

ARTIGO

Nanomateriais e a interface entre nanotecnologia e ambiente

Nanomaterials and the interface between nanotechnology and environment

Peter A Schulz

*Universidade Estadual
de Campinas (UNICAMP),
Limeira, SP, Brasil
E-mail: Peter.schulz@fca.
unicamp.br*

RESUMO

Nanomateriais são os principais produtos das nanotecnologias. Neste artigo são descritos alguns desses materiais, em particular os compostos de carbono, suas propriedades, estratégias de manipulação e aplicações. Discute-se também a história das nanopartículas e a complexidade na classificação desses materiais, necessária para sua regulamentação e avaliação de impactos na sociedade.

PALAVRAS-CHAVE: nanomateriais, nanopartículas, nanotoxicidade, história da nanotecnologia.

ABSTRACT

Nanomaterials are the main products of nanotechnology. In this paper we describe some of these nanomaterials, particularly Carbon based systems, their properties, manipulation strategies and applications. History of nanoparticles, as well as the complexity in defining nanomaterials, necessary for regulation and assessment of impacts on society, are also addressed.

KEYWORDS: nanomaterials, nanoparticles, nanotoxicity, history of nanotechnology.



Introdução

Nanotecnologia é uma das tecnologias emergentes das últimas décadas, junto com a biotecnologia, tecnologias da informação e, mais recentemente, biologia sintética. Acostumados com um mundo dividido em disciplinas e profissões, que pouco mudaram em essência durante gerações, o súbito advento de uma nova ciência ou tecnologia provoca expectativas de todos os tipos e calibres, que também precisam ser entendidas tanto quanto a sua causa. Essas expectativas levantam discussões que podem modificar o curso do desenvolvimento da nova tecnologia, bem como reavaliar a relação da sociedade com as atividades baseadas em tecnologias mais antigas. À parte dos aspectos mais técnicos que deverão ser objeto do presente artigo, uma melhor percepção da complexidade em torno de uma nova tecnologia constitui já um legado importante da nanotecnologia¹.

Entre as expectativas inicialmente exageradas encontravam-se as previsões do mercado para nanotecnologias, que na virada do século XXI prognosticavam valores superiores a 1 trilhão de dólares para 2015². Esses valores excluem o mercado de semicondutores, que é um caso à parte, pois a microeletrônica, que já é nanoeletrônica com a redução contínua dos dispositivos nos chips, hoje já tem componentes com apenas 22 nanômetros. Voltando às nanotecnologias e excluindo os semicondutores, ao longo dos últimos anos revisões mais realistas abaixam esses números para 49 bilhões de dólares para 2017, sendo os nanomateriais responsáveis por 37 desses bilhões, segundo relatório NANO31E apresentado pela BBC research em setembro de 2012³.

Assim, nanomateriais continuam dominando a agenda da nanotecnologia; para discutir esse legado, começaremos por uma definição de nanomateriais acordada recentemente (2011) pela Comissão Europeia⁴:

“Um material natural, incidental ou manufaturado contendo partículas não ligadas entre si ou em agregados ou formando aglomerados nos quais a distribuição de tamanho apresenta 50% ou mais dessas partículas com uma ou mais dimensões externas no intervalo entre 1 nm e 100 nm. Em casos específicos e justificados por preocupações ambientais, saúde, segurança ou competitividade, o limiar de 50% na distribuição de tamanho pode ser substituído por um limiar entre 1% e 50%”.

O detalhamento dessa definição é em si uma ementa de todo o tema, como será brevemente discutido a seguir.

