

ARTIGO

## Saúde & Segurança Ocupacional: reflexões sobre os riscos potenciais e o manuseio seguro dos nanomateriais

### Occupational Health and Safety: reflection on potential risks and the safety handling of nanomaterials

**Guilherme Frederico  
Bernardo Lenz e Silva**

*Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo  
(EPUSP); São Paulo, SP,  
Brasil*

*E-mail:*

*guilhermelenz@usp.br*

**Lídice Carolina Lenz e  
Silva**

*Instituto Oncológico -  
Faculdade de Ciências  
Médicas e da Saúde de Juiz  
de Fora (FCMS/JF), Juiz de  
Fora, MG, Brasil*

#### RESUMO

A cada dia a nanotecnologia, que pode ser definida como um campo multidisciplinar da ciência e da tecnologia que trabalha com estruturas de dimensões nanométricas, tipicamente <100 nanômetros (nm), está mais presente no desenvolvimento de novos produtos e processos industriais. A manipulação de partículas nanométricas tem aberto inúmeras oportunidades de desenvolvimento de novos produtos e materiais. Porém, a síntese, manuseio, estocagem, estabilização e a incorporação de materiais com dimensões nanométricas exigem uma nova análise e avaliação dos processos, procedimentos e dispositivos industriais de forma a garantir proteção coletiva e individual ao trabalhador e à sociedade, uma vez que, com o aumento de escala e de volume de produção dos materiais nanoestruturados, uma parcela cada vez maior da cadeia laboral passa a estar exposta aos nanomateriais em suas diversas formas e meios. Neste trabalho é apresentada uma revisão acerca de tópicos relacionados com o desenvolvimento da nanotecnologia abordando questões de riscos e de segurança ocupacional, em especial, os principais aspectos envolvidos quando do manuseio, estocagem, síntese, estabilização e incorporação de nanomateriais, visando à redução, minimização e eliminação dos riscos envolvidos nessas atividades, com o objetivo de garantir de forma plena a integridade física e a saúde do trabalhador.

**PALAVRAS-CHAVES:** segurança ocupacional; riscos; nanotecnologia; nanopartículas

#### ABSTRACT

Every day the nanotechnology, that refers to a field whose theme is the control of matter on an atomic and molecular scale working with nanometric structures (<100 nm), is more present in the development of products and industrial processes. The particle manipulation of nanometric structures has created opportunities in the development of new products and materials. However, synthesis, handling, storage, stabilization and the incorporation of these materials, with nanometric dimensions, demand a new perspective of analysis and evaluation of old manufacturing processes, procedures and industrial devices, in order to guarantee collective and individual protection to workers and society. With the increasing of scale and production of nanostructured materials, a big part of labour community starts to be in contact with different nanomaterials (forms and ways). In this work the main aspects and involved risks of manufacture, storage, synthesis, stabilization and incorporation of nanomaterials on new products are evaluated in order to reduce, decrease and eliminate chemical, physical and biological risks for the employees. A bibliographic review was conducted about risk, safety and nanotechnology based on available English literature focusing safety and environmental agencies from different countries such as USA, Canada, EU (France, UK, Germany, Denmark), Australia and Japan.

**KEYWORDS:** occupational safety; risks; nanotechnology; nanoparticles



## Introdução

Doenças e riscos associados ao trabalho são conhecidos desde a antiguidade. A criação da toxicologia moderna, iniciada com os trabalhos de Paracelsus (Philippus Aureolus Theophrastus Bombastus von Hohenheim) no início do século XIV, de Mathieu Josep Bonaventura, em 1818, e com os trabalhos do médico italiano Bernardini Ramazzini, em seu livro intitulado “As Doenças dos Trabalhadores - De Morbis Artificum Diatriba”, publicado em 1700, serviram de alicerce para a compreensão entre o relacionamento das típicas doenças ocupacionais com as atividades laborais. Esses estudos foram essenciais para a criação da medicina do trabalho iniciada na Inglaterra no século XIX e da engenharia de segurança do trabalho, no início do século XX<sup>1,2,3,4</sup>.



**Figura 1.** Ilustração do livro “De Re Metallica”, um dos primeiros tratados de mineração e metalurgia, publicado em 1550, com indicações específicas sobre os riscos de morte, de sufocamento e a saúde dos trabalhadores das minas subterrâneas, quando do uso do fogo (queima de lenha) para a explosão de veios minerais e rochas<sup>5</sup>.

A evolução tecnológica promovida pela descoberta de novos materiais, substâncias químicas e o aumento da produção de materiais com dimensões cada vez menores apresentam um novo desafio para a gestão da segurança do trabalho em um ambiente de incertezas quanto aos efeitos adversos à saúde, nível de exposição e riscos potenciais aos trabalhadores.

Para ter uma ideia do dinamismo relacionado com os riscos ocupacionais provenientes da exposição do trabalhador às substâncias e compostos químicos, no ano de 2008 havia no banco de dados do CAS (Chemical Abstract Service), uma divisão da ACS (American Chemical Society), 36.660.377 compostos orgânicos e inorgânicos, dos quais 21.867.815 eram

compostos químicos disponíveis comercialmente. Em 2013, já existem mais de 72.841.808 compostos e substâncias registradas, um acréscimo de quase 100% em um período de apenas cinco anos<sup>6</sup>.

