:

| | Método | Material | Características das partículas |
|-----------|----------------------------------|---|--|
| Topdown | Moagem de alta energia, jet-mill | Praticamente qualquer material cerâmico | Geralmente, não menor que 200 nm, distribuição de tamanho de partícula aberta, elevadas contaminação e geração de defeitos |
| Bottom-up | Pirólise | Negro-de-fumo, nanotubos, fulerenos | 10–200 nm, larga distribuição de tamanho de partícula, pouco controle morfológico |
| | Precipitação controlada | Alumina, sílica, boehmita (AlO(OH)) Mg(OH) ₂ , Al(OH) ₃ | 2–100 nm, bom controle de morfologia, alta pureza |
| | Deposição de vapor | Nanotubos, sílica | 1–100 nm, bom controle de morfologia |
| | Método sol-gel | Alumina, ZrO ₂ , SnO ₂ , TiO ₂ , ZnO | 1–100 nm, bom controle de morfologia, média pureza |

3 Funcionalidade

As propriedades de um material advêm geralmente de três fatores: primeiro, da composição química (tipos de átomos e moléculas encontrados no material, por exemplo, Fe, C, SiC, Al₂O₃ e moléculas poliméricas); segundo, a microestrutura (a maneira como estão organizadas, como exemplo, a estrutura cúbica de face centrada - CFC, estrutura amorfa, fibras, contornos de grão) e o terceiro fator está relacionado à forma (tamanho e aspecto; exemplos: partículas, fibras, *bulk*). Para materiais *bulk*, a forma tem uma contribuição menor. Considerando exemplos em materiais cerâmicos: i) as extremidades de uma fissura têm um grande impacto na perda de resistência mecânica de elementos de carbetto de silício sinterizados, mas não muda significativamente a densidade real de um único cristal micrométrico; ii) a condutividade térmica de um tijolo de alumina pode ser reduzida na presença de poros, mas não modifica a condutividade térmica da alumina. Não obstante, para nanopartículas, o tamanho e a forma tornam-se uma importante força motora na mudança de propriedades^(3,10). Enquanto novos métodos de processamento surgirem e exercerem um controle cada vez mais preciso no nível de organização molecular, a morfologia de materiais se tornará cada vez mais significativa.

Dentre alguns exemplos clássicos da dependência das propriedades em relação ao tamanho e à forma, pode-se citar o caso do ouro. Na forma *bulk*, o ouro é inerte,

mas quando se apresenta com um tamanho de partícula entre 2 - 5 nm, torna-se altamente reativo e encontra importantes aplicações em catálise ⁽¹⁶⁾. Analogamente, em materiais cerâmicos: a sílica na escala microscópica (areia, por exemplo) é, geralmente, altamente cristalina, inerte e praticamente insolúvel na maioria dos compostos químicos. Por outro lado, sílica coloidal com um diâmetro entre 10 e 100 nm torna-se um importante aglutinador para sistemas refratários e fibras de papel em razão de sua habilidade em formar gel amorfo ⁽¹⁷⁾. Em outro caso, conhecido como um dos materiais mais moles (razão em ser utilizado como lubrificante), o grafite dá origem a um material de camada simples conhecido como grafeno, que apresenta excelentes propriedades mecânicas, quando reduzido à nanoescala ⁽¹²⁾. Também como exemplo, pode-se citar a segregação de fase: devido ao fato de que nanopartículas formam facilmente cristais únicos e apresentam baixa energia de ativação para difusão, impurezas e defeitos são prontamente expulsos do interior à superfície do material, tornando operações de dopagem mais difíceis, embora favoreça a purificação ⁽³⁾.

Em todos os casos, pode-se observar que a composição química destes materiais é idêntica; os diferentes tamanhos e estados físicos (materiais *bulk* ou nanopartículas) são responsáveis pelas novas propriedades químicas, o que sugere que tanto o tamanho quanto a forma de NPCs são fatores determinantes para uma melhor compreensão destes comportamentos.

Considerando vários outros aspectos, tais como tamanho e composição, a forma com que um certo tipo de partícula se comporta em ambientes diferentes é conhecida como funcionalidade ⁽⁷⁾. Primeiramente, a funcionalidade envolve certas características que podem ser avaliadas por técnicas de laboratório convencionais (área superficial específica, distribuição de cargas na superfície ou potencial Zeta, tendência em aglomerar ou dissolver sob diferentes valores de pH, condutividade iônica). Por outro lado, determinadas características requerem análises mais complexas e de longo prazo, como toxicidade, persistência ambiental e biodisponibilidade. Exemplos dos efeitos da funcionalidade das NPCs (uma vez que estes efeitos não foram observados em partículas microscópicas dos mesmos materiais) envolvem: a) nanotubos de carbono: riscos de bioacumulação em tecidos moles, incluindo pulmões, coração, rins, órgão reprodutores e cérebro, danos no DNA de células pulmonares ⁽²⁸⁾; b) ZnO e TiO₂:

reações alérgicas devido à inalação e contato com a pele; c) negro de fumo: formação de depósitos de colesterol ⁽¹⁸⁻²⁷⁾.