Nanomateriais naturais, incidentais e manufaturados

São considerados nanomateriais os que são constituídos por partículas ou aglomerados delas com distribuição de tamanho que apresente uma fração considerável de partículas com uma ou mais dimensões no intervalo entre 1 nanômetro (1 nm = 1 bilionésimo de metro) e 100 nm. É importante observar que a nanotecnologia, ou seja, uma tecnologia que manipula de maneira controlada a matéria nessa escala, relaciona-se diretamente apenas aos nanomateriais manufaturados, projetados para te-

rem estruturas relevantes para suas propriedades na escala de nanômetros. Por outro lado, o meio ambiente sempre interage com nanopartículas naturais (fuligem, cinzas vulcânicas ou fios de teias de algumas espécies de aranha), e a sociedade humana também contribui há muito tempo com nanopartículas incidentais, produzidas como subprodutos não intencionais de outros processos (como as liberadas pelos escapamentos de automóveis). Assim, é relevante mencionar que o desenvolvimento da síntese, controle e caracterização de nanopartículas manufaturadas permite melhorar a estimativa também da presença e impacto das nanopartículas naturais e incidentais.

Essa manipulação controlada na escala nanométrica busca propriedades e características que não poderiam ser obtidas de outra forma. Esse aspecto é o que busca validar a nanotecnologia como uma área do conhecimento para além da definição pura do objeto a partir de suas dimensões.

Na definição dada pela Comissão Europeia é mencionado que as partículas ou seus aglomerados precisariam ter uma ou mais dimensões entre 1 nm e 100 nm, incluindo, portanto, não apenas partículas propriamente ditas, mas também fios com diâmetros nanométricos, películas com espessuras nessa escala ou superfícies com estruturas ou poros com essas dimensões. Desse modo são nanomateriais tanto vidros coloridos devido à presença de nanopartículas de cobre, produzidos já na idade do bronze, até os modernos microprocessadores deste século, basicamente películas de silício com estruturas em escala de poucas dezenas de nanômetros compondo os ainda chamados microcircuitos.

Um pouco de história

A história de uma tecnologia emergente é durante um tempo mal contada, e com a nanotecnologia não foi (não é) diferente⁵. Alguns marcos históricos são artificialmente criados, como a hoje famosa palestra do físico Richard Feynman, proferida em 1959, no Caltech, intitulada “There is plenty of room in the bottom”. Vale a pena ler a transcrição e, de fato, ela parece a premonição de um gênio, mas sua real influência é contestada; esquecida por mais de vinte anos, começou a ser mencionada como uma validação *a posteriori* de uma área do conhecimento ainda em construção, como discutido por diversos autores, como Chris Toumey⁶ e Richard Jones⁷. Apesar dessa revisão crítica, a palestra de Feynman ainda é frequentemente mencionada de forma acrítica como o nascimento da nanotecnologia.

Mas a história de abordagens efetivas para instituir uma nanotecnologia está fortemente relacionada com o desenvolvimento de nanomateriais⁸. Dois marcos são relevantes aqui: a ciência dos colóides e a engenharia molecular, a primeira de meados do século XIX e a segunda de meados do século XX. Começando pela ciência dos colóides, vale lembrar que colóides são sistemas nos quais um ou mais componentes apresentam dimensões dentro do intervalo de 1 nm a 1 µm. Ou seja: basicamente sistemas de nanopartículas. Uma parte in-



teressante dessa história foi construída pelas nanopartículas de prata, como discutido por Nowack, Krug e Height no instigante artigo “120 years of nanosilver history: implications for policy makers”⁹. Nesse trabalho os autores afirmam e documentam que nanopartículas de prata “já estavam disponíveis comercialmente há 100 anos, tendo sido usadas em produtos com aplicações tão diversas como pigmentos, fotografia, tratamento de feridas, compósitos condutores, catalisadores e germicidas”. Nesse mesmo trabalho foi levantado que já em 1889 havia sido reportada a síntese de prata coloidal por um método que produzia partículas com diâmetros entre 7 nm e 9 nm, bem como a primeira patente com “nanoprata”, que remonta a 1954.