Entretanto, o guia de valores de exposição ocupacional publicado em 2013, compilado pela American Conference of Governmental Industrial Hygienists - ACGIH, apresenta somente algo em torno de 800 substâncias químicas<sup>7</sup>. No caso da Norma Regulamentadora Brasileira número 15, apenas 147 substâncias são listadas<sup>8</sup>. Neste trabalho, foi realizada uma revisão da literatura, focando as principais questões envolvidas com os riscos dos nanomateriais. O trabalho de revisão desenvolvido buscou obter informações disponíveis em língua inglesa nas agências de saúde e segurança de países como EUA, Canadá, Austrália, Japão e do continente europeu. Nesse caso, especial atenção foi dada às publicações dos últimos 5-7 anos de países como: França, Alemanha, Dinamarca e Inglaterra.

## Nanomateriais

O termo nanotecnologia, cunhado pelo pesquisador japonês Norio Taniguchi em 1974, foi primeiramente utilizado pela indústria de microeletrônica. Atualmente, a definição técnico-científica do termo engloba os materiais que usualmente contêm pelo menos uma dimensão acima de 1 nm e inferior a 100 nm (cem nanômetros)<sup>9</sup>. Porém, essa é uma definição que, apesar do intenso trabalho normativo ocorrido na última década, ainda apresenta divergências culturais e em diferentes campos das ciências. Essas divergências são decorrentes de aspectos históricos e legais, uma vez que, em princípio, a nanotecnologia é baseada não só na diminuição de tamanho das partículas em uma escala nanométrica, mas, sobretudo, no aparecimento de novas propriedades e funcionalidades observadas nesses materiais. No Japão, partículas entre 50 e 100 nm são consideradas “ultrafinas”, enquanto somente as partículas abaixo de 50 nm são consideradas verdadeiramente nanométricas. Já o ato americano de desenvolvimento e pesquisa em nanotecnologia de 2003 define a nanotecnologia por meio da criação de materiais, dispositivos e sistemas em escala atômica e molecular<sup>10</sup>. Uma discussão detalhada sobre as diferentes definições dos nanomateriais, empregada em distintos países e blocos econômicos, e sobre a complexidade da evolução tecnológica para o estabelecimento de processos de monitoramento e identificação de riscos potenciais à segurança e ao meio ambiente pode ser encontrada no livro: “Nanotechnology: Health and Environmental Risk”<sup>11</sup>.

O avanço da tecnologia na direção do universo nanométrico tem aberto uma série de oportunidades em diferentes campos da ciência e da tecnologia, como novas drogas, sistema de aplicação de medicamentos “drug delivery”, terapias medicinais, o desenvolvimento de tecidos celulares sintéticos, a miniaturização de circuitos e dispositivos eletroeletrônicos e eletromecânicos (MENS/NEMS), desenvolvimento de novos



materiais e produtos com características, propriedades e funcionalidades específicas, sensores, novos processos catalíticos, tintas e revestimentos, indústria de cosméticos, novas fontes de armazenamento e produção de energia, chegando à fronteira da interação e integração de dispositivos nanotecnológicos, organismos vivos e sistemas de informação<sup>12</sup>.

### Os riscos da nanotecnologia no ambiente de trabalho: processos complexos e informações ainda incompletas

Do ponto de vista da saúde do trabalhador e mesmo da população que tem contato com materiais nanoparticulados, uma série de estudos indicam que maiores e melhores informações toxicológicas são necessárias para o entendimento das complexas relações entre as nanopartículas e os organismos vivos<sup>13,14</sup>. O homem convive há muito tempo com materiais nanoparticulados na forma de aerodispersóides provenientes de processos naturais, tais como queimadas ou erupções vulcânicas. Porém, até recentemente, nunca havia ocorrido contato dos seres humanos com nanomateriais sintéticos de elevada pureza, concentração, complexidade ou funcionalização, tornando a síntese, manipulação, manuseio, estocagem, estabilização, incorporação e o uso dos nanomateriais um assunto de extrema complexidade. Dessa forma, a adoção de uma abordagem transdisciplinar se faz necessária nos estudos que envolvem questões sobre riscos, segurança e meio ambiente no universo nanométrico.

Vários pontos de vista podem ser analisados em uma reflexão sobre a nanotecnologia, englobando temas como: riscos, benefícios, vantagens, desvantagens, ética, liberdade individual e coletiva, segurança do público, estratégia de desenvolvimento industrial e tecnológico nacional, marcos regulatórios, educação, patentes, engajamento público ou acesso a informações livres e completas, dentre muitos outros. Várias questões devem ser formuladas, analisadas e avaliadas visando à garantia de condições de segurança para o trabalhador. Entre elas, podemos destacar<sup>15</sup>:

- 1) Há necessidade de utilização de uma determinada forma ou nanoestrutura no desenvolvimento de novos produtos?
- 2) Os riscos envolvidos no manuseio, síntese, estabilização e incorporação dos nanomateriais são conhecidos e podem ser controlados (ou mitigados)?
- 3) Há capacitação técnica e de pessoal para garantir o desenvolvimento seguro das atividades de armazenamento, manuseio, síntese, estabilização e incorporação dos nanomateriais?
- 4) Há quantidade e qualidade de informações suficientes para uma análise ergonômica das atividades que expõem os trabalhadores (diretos e indiretos) ao contato com nanomateriais?
- 5) Há procedimentos e instalações adequadas (atualizados, discutidos, avaliados, implementados, entendidos e praticados) para o exercício das atividades laborais envolvendo a manipulação e o contato com os nanomateriais?
- 6) Quais são os conhecimentos necessários sobre as interações, em nível nanométrico e molecular, entre as diversas

formas e tipos de nanomateriais e seus efeitos toxicológicos no curto, médio e longo prazo?

7) O que fazer com os resíduos gerados (nanomateriais isolados ou incorporados) e qual é a melhor forma de reciclá-los ou descartá-los?