4 A urgente necessidade de regulamentação

A regulamentação pode ser entendida como regras e protocolos criados a fim de promover o uso e o desenvolvimento seguros de NPCs e outras nanotecnologias, além de descrições detalhadas sobre órgãos institucionais e associações responsáveis pela implementação, supervisão e atualização ⁽¹⁴⁾. Este assunto deve ser tratado considerando as muitas questões técnicas em aberto. 1) A fim de apoiar as conclusões dos autores, experimentos ecotoxicológicos foram realizados em ambientes controlados, porém não se avaliou as consequências desta situação em um ambiente real, como um lago ou rio onde a água continuamente sofre mudanças de pH, composição e temperatura. 2) Várias partículas cerâmicas (micropartículas e nanopartículas) têm sido utilizadas como matérias-primas para várias aplicações que envolvem intencionalmente (ou não) o contato com organismos vivos, por exemplo em pigmentos, agentes tixotrópicos para correção de viscosidade (em alimentos, cosméticos e medicamentos) e lubrificantes. Há possibilidade de estas partículas serem acidentalmente introduzidas em organismos vivos/meio ambiente. 3) Em concentrações baixas, a maioria das técnicas convencionais de caracterização, tais como DRX, MEV, TGA e FTIR dificilmente pode detectar nanopartículas, no entanto, mesmo em doses muito pequenas, elas são capazes de produzir efeitos nocivos, como visto anteriormente. Outras questões que exigem respostas ainda mais subjetivas e interdisciplinares seriam necessárias para uma combinação de conhecimentos de diferentes áreas, tais como ética, ecologia, biologia e ciências dos materiais.

A urgência de regulamentação se sustenta por dois pontos principais. Em primeiro lugar, o número de patentes e volume de produtos baseados em nanotecnologia cresceu exponencialmente nos últimos cinco anos (desde 2004) ^(3-7, 14); em segundo, tal como outras tecnologias que hoje são conhecidas por apresentarem efeitos colaterais deletérios (por exemplo, amianto e silicose, combustão de motores e poluição atmosférica), a nanotecnologia está chegando a um ponto sem retorno em que

seu uso pode causar o dilema da tecnologia de controle proposto por David Collingridge em 1980: Nos estágios iniciais de uma nova tecnologia, não se sabe o suficiente para se criar um controle adequado sobre os riscos potenciais envolvidos; por outro lado, quando os problemas surgem, os benefícios da tecnologia estão muito bem estabelecidos para serem alterados sem grandes rupturas ^(7, 29).

Apesar da complexidade do tema, as soluções para os dilemas envolvidos na regulamentação das nanotecnologias devem ser localmente pensadas e levar em conta a legislação, cultura e valores de cada país. A apresentação de respostas definitivas, infelizmente, está muito além do escopo deste trabalho, mas, certamente, as sugestões abaixo podem ser úteis: 1) Incentivo de debates públicos que envolvam riscos e benefícios dos produtos e processos que envolvem as nanotecnologias. 2) Nanopartículas de cerâmica não devem ser manuseadas, armazenadas e eliminadas simplesmente da mesma forma como os seus equivalentes na forma micrométrica. Certifique-se que as instruções de segurança de produtos e equipamentos de proteção estejam sendo seguidas quando se trata de nanopartículas de cerâmica (ou quaisquer outras nanopartículas ou produtos químicos em geral). 3) Ser consciente sobre os produtos e matérias-primas contendo nanopartículas de cerâmica comprados. 4) Informar as autoridades políticas, gestores e diretores sobre a organização política em novas tecnologias e suas potenciais implicações na saúde, ética, economia e meio ambiente.

Referências

- [1] **Hiemenz, P.C., Rajagopalan R.:** Principles of colloidal and surface chemistry. Marcel Dekker, Inc., New York 1997, 1–20, 78, 338
- [2] **Cao, G.:** Nanostructures & Nanomaterials. Imperial College Press, London 2004, 1–5, 15–22, 34, 65–75
- [3] **Rao, C.N.R., Müller, A., Cheetham, A.K.:** The chemistry of nanomaterials: synthesis, properties and applications, vol. 1. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim 2004, 1–10, 17–27, 94–110
- [4] **Pitkethly, M.J.:** Materials Today **7** (2004) [1] 20–29
- [5] **Pitkethly, M.J.:** Nano Today **2** (2007) [2] 6
- [6] **Pitkethly, M.J.:** Nano Today **3** (2008) [3] 6
- [7] **Royal Commision on Environmental Pollution:** Twenty-seventh report – Novel materials in the environment: the case of nanotechnology. Crown Copyright 2008, 1–54
- [8] **Burchell, T.D.:** Carbon materials for advanced technologies. Pergamon Press (1999) 139, 142
- [9] **O'Connel, M.J.O.:** Carbon nanotubes: properties and application. CRC Press (2006) 19–25
- [10] **Hosokawa, M., Nogi, K., Naito, M., Yokoyama, T.:** Nanoparticle Technology Handbook. Elsevier 2007, 5–30, 423, 606. ISBN: 978-0444531223
- [11] **Nohynek, G.J.:** Skin Pharmacology and Physiology [S.I.] **21** (208) [3] 136–149