O segundo marco histórico relevante é dois anos mais novo do que essa patente precursora em nanotecnologia. O físico do MIT (Massachusetts Institute of Technology) Arthur Von Hippel publicou em 1956 o artigo *Engenharia Molecular*, no qual sugere que “em vez de tomarmos materiais pré-fabricados e tentar encontrar aplicações de engenharia para eles, consistentes com suas propriedades macroscópicas, podemos construir materiais a partir de átomos e moléculas para um fim desejado... [o engenheiro] pode jogar xadrez com partículas elementares de acordo com regras pré-estabelecidas, até que novas soluções de engenharia tornem-se aparentes”. É a própria definição de nanotecnologia, mas Von Hippel vai além, propondo sua realização institucional: “o que estamos tentando criar como resposta para essa situação são laboratórios verdadeiramente interdepartamentais (ou seja, interdisciplinares, palavra ainda pouco usada na época) para a ciência e engenharia moleculares”. Essa proposta de Von Hippel insere-se no que foi sugestivamente chamado por Hyungsub Choi e Cyrus Mody de “A longa história da eletrônica molecular: a origem microeletrônica da nanotecnologia”¹⁰.

Alguns nanomateriais e suas propriedades

Um exemplo da história das nanopartículas de prata e seus usos é um caso interessante para discutir a obtenção e algumas propriedades de nanomateriais. A ação de uma dada quantidade de material é aumentada se ela for dividida em porções cada vez menores, aumentando a razão entre a área e o volume do material. Um cubo com uma aresta de 1 centímetro tem o volume de 1 cm³ e uma área de 6 cm². Se o material que constitui o cubo for dividido em pequenos cubos de 100 nm de aresta, teremos o mesmo volume total, mas a área total de exposição, somados todos os nanocubos, será de 60 m², que representa uma área de contato com o ambiente da mesma quantidade de material 100 mil vezes maior. Nanopartículas com 10 nm de diâmetro têm 30% de seus átomos na superfície! Se esse material for um germicida como a prata, por exemplo, quando dividido em nanopartículas, a ação será muito mais efetiva do que a mesma quantidade de material distribuída em partículas maiores. Processos físicos e reações químicas tornam-se mais rápidos e eficientes. Além disso, fenômenos que não acontecem em porções maiores podem pas-

sar a acontecer em dimensões nano, chamados de fenômenos emergentes. Alguns desses fenômenos emergentes originam-se na manifestação de fenômenos quânticos nessas dimensões, mas esse aspecto, muitas vezes sobrevalorizado, será deixado de lado neste artigo. O ouro, por exemplo, quando dividido em nanopartículas muda de cor (a mudança de cor de materiais na forma de nanopartículas às vezes é devido a efeitos quânticos, mas muitas vezes trata-se de um fenômeno puramente clássico) e liga-se quimicamente com materiais biológicos. Essa capacidade de ligação química, principalmente a compostos orgânicos, constitui um dos elementos chave na nanotecnologia de materiais, a chamada funcionalização de nanopartículas.

Uma nanopartícula pode ser funcionalizada quando é ligada a uma molécula que executa uma determinada função, como a de reconhecer outras moléculas. Uma proposta que se tornou conhecida é a de funcionalização de nanopartículas de ferro com moléculas biocompatíveis que reconhecem tecidos cancerosos, fazendo com que as nanopartículas de ferro colocadas dentro do corpo se ligassem a esses tecidos, permitindo ações diagnósticas e terapêuticas na presença de campos magnéticos¹¹.

Nanopartículas são obtidas em geral por síntese química, e alguns exemplos importantes foram obtidos inicialmente quase por acidente. É o caso dos fulerenos, moléculas formadas por algumas dezenas de átomos de carbono formando gaiolas, sendo a mais conhecida a que tem a forma de uma bola de futebol composta de 60 átomos de carbono. Essas moléculas foram identificadas pela primeira vez em 1985 em um experimento de combustão de uma superfície de grafite por meio de um feixe laser intenso. Uma revisão dessa história, bem como uma descrição de aplicações dos fulerenos, pode ser apreciada em artigo de revisão recente¹². Essas moléculas são um dos grandes ícones da nanotecnologia e nanomateriais, pretexto de uma enorme expectativa inicial que, ao longo de mais de vinte anos, se transformou em um panorama mais bem conhecido e ainda muito interessante.