8) A métrica para quantificação da exposição e avaliação dos efeitos está adequada aos nanomateriais com grandes variabilidade quanto a sua área específica, baixa densidade, elevada reatividade, propriedades superficiais?

9) Como, e até que ponto, podem ser agrupados os nanomateriais com pequenas diferenças de composição química, morfologia e atividade catalítica, especialmente no que se refere à toxicologia ou às interações ambientais e biológicas?

10) Como se deve construir um sistema de segurança/proteção ocupacional hierárquico, englobando: eliminação, substituição, modificação, segregação, sistema de ventilação/filtração, capaz de garantir a proteção da saúde dos trabalhadores?

À medida que a nanotecnologia avança, toda a sociedade passa a ter maior contato com produtos nanotecnológicos. Nesse ponto, a adoção de novas estratégias na área de segurança ocupacional e meio ambiente, especialmente na análise de riscos e no entendimento dos processos e interações dos nanomateriais no ambiente de trabalho, é essencial para o desenvolvimento de uma nanotecnologia mais segura do ponto de vista laboral.

Os primeiros artigos sobre os potenciais riscos e efeitos deletérios, sobre a saúde do trabalhador e dos seres vivos em geral, decorrentes da possível interação de materiais nanoparticulados e nanopartículas com organismos vivos, apareceram no início do século XXI<sup>16,17</sup>. Atualmente, os principais mecanismos e as prováveis/hipotéticas rotas de contaminação e interações entre os seres humanos e as nanopartículas estão bem definidos; porém, dados sobre efeitos à saúde humana, dose/exposição precisam de melhores e mais aprofundados estudos.

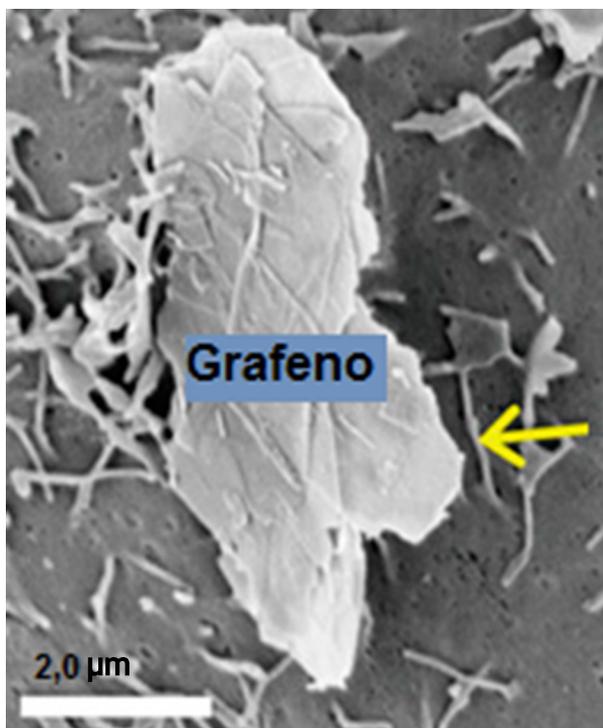
Como exemplo da complexidade desse assunto pode-se citar o caso dos nanomateriais de carbono, como os nanotubos<sup>18</sup> descritos por Iijima em 1991 e as nanofibras de carbono<sup>19</sup> descritas nos anos de 1950 pelos cientistas Radushkevich e Lukyanovich. Com relação a esses materiais, estudos realizados em 2007 já indicavam efeitos de toxicidade biológica associada aos metais utilizados nos processos de síntese dos nanotubos de carbono comerciais, sendo observado aumento dependente do tempo e da dose de espécies de oxigênio reativo e uma diminuição do potencial da membrana celular mitocondrial<sup>20</sup>. Porém, somente em 2013 foram publicados pela NIOSH (The National Institute for Occupational Safety and Health)<sup>21</sup>, em seu boletim número 65, os aspectos relacionados com a exposição ocupacional aos nanotubos e às nanofibras de carbono, com indicação clara sobre a necessidade de controle da exposição, condução de medições ambientais/laborais, vigilância médica, além do monitoramento da concentração do ambiente de trabalho e recomendações na escolha dos equipamentos de proteção respiratória.

No caso do grafeno, outra forma alotrópica do carbono descoberto em 2004<sup>22</sup>, os dados disponíveis sobre sua toxicidade,



interação físico-química com sistemas biológicos e mesmo seu risco são ainda mais incipientes. A limitada literatura disponível de ensaios “in vitro” sugere que o grafeno pode comportar-se como agente tóxico ou inerte às células, sendo que hipóteses sobre a resposta biológica das células podem variar de acordo com o número de camadas, perímetro, hidrofobicidade, funcionalização da superfície e dose administrada. O caráter hidrofóbico da superfície do grafeno pode levar a suas interações significativas com membranas lipídicas causando toxicidade ou mesmo a adsorção de moléculas em sua superfície<sup>23</sup>.

Trabalhos recentes trazem uma revisão sobre as respostas biológicas e os pontos relevantes sobre segurança e as potenciais aplicações biomédicas do grafeno<sup>24,25</sup>. A figura 2 mostra a penetração de uma folha de grafeno (few layers graphene) em uma membrana celular.



**Figura 2.** Imagem de elétrons secundários / microscopia eletrônica de varredura de emissão de campo, mostrando a interação da membrana celular de uma célula epitelial de pulmão humano com uma microfolha de grafeno (seta indicativa), evidenciando a penetração da aresta e das pontas da folha do grafeno. Células pós-fixadas com óxido de ósmio IV em solução aquosa (2% vol:vol) seguida de desidratação com etanol<sup>25</sup>.