- [12] **Taghioskoui, M.:** *Materials Today* **12** (2009) [10] 34–37
- [13] **Ando, Y., Zhao, X., Sugai, T., Kumar, M.:** *Materials Today* **7** (2004) [10] 22–29
- [14] **Miller, J.C., Serrato R.M., Represas-Cardenas, J.M., Kundahl, G.A.:** *The handbook of nanotechnology: business, policy and intellectual property law.* John Wiley & Sons, New York 2005, 41–50, 115–125, 189–200
- [15] **Brunauer, S., Emmett, P.H., Teller, J.:** *J. Am. Chem. Soc.* **60** (1938) 309
- [16] **Bond, G.:** *Gold Bull.* **41** (2008) [3] 235
- [17] **Iler, R.K.:** *The chemistry of silica: solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistru.* John Wiley & Sons, New York 1979, 305–320
- [18] **Adams, L. K., Lyon, D. Y., Alvarez, P. J. J.:** *Water Research* **40** (2006) [19] 3527–3532
- [19] **Franklin, N. M., Rogers, N. J., Apte, S. C., Batley, G. E., Gadd, G. E., Casey, P. S.:** *Environmental Science & Technology* **41** (2007) [24] 8484–8490
- [20] **Sayes, C. M., Reed, K. L., Warheit, D. B.:** *Toxicological Sciences* **97** (2007) [1] 163–180
- [21] **Karlsson, H. L., Cronholm, P., Gustafsson, J., Moller, L.:** *Chemical Research in Toxicology* **21** (2008) [9] 1726–1732
- [22] **Durnev, A. D.:** *Bulletin of Experimental Biology and Medicine* **145** (2008) [1] 72–74
- [23] **Horie, M., Nishio, K., Fujita, K., Endoh, S., Miyauchi, A., Saito, Y., Iwahashi, H., Yamamoto, K., Murayama, H., Nakano, H., Nanashima, N., Niki, E., Yoshida, Y.:** *Chemical Research in Toxicology* **22** (2009) [3] 543–553
- [24] **Hu, X. K., Cook, S., Wang, P., Hwang, H. M.:** *Science of the Total Environment* **407** (2009) [8] 3070–3072
- [25] **Sharma, V., Shukla, R. K., Saxena, N., Parmar, D., Das, M., Dhawan, A.:** *Toxicology Letters* **185** (2009) [3] 211–218
- [26] **Shvedova, A. A., Castranova, V., Kisin, E. R., Schwegler-Berry, D., Murray, A. R., Gandelsman, V. Z., Maynard, A., Baron, P.:** *Journal of Toxicology and Environmental Health* **66-Part A** (2003) [20] 1909–1926
- [27] **Wang, H. H., Wick, R. L., Xing, B. S.:** *Environmental Pollution* **157** (2009) [4] 1171–1177
- [28] **Zhao, J. X., Xu, L. J., Zhang, T., Ren, G. G., Yang, Z.:** *Neurotoxicology* **30** (2009) [2] 220–230
- [29] **Collingridge, D.:** *The social control of technology.* Francis Printer 1980, citado em (7)

CERAMIC NANOPARTICLES: PROPERTIES, APLICATIONS AND CONSEQUENCES

Abstract

The development of products and processes containing ceramic nanoparticles has generated novel and fascinating applications of these materials in the past decades. In addition to these exciting findings, ceramic nanoparticles tend to be highly stable. Their routes of synthesis are well known and relatively cheap. The combination of technical advantages and profuse investment in research and development increased the number of patents and publications in this area. Even more recently (since 2002), research programs based on toxicology, eco-toxicology, ethics and public perception of nanotechnologies have pointed out potential risks and impacts associated with nanotechnologies. Because of their wide employment, the ceramic nanoparticles extensively have been studied by means of these new approaches and several unexpected hazardous effects such as high toxicity and environmental persistency were observed. This paper aims to report on a critical review of some ceramic nanoparticles used as raw materials, on their synthesis, properties, applications, potentially dangerous effects as well as on the demand of regulation.

Keywords: ceramic nanoparticles, nanotechnologies, innovation, toxicity, environmental degradation.