Um dos primeiros passos foi o desenvolvimento de um método de síntese eficiente para produção de “quantidades macroscópicas” dessas moléculas. A maioria das propostas de aplicação ainda são especulativas, incluindo melhoria de células fotovoltaicas e ação germicida, como as veteranas nanopartículas de prata. Várias dessas aplicações envolvem a funcionalização desses fulerenos.

Um parente ilustre dos fulerenos são os nanotubos de carbono, camadas de átomos de carbono enrolados em tubos com diâmetros de poucos nanômetros, descobertos em 1991¹³. A possibilidade de aplicações desses nanotubos é mais promissora e sua produção é mais intensa, com vários produtos já disponíveis no mercado. De fato, o papel de nanotubos de carbono pode ser seguido, diferentemente de outras promessas de nanomateriais, pelo acompanhamento do material de divulgação de empresas de produtos baseados em nanotubos. A sequência de descobertas de variedades alotrópicas do carbono foi novamente perturbada pela síntese de folhas de átomos de carbono, chamado grafeno, Andre Geim e Konstantin Novoselov em 2004, que receberam o prêmio Nobel de Física em 2010 por



essa descoberta¹⁴. Essa, no momento, é a grande nova aposta, com protótipos de telas “touch screen”, eletrodos de baterias, dispositivos eletrônicos e células solares já disponíveis.

O grafeno é uma camada com a espessura de apenas um átomo, na qual os átomos de carbono estão dispostos como se formassem uma colmeia composta de hexágonos, que levou a uma complementação da definição de nanomateriais pela Comissão Europeia: “derrogando o texto acima, fulerenos, flocos de grafeno e nanotubos de carbono, com uma ou mais dimensões externas inferiores a 1 nm devem ser considerados nanomateriais”. Essa camada de átomos apresenta algumas propriedades surpreendentes, como uma excelente condutividade elétrica. Sua síntese é relativamente simples, podendo ser obtido por meios puramente mecânicos de esfoliação dessas camadas, a partir de grafite ultrapuro. Técnicas de nanolitografia, desenvolvidas no contexto da indústria microeletrônica, permitem “desenhar” dispositivos e circuitos diversos nessas folhas de átomos de carbono. Já se pode falar de um mercado emergente para o grafeno com centros produtores em várias regiões do mundo, como pode ser verificado em buscas pela web¹⁵. Apesar desse cenário promissor, é importante frisar que não está claro ainda quanto esse material irá se impor em aplicações que de fato dominem o mercado, como as revisões desse mercado, mencionadas no início deste artigo, prudentemente sugerem. Por outro lado, é interessante observar também os mecanismos de motivação na pesquisa em vista de um limite intrínseco do grafeno: a ausência de uma lacuna de energias permitidas, característica fundamental dos materiais semicondutores, pedras fundamentais da nanoeletrônica. Desse modo, o uso do grafeno em dispositivos eletrônicos só é possível em arranjos mais complexos e custosos. A solução é tentar gerar essa lacuna por meio de estruturas geométricas, explorando efeitos quânticos ou, então, buscar um novo material que apresente as mesmas características do grafeno, acrescida dessa propriedade fundamental de semicondutores: a lacuna de energia. E tal material existe; trata-se do dissulfeto de molibdênio, que pode se apresentar nessas camadas com um átomo de espessura e é intrinsecamente um semicondutor. Um grupo de pesquisa apresentou em 2011 um transistor baseado em uma monocamada de dissulfeto de molibdênio¹⁶.