O crescimento e difusão dos produtos nanotecnológicos no cotidiano das pessoas e no universo do trabalho evidenciam a importância das questões éticas, de engajamento público, educação, segurança e meio ambiente na sociedade. Entre os dados e previsões importantes, do ponto de vista do ambiente de trabalho, observa-se o aumento da força de trabalho em-

pregada primariamente com a nanotecnologia, que deverá ser de 2 milhões de trabalhadores no ano de 2015, sendo esperado um crescimento anual de no máximo 25% até o ano 2020, quando é esperado um mercado de US\$ 3 trilhões<sup>26</sup>.

### Rotas de exposição & medidas de proteção

A maioria dos estudos<sup>14,27-30</sup> indica que a contaminação através das vias respiratórias é a principal rota de entrada das nanopartículas no organismo, podendo também haver contaminação através da pele/mucosas/sistema ocular, ingestão ou injeção de nanopartículas. A figura 3 mostra o relacionamento entre as diferentes variáveis e interações das nanopartículas e os aspectos da análise de risco envolvendo esses materiais.

### Prevenção e proteção

Em decorrência do potencial risco de contaminação por nanopartículas, a definição de diretrizes e recomendações de proteção do trabalhador se faz necessária, mesmo que o grau de certeza sobre a eficácia dessas práticas ainda necessite de melhores confirmações, validações e ajustes. Assim, uma série de “boas práticas de proteção” é indicada a seguir para as principais rotas de contaminação e exposição.

#### a) Proteção respiratória (inalação):

No caso dos meios de exposição dos trabalhadores, é essencial o desenvolvimento de sistemas de gestão de segurança do trabalho com foco na eliminação ou a minimização da exposição, pela utilização de salas limpas, capelas adotadas de sistemas de filtração com filtros tipo HEPA (High Efficiency Particulate Air), a adoção de um programa de proteção respiratória onde o uso de equipamentos de proteção coletiva e individual sejam devidamente dimensionados às atividades laborais e aos tipos de materiais manométricos, incluindo a medição de concentrações e atividades de educação e treinamento dos funcionários. A tabela 1 apresenta a recomendação da NIOSH para a seleção de dispositivos de proteção dos trabalhadores expostos em ambientes com a presença de nanotubos e nanofibras de carbono.

#### b) Proteção da pele:

A derme, quando em perfeitas condições funcionais, é capaz de proteger contra a entrada de nanopartículas; porém, em alguns casos, a presença de fissuras, cortes, inflamações e mesmo o processo de crescimento de pelos e folículos capilares podem permitir a penetração de nanopartículas. Usualmente, o emprego de luvas (vinil, nitrila ou neoprene) e o uso de vestimentas descartáveis de não tecidos à base de polietileno de alta densidade são suficientes para proporcionar proteção adequada contra contaminação por nanopartículas. A figura 4 apresenta os resultados de uma série de experiências empregando nanopartículas com tamanhos de 40, 750 e 1500 nm. Neste estudo, somente as partículas de 40 nm conseguiram penetrar através da pele pelo folículo capilar atingindo o tecido em sua volta<sup>31</sup>.

#### c) Ingestão:

No caso da ingestão, pode-se dividi-la em pelo menos duas classes, a saber: (i) a ingestão acidental, decorrente

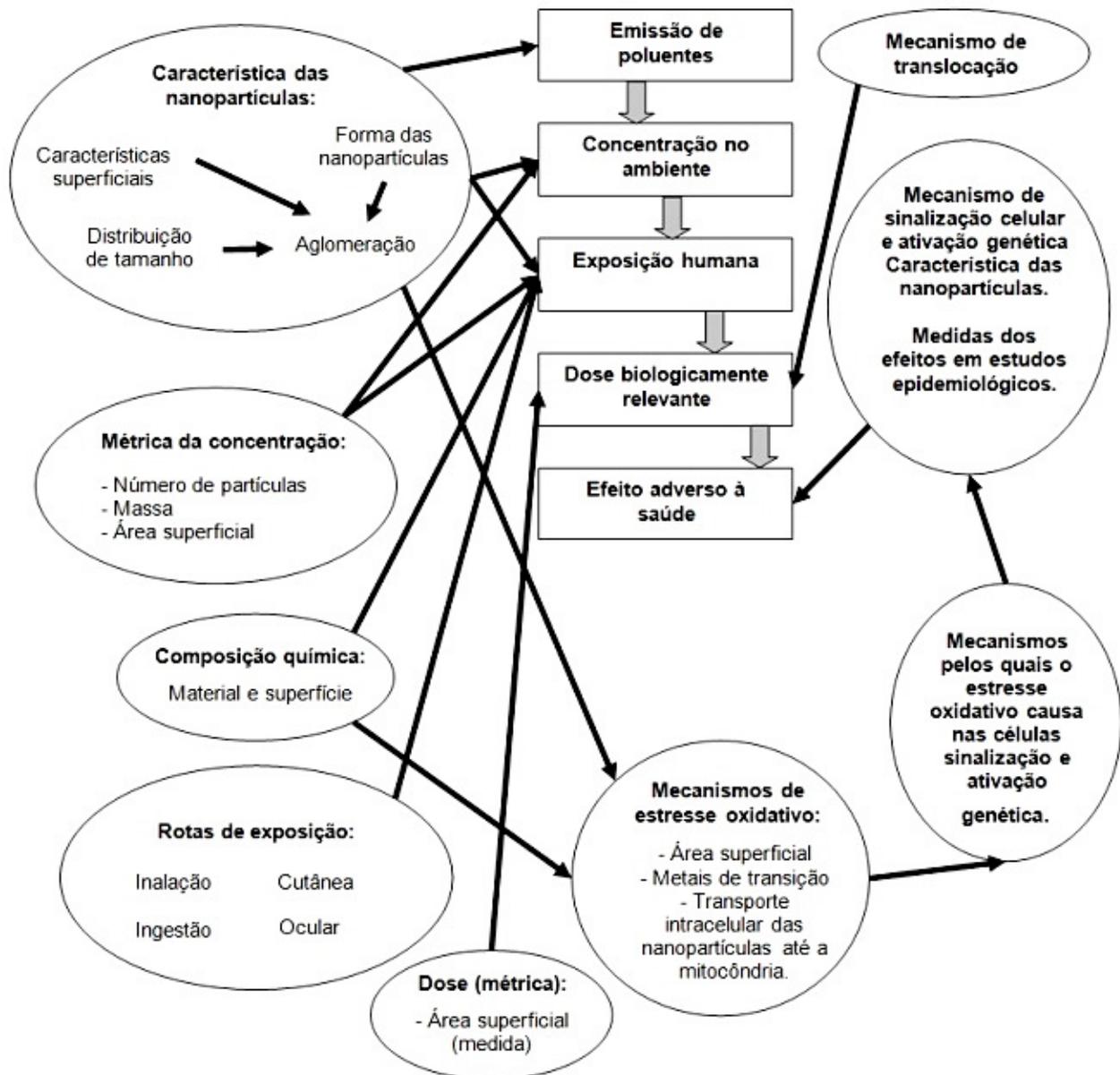


Figura 3. Relacionamento entre interações, variáveis e mecanismos envolvendo a análise de risco de nanopartículas<sup>14</sup>.

de maus hábitos de higiene ou decorrente da contaminação de alimentos, utensílios e líquidos; ou (ii) a ingestão não acidental de produtos contendo nanopartículas (alimentos, remédios, práticas terapêuticas, etc.). Dentre essas classes a principal ferramenta para o controle desses tipos de contaminações são a educação, a segregação dos ambientes contendo nanopartículas, o monitoramento ambiental e avaliação do uso das nanopartículas em produtos que tenham contato com água e alimentos. Nesse caso, questões ambientais envolvendo a nanotecnologia devem ser avaliadas de uma forma mais ampla, incluindo a análise do ciclo de vida dos produtos, e das nanopartículas, além da análise das interações destas com o meio ambiente.

d) Proteção do sistema ocular:

Neste caso o uso adequado de sistemas de proteção visual com a adoção de máscaras tipo facial inteira ou mesmo capacetes dotados de sistemas de filtração deve ser indicado após uma avaliação das atividades laborais. É importante ressaltar que o uso de óculos de segurança é completamente insuficiente para a proteção do sistema ocular no caso das nanopartículas e sistemas de proteção coletiva, enclausuramento ou mesmo o uso de salas limpas deve ser avaliado.

e) Proteção contra explosões e incêndio:

O risco de incêndio e explosão das atividades de manuseio é inerente quando se trabalha com materiais com alta energia armazenada (elevada área superficial). No caso dos nano-

**Tabela 1.** Proteção respiratória recomendada quando da exposição a nanofibras e nanotubos de carbono<sup>21</sup>.

Concentração no ambiente de trabalho de nanofibras e nanotubos de carbono	Dispositivo de proteção respiratória mínima
1-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (10 x REL) - (a)	- Qualquer respirador purificador de ar, com peça semifacial, equipado com apropriado tipo de filtro para sistema particulado - (b); - Qualquer respirador purificador de ar com filtro (pressão negativa) utilizando peça semifacial.
$\leq 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (25 x REL)	- Qualquer sistema de purificação de ar motorizado com capuz ou capacete com filtro tipo HEPA - (c); - Qualquer sistema ar mandado (ar comprimido) de fluxo contínuo com capuz ou capacete.
$\leq 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (50 x REL)	- Qualquer sistema de ar purificado do tipo facial inteira equipado com filtros N-100, R-100 ou P-100 - (c); - Qualquer sistema de ar purificado de ar motorizado equipado com filtro tipo HEPA e máscara com vedação "apertada"; - Qualquer sistema de purificação de ar com pressão negativa equipado com máscara facial inteira; - Qualquer sistema de ar mandado (ar comprimido) de fluxo contínuo equipado com máscara de vedação "apertada" tipo semifacial; - Qualquer sistema de ar purificado com filtro (pressão negativa) equipado com máscara facial inteira.
$\leq 1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.000 x REL)	- Qualquer sistema de ar mandado (ar comprimido) equipado com máscara facial inteira.