A interface entre nanomateriais e o ambiente

O objetivo deste artigo não é exaurir um vasto tema como o desenvolvimento de nanomateriais, mas sim de mostrar alguns exemplos que expõem certos aspectos fundamentais para entender essa área de pesquisa, desenvolvimento e inovação. Os exemplos destacam, em particular, a importância da síntese química desses materiais, muitas vezes esquecida diante do destaque dado a ferramentas de manipulação direta da matéria em escala atômica, como os microscópios de varredura de prova, mas que não “produzem” nanomateriais. A funcionalização de nanopartículas é uma ferramenta importante para o autoarranjo de nanoestruturas, uma das estratégias “bottom up”, enquanto a miniaturização da “nanoeletrônica convencio-

nal” é uma estratégia “top-down”. Detalhamentos sobre essas estratégias podem ser encontrados em livros¹.

É importante voltar uma vez mais à Comissão Europeia quanto aos nanomateriais, que os define em função da presença de partículas com dimensões entre 1 nm e 100 nm. Certamente essa é uma definição arbitrária, pois partículas com um tamanho característico de, por exemplo, 200 nm também podem ser consideradas nano. E na literatura científica, de fato, sistemas com dimensões maiores do que 100 nm são muitas vezes nomeados como nano, sobrepondo-se a outras nomenclaturas como submicron ou, no caso de partículas, com o nome mais tradicional de partículas coloidais, que remonta ao século XIX. Para a comunidade científica tal ambiguidade normalmente não apresenta maiores consequências do que relativizar a objetividade do discurso científico. No entanto, marcos regulatórios, como a definição da Comissão Europeia, levam a que produtos possam escapar de restrições. Nesse contexto, vale mencionar a proposta formulada em um artigo científico de 2009 de que o critério fundamental para definir nanopartículas em regulamentações de ambiente, saúde e segurança não seja o tamanho, mas sim as “novas (emergentes) propriedades dependentes do tamanho”. Segundo os autores deste trabalho, de acordo com o critério proposto, deveriam ser consideradas nanopartículas (ou seja, precisariam de uma regulamentação adicional às regulamentações existentes para os materiais em volumes macroscópicos) apenas aquelas com dimensões inferiores a 30 nm¹⁷.

Essa discussão sobre uma definição de nanomateriais baseada em critérios quantitativos de tamanho e composição é uma questão central, que também aparece na definição da Comissão Europeia. O limite superior de 100 nm parece ser seguro acima dos 30 nm, dimensão apontada como realmente problemática, mas resta a questão da composição que é salvaguardada pelo final do artigo: “em casos específicos e justificados por preocupações ambientais, saúde, segurança ou competitividade, o limiar de 50% na distribuição de tamanho pode ser substituído por um limiar entre 1% e 50%”. Essa salvaguarda é importante, porque permite regulações específicas para produtos que contêm nanomateriais.

O assunto é literalmente vital, pois nanopartículas sendo mais reativas do que seus contrapontos macroscópicos apresentam um potencial tóxico que necessita ser abordado de forma diferente dos protocolos tradicionais. Além disso, nanopartículas podem, no caso da saúde humana, atravessar quaisquer barreiras naturais dentro do corpo humano¹⁸. Esse vasto assunto da nanotoxicidade deve ser o tema de outros artigos nesta edição, mas alguns aspectos merecem uma breve consideração aqui. No artigo “Citotoxicidade de Nanopartículas”, publicado na revista “Small” em 2008¹⁹, as autoras avaliam a ação sobre células de vários grupos de nanomateriais: fulerenos, nanotubos de carbono, nanopartículas metálicas e de semicondutores. As conclusões são cautelosas, reconhecendo que “a citotoxicidade induzida por nanopartículas é reportada por diferentes pesquisas”, mas que “testes *in vitro* podem não ser relevantes clinicamente”. Apontam a questão da dose e consideram que “seria



premature declarar que nanopartículas sejam inerentemente perigosas” e que as pesquisas precisam continuar.