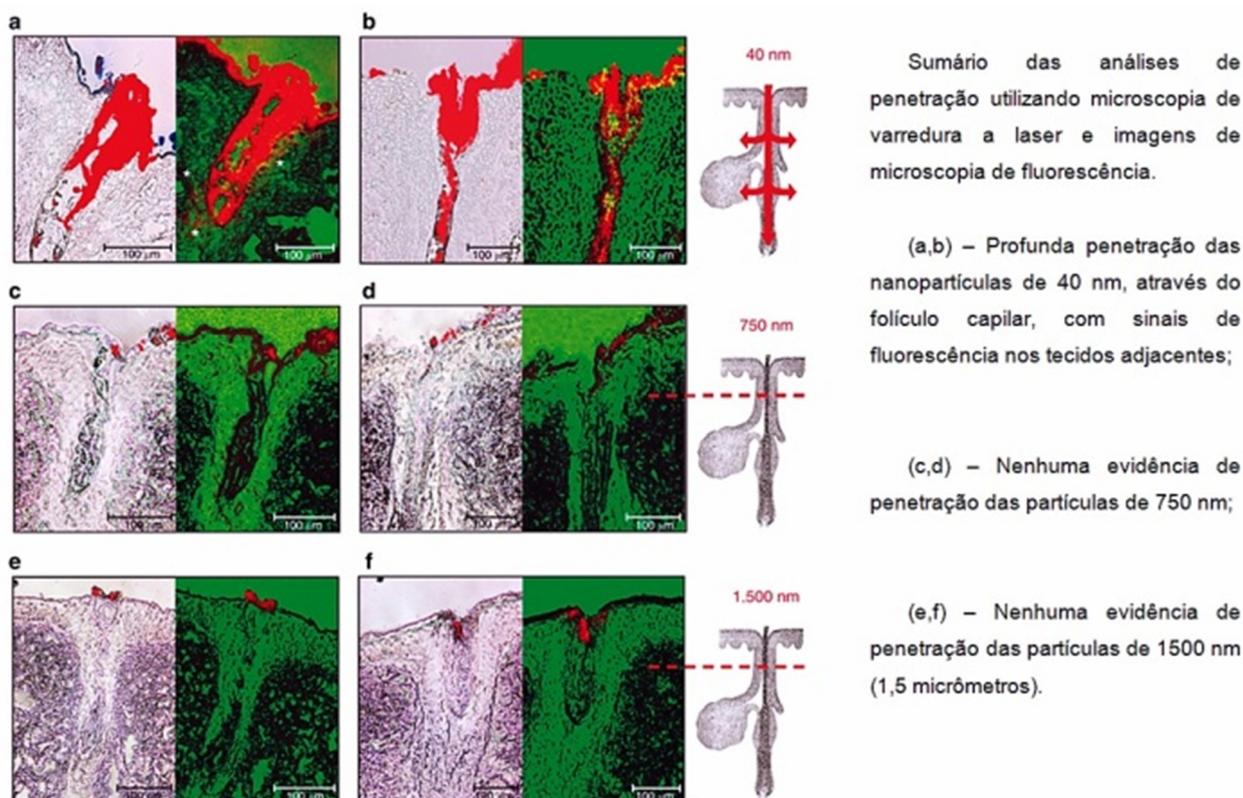
**Observações:**

(a) REL (Recommended Exposure Level): Limite de exposição recomendado. Trata-se de um limite médio ponderado para um trabalho de 10 h/dia, durante uma semana de 40 horas.

(b) O filtro apropriado significa qualquer filtro tipo (N, R ou P) da série 95 ou 100, avaliando a presença de óleos no ambiente, que excluem as opções de filtro da série N.

(c) HEPA = semelhante ao filtro tipo P3 e, N95 semelhante ao filtro P2 (verificar normas ABNT NBR 13698:2011 e NBR 13697:2010 para definir a correlação entre os filtros e respiradores).

(d) A título de comparação, os valores das concentrações, no ambiente de trabalho, para a grafita e para o negro de fumo, baseados na NIOSH PEL (Permissible Exposure Limit), são respectivamente  $5.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $3.500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . A recomendação máxima de exposição para todos os tipos de nanotubos que carbono é  $< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figura 4.** Microscopia de varredura laser de amostras de tecido humano, com tratamento digital utilizando sobreposição de imagens fluorescentes avaliando a penetração, através do folículo capilar, de nanopartículas com diferentes tamanhos: (a,b) 40nm (0,1% sólidos,  $2,84 \times 10^{13}$  partículas/mL, n=6); (c,d) 750 nm (0,1% sólidos,  $1,08 \times 10^{10}$  partículas/mL); (e,f) 1.500 nm (0,1% sólidos,  $1,35 \times 10^9$ /mL)<sup>31</sup>.



materiais, a diminuição do tamanho das partículas aumenta consideravelmente a energia superficial (e total) do sistema particulado. Porém, ainda faltam dados confiáveis sobre o risco potencial de cada tipo de nanomaterial. Métodos convencionais de medição de particulados dispersos no ambiente podem gerar resultados incorretos<sup>32,33,34</sup>. Nesses casos, alguns parâmetros e procedimentos devem e podem ser avaliados de forma mais preventiva, tais como:

- Evitar a formação de nuvens de nanomaterial enclausurado no ambiente (utilização de sistema de filtragem ou exaustão com filtragem dos gases);
- Utilizar sistemas antifaísca, antieletricidade estática e antifagulhas ou embalagens a vácuo e termicamente estável;
- Reduzir a quantidade de material armazenado;
- Reduzir a temperatura e a pressão dos processos de síntese dos nanomateriais;
- Instalar barreiras físicas como sistemas tipo “glove box” de material resistente a explosões e incêndios, adequados a cada situação;
- Utilizar atmosfera inerte (argônio ou nitrogênio), quando do manuseio de nanometais, de forma a evitar reações de oxidação. Caso não seja possível utilizar atmosfera inerte é necessário o monitoramento do nível de oxigênio do ambiente;
- Estabilizar os nanomateriais contendo metais ou semimetais em líquidos compatíveis formando um revestimento superficial de forma a protegê-los contra a oxidação ou reações de combustão/explosão (camadas protetoras de sais, polímeros, óleos ou emulsões estáveis);
- Utilizar zonas de exclusão (acesso restrito) bem definidas nos locais de armazenamento dos nanomateriais;
- Utilizar e instalar sistemas de proteção contra incêndio, utilizando agentes de resfriamento ou remoção de comburente adequado à natureza química e à quantidade de nanomaterial estocado ou manuseado.