Um estudo bem mais recente, publicado em 2013, também abrangendo vários tipos de nanopartículas, delinea melhor a comparação entre protocolos de testes, também chamando a atenção para não extrapolar resultados de testes *in vitro* e para a diversidade de ações de diferentes nanopartículas sobre diferentes tipos de células. Em todo caso as pesquisas precisam ser aprofundadas, mas com segurança afirmam que a avaliação precisa da bioatividade de nanomateriais manufaturados necessita de testes múltiplos e específicos para evitar falsos negativos²⁰.

Uma não conclusão

Ao escrever um livro de divulgação sobre nanotecnologia em 2009¹ chamando a atenção também para seus riscos, o cenário era incerto sobre a extensão desses riscos. Apesar dos avanços sistemáticos na pesquisa desses riscos, ainda há um longo caminho a percorrer, citando as conclusões do artigo mencionado, ou seja, o panorama continua em aberto. No entanto, é importante notar que impactos sobre a saúde, ambiente e segurança de nanomateriais foram incorporados à agenda de discussão. E isso é um fenômeno ainda em crescimento e bem recente.

A atividade científica em nanotecnologia continua crescendo: ao buscar artigos científicos na base de dados “Web of Science” com a palavra “nanoparticles” como tópico, obtive mais de 220 mil registros em julho de 2013, sendo 37 mil apenas em 2012. O registro mais antigo é de 1981, mas a produção científica associada a essa palavra chave passou a crescer significativamente a partir de 1992. Desse enorme conjunto de trabalhos científicos, apenas 1.885 aparecem sob a classificação de toxicologia e 4.666 estão relacionados a ciências do ambiente. É interessante notar que trabalhos sobre nanopartículas com esses enfoques começaram a ser publicados com mais intensidade apenas a partir do período entre 2004 e 2006, mais de uma década após o início do “boom” de pesquisa em nanopartículas.

Além disso, ou apesar disso, paralelamente se verifica que a conscientização sobre a segurança e toxicidade de nanomateriais é maior do que há alguns anos. Uma rápida busca mostra que verbetes em inglês sobre nanomateriais (nanopartículas, nanotubos e fulerenos) na Wikipedia passaram a incorporar seções sobre segurança e toxicidade. O verbete nanotecnologia apresenta seções sobre regulamentação e questões ambientais e de saúde. Alguns marcos que levaram a aumentar a preocupação com a segurança no uso de nanotecnologias são descritos no “white-paper on nano safety” (<http://www.nano-safety.info/>) e coincidem com o crescimento da literatura científica na área em meados da década passada.

Por último gostaria de lembrar mais uma vez que se debater com mais cuidado sobre a história pode ser importante. Não só a história da nanotecnologia em geral tem sido mal contada ou divulgada, omitindo frequentemente suas raízes longínquas, como a da nanotoxicologia em particular também

não tem recebido a devida atenção. Estudos toxicológicos de nanopartículas de prata remontam aos anos 1930⁹; assim, a identificação da necessidade de protocolos adequados para avaliar nanomateriais em oposição a quantidades macroscópicas é bem antiga e, aparentemente, esquecida por bastante tempo. É um caso do que se chama em sociologia da ciência do conceito de múltiplas descobertas²¹, que aborda a hipótese de que uma descoberta científica em geral não é um fenômeno único, mas sim múltiplo, realizado de forma independente por diferentes cientistas, simultaneamente ou mesmo em épocas diferentes, quando “redescobridores” desconhecem informações científicas precursoras. Normalmente abordado como um problema interno à comunidade científica sobre o reconhecimento de prioridade intelectual, aqui é claramente um problema com efeitos sociais mais amplos.