O entendimento dos fenômenos de passivação superficial (formação de camadas oxidadas estáveis e impermeáveis) é importante para a diminuição da reatividade dos nanometais, mas nem sempre os mecanismos de ignição e extensão das reações são os mesmos para nanomateriais e seus similares micrométricos. Logo, uma avaliação caso a caso deve ser feita (energia mínima de ignição, concentração mínima de explosão, pressão máxima de explosão e índice de violência da explosão).

### Evolução dos procedimentos de segurança

Nos últimos cinco anos várias instituições e organizações governamentais e não governamentais criaram protocolos, recomendações e guias de manuseio seguro<sup>21,27,32,35,36</sup>. A tabela 2 apresenta as principais instituições e os respectivos guias/relatórios disponíveis para consulta.

### Análise de risco

A análise de riscos envolvidos na produção, manuseio, estocagem, incorporação, uso e descarte dos nanomateriais é

um processo complexo, uma vez que ainda existe uma lacuna quanto às informações sobre os limites de exposição da maioria dos novos nanomateriais desenvolvidos<sup>14,37</sup>. Nesse ponto, a adoção do princípio da precaução é condição necessária, mas ainda não suficiente para a garantia da segurança dos trabalhadores, da população e do meio ambiente. O uso de técnicas de avaliação de risco, como a adoção de metodologias de bandas de controle “control banding”, ainda é incipiente no caso dos nanomateriais e, muitas vezes, por se tratar de uma abordagem qualitativa, é considerada muito simplista em situações de alta complexidade como no caso dos nanomateriais. Deve-se ressaltar que há um esforço de diversas instituições, como: ABDI, INRS, IRSST, ISO, ANSES, NIOSH, ILO, na busca e construção de modelos de bandas de controle mais aprimorados e específicos<sup>38,39,40,41,42,43,44</sup>. Esses modelos têm sido adaptados de forma a aprimorar a técnica para condições mais específicas e complexas como no caso dos nanomateriais. A figura 5 apresenta uma matriz de controle por bandas para a exposição aos nanomateriais em diferentes estados físicos (sólido, material particulado, líquido e aerossol). O valor da gradação da medida de controle (CL) indica o tipo de controle que deve ser adotado para cada uma das condições avaliadas.

		Banda potencial de exposição (emissão de nanopartículas)			
		EP1	EP2	EP3	EP4
Banda de Perigo	HB1	CL1	CL1	CL2	CL3
	HB2	CL1	CL1	CL2	CL3
	HB3	CL1	CL1	CL3	CL4
	HB4	CL2	CL2	CL4	CL5
	HB5	CL5	CL5	CL5	CL5

HB - banda de perigo;

EP - banda potencial de exposição (emissão);

CL - nível de controle.

**Figura 5.** Matriz de bandas de controle, indicando a combinação entre níveis de perigo e níveis de exposições potenciais geradas durante o manuseio de nanopartículas com diferentes estados físicos. Níveis de controle com maiores índices indicam maior potencial de risco da atividade/operação, onde: CL5 > CL4 > CL3 > CL2 > CL1<sup>41</sup>.

### Conclusões

As principais conclusões relativas ao manuseio seguro e aos potenciais riscos associados com a exposição dos trabalhadores devem ser baseadas em:

- Não generalizar: nanotecnologia, nanomateriais, nanoparticulados, etc. A avaliação deve ser feita caso a caso e produto a produto;
- Pensar nas diferentes interações: nano (química, física, bio, meio ambiente, etc.);
- Os riscos associados aos nanomateriais precisam ser desenvolvidos até atingirem a sua plenitude e maturação. Ou seja, o caminho é longo e ainda precisa ser construído;

**Tabela 2.** Principais protocolos, normas e guias sobre manuseio seguro de nanomateriais e riscos associados às nanopartículas.

Organização (Sigla)/País	Nome	Publicação	Ano	Página (webpage)
IRSST (Canadá)	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail	Health Effects of Nanoparticles, second edition	2008	www.irsst.qc.ca
ILO/ONU (Suíça)	International Labour Office	Emerging risks and new patterns of prevention in a changing world of work	2010	www.ilo.org
NIOSH (EUA)	The National Institute for Occupational Safety and Health	Approaches to Safe Nanotechnology: managing the health and safety concerns associated with engineered nanomaterials Filling the knowledge gaps for safe nanotechnology in the workplace Occupational exposure to carbon nanotubes and nanofibers	2009 2012 2013	www.cdc.gov/niosh
Cordis (Europa)	Community Research and development Information Service	Safety aspects	-	www.cordis.europa.eu/nanotechnology
SWA (Austrália)	Safe Work Australia	Engineered Nanomaterials: investigating substitution and modification options to reduce potential hazards	2010	www.safeworkaustralia.gov.au
ISO (Suíça)	International Organization for Standardization	ISO/TR 13121:2011- Nanotechnologies - nanomaterial risk evaluation; ISO/TR 12885:2008 - Nanotechnologies - health and safety practices in occupational settings relevant to nanotechnologies.	2011 e 2008	www.iso.org
HSE & Safenano (Reino Unido)	Health and Safety Executive Safenano	Using nanomaterials at work Health effects of particles produced for nanotechnologies Working safely with nanomaterials in research & development	2013 2004 2012	www.hse.gov.uk www.safenano.org
BAuA (Alemanha)	German Federal Institute for Occupational Safety and Health	Guidance for handling and use of nanomaterials at the workplace	2007	www.baua.de
DTU (Dinamarca)	Danish Ministry of Environment - EPA	Nanocat: a conceptual decision support tool for nanomaterials	2011	www.mst.dk
ANSES (França)	Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation	Toxicité et écotoxicité des nanotubes de carbone	2012	www.anses.fr
AIST (Japão)	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Information portal for the societal implications of nanotechnology	-	unit.aist.go.jp/nri/cie/nanotech_society
OECD (França)	The Organization for Economic Co-operation and Development	Current Developments: activities on the safety of manufactured nanomaterials	2007	www.oecd.org
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial	Nanotecnologias: subsídios para a problemática dos riscos e regulação	2011	www.abdi.com.br