Referências

- Schulz PA. Encruzilhada da nanotecnologia: inovação, tecnologia e riscos. Rio de Janeiro: Vieira & Lent; 2009.
- Berger M. Debunking the trillion dollar nanotechnology market size hype [Internet]. Berlin: Nanowerk; 2007. [acesso em 30 jun. 2013]. Disponível em: <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=1792.php>
- BBC Research. Nanotechnology: a realistic market assessment [Internet]. Wellesley: BBC Research; 2012. [acesso em 30 jun. 2013]. Disponível em: <http://www.bccresearch.com/market-research/nanotechnology/nanotechnology-market-applications-products-nan031e.html>
- European Commission, Recommendation on the definition of a nanomaterial [Internet]. Brussels; EC; 2011. [acesso em 30 jun. 2013]. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/chemicals/nanotech/#definition>
- Fernandes MFM. Google, nanotecnologia e historiografia da ciência do tempo presente. Rev Bras Cienc Tecnol Soc. 2011;2(1):99-108.
- Toumey C. Plenty of room, plenty of history. Nat Nanotechnol. 2009;4(12):783-4.
- Jones RAL. What has nanotechnology taught us about contemporary technoscience? In: Zülsdorf TB, Coenen C, Ferrari A, Fiedeler U, Milburn C, Wienroth M, editores. Quantum engagements: social reflections of nanoscience and emerging technologies. Amsterdam: IOS Press; 2011.
- Schulz P. De volta para o futuro: precursores da nanotecnologia. Cad IHU Ideias [Internet]. 2008 [acesso em 18 abr. 2013];(95):1-17. Disponível em: <http://www.ihu.unisinos.br/images/stories/cadernos/ideias/095cadernosihuideias.pdf>
- Nowack B, Krug HF, Height M. 120 years of nanosilver history: implications for policy makers. Environ Sci Technol. 2011;45(4):1177-83.
- Choi H, Mody CCM. The long history of molecular electronics: microelectronics origins of nanotechnology. Soc Stud Sci. 2009;39(1):11-50.



11. de Souza KC, Mohallem NDS, de Souza, EMB. Nanocompósitos magnéticos: potencialidades de aplicações em biomedicina. *Quim. Nova* 2011; 34(10): 1692-1703.
12. Santos LJ, Rocha GP, Alves RB, de Freitas RP. Fulerenos [C₆₀]: química e aplicações. *Quim. Nova*. 2010;33(3):680-93.
13. Herbst MH, Macedo MIF, Rocco AM. Tecnologia dos nanotubos de carbono: tendências e perspectivas de uma área multidisciplinar. *Quim. Nova*. 2004;27(6):986-92.
14. Santos CA. Grafeno será o silício do século 21? *Ciência Hoje* [Internet]. 2013 [acesso em 30 jun. 2013]. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/colunas/do-laboratorio-para-a-fabrica/grafeno-sera-o-silicio-do-seculo-21>
15. Arora SK, Youtie J, Shapira P, Gao L, Ma TT. Entry strategies in an emerging technology: a pilot web-based study of graphene firms. *Scientometrics* 2013;95:1189-1207.
16. Schwierz F. Nanoelectronics: Flat transistors get off the ground. *Nat Nanotechnol*. 2011;6(3):135-6.
17. Auffan M, Rose J, Bottero JY, Lowry GV, Jolivet JP, Wiesner MR. Towards a definition of inorganic nanoparticles from an environmental, health and safety perspective. *Nat Nanotechnol*. 2009;4(10):634-41.
18. Raganail MN, Brown M, Ye D, Bramini M, Callanan S, Lynch I, Dawson KA. Internal benchmarking of a human blood-brain barrier cell model for screening of nanoparticle uptake and transcytosis. *European J. Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 2011; 77(3): 360-367
19. Lewinski N, Colvin V, Drezek R. Cytotoxicity of nanoparticles. *Small*. 2008;4(1):26-49.
20. Xia T, Hamilton RF, Bonner JC, Crandall ED, Elder A, Fazlollahi F, et al. Interlaboratory evaluation of in vitro cytotoxicity and inflammatory responses to engineered nanomaterials: the NIEHS Nano GO Consortium. *Environ Health Perspect*. 2013;121(6):683-90.
21. Merton R. Resistance to the Systematic Study of Multiple Discoveries in Science. *Eur J Sociol*. 1963;4(2):237-82.

Data de recebimento: 30/07/2013

Data de aceite: 21/11/2013