- Questões relacionadas à forma, morfologia, área superficial, funcionalidade, energia de superfície, tipo de superfície, etc. são essenciais para a modificação de propriedades nos produtos desenvolvidos (ou em desenvolvimento). Logo, questões relacionadas com saúde, segurança e meio ambiente devem partir da mesma premissa de novas oportunidades de interações nanobiológicas e fisicoquímicas;

- Novas tecnologias demandam novas abordagens quanto à prevenção, manuseio, estocagem e sistemas e métricas de medição, controle e proteção (individual e/ou coletiva);

- Os limites de exposição precisam ser definidos, acompanhados e atualizados de acordo com as novas descobertas e evolução do conhecimento;

- Baixa exposição não significa diretamente baixo risco, pois novas nanossustâncias possuem diferentes propriedades e ainda não se sabe concretamente o efeito (dose, exposição, toxicidade ao longo do tempo) e o risco associado a cada tipo de material;

- É preciso trabalhar em grupo, buscar opiniões e visões diferentes, multiculturais, pluridisciplinares, hierárquicas e coletivas.



## Agradecimentos

Rede Nanotox/CNPq - Rede de Nanotoxicologia Ocupacional e Ambiental (Processo: 552131/2011-3) e INCT/CNPq de Nanomateriais de Carbono.

## Referências

1. Borzelleca JF. Paracelsus: herald of Modern toxicology. *Toxicol Sci.* 1999;53(1):2-4.
2. Sánchez JRB. Popularizing controversial science: a popular treatise on poisons by Mateo Orfila (1818). *Med Hist.* 2009;53(3):351-78.
3. Ramazzini B. As doenças do trabalho. São Paulo: FUNDA-CENTRO; 2000.
4. Mendes R, Dias EC. Da medicina do trabalho à saúde do trabalhador *Rev Saúde Públ S. Paulo.* 1991 [acesso em 10 set. 2013];25(5):341-9.
5. Agricola G. *De Re Metallica*. Nova York: Dover Publications Inc.; 1950.
6. Chemical Abstract Service (USA). Apresentação [Internet]. Ohio: CAS. [acesso em 29 jul. 2013]. Disponível em: <https://www.cas.org>
7. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Guide to occupational exposure values. Cincinnati: ACGIH; 2013.
8. Brasil. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma regulamentadora NR 15, de 08 de junho de 1978. Atividades e Operações Insalubres [Internet]. Brasília: MTE; 1978. [acesso em 30 jul. 2013]. Disponível em: <http://portal.mte.gov.br/legislacao/norma-regulamentadora-n-15-1.htm>
9. Allan J. Development of international standards for nanotechnologies: Secondary Information Committee [Internet]. Australia; 2012. [acesso em 29 jul. 2013]. Disponível em: <http://www.standards.org.au/OurOrganisation/Events/Documents/Nanotechnology%20Forum%20-%20Presentation%2011%20-%20Jeremy%20Allan.pdf>
10. Al 'Afghani MM. Defining nanotechnology. *Nanotechnology law* [Internet]. 2006 [acesso em 29 jul. 2013]. Disponível em: <http://nanolaw.alafghani.info/2006/02/defining-nanotechnology.html>
11. Shatkin JA. Ongoing international effort to address risks issues for nanotechnology. In: Shatkin JA, organizador. *Nanotechnology: health and environmental*. Boca Raton: Taylor & Francis; 2013. p. 231-45.
12. Lynn F. *Nanotechnology: science, innovation and opportunity*. Westford: Prentice Hall; 2006.
13. Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect.* 2005;113(7):823-39.
14. Kandlikar M, Ramachandran G, Maynard A, Murdock B, Toscano WA. Health risk assessment for nanoparticles: A case for using expert judgment. *J Nanopart Res.* 2007;9:137-56.
15. Lenz e Silva GFB. Nanotecnologia: avaliação e análise dos possíveis impactos à saúde ocupacional e segurança do trabalhador no manuseio, síntese e incorporação de nanomateriais em compósitos refratários de matriz cerâmica [trabalho de conclusão de curso]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2008.
16. Maynard AD, Aitken RJ, Butz T, Colvin V, Donaldson K, Oberdörster G, et al. Safe handling of nanotechnology. *Nature.* 2006;444(7117):267-9.
17. The Royal Society, The Royal Academy of Engineering. *Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties* [Internet]. Londres: 2004. 127 p. [acesso em 22 abr. 2013]. Disponível em: [http://royalsociety.org/uploadedFiles/Royal\\_Society\\_Content/policy/publications/2004/9693.pdf](http://royalsociety.org/uploadedFiles/Royal_Society_Content/policy/publications/2004/9693.pdf)
18. Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature.* 1991;354:56-8.
19. Radushkevich LV, Lukyanovich VM. Carbon structure formed under thermal decomposition of carbon monoxide on iron. *Zh. Fiz. Khim.* 1952;26(1):88-95.
20. Pulskamp K, Diabaté S, Krug HF. Carbon nanotubes show no sign of acute toxicity but induce intracellular reactive oxygen species in dependence on contaminants. *Toxicol Lett.* 2007;168(1):58-74.
21. National Institute for Occupational Safety and Health (US). *Current Intelligence Bulletin 65: Occupational Exposure to Carbon nanotubes and nanofibres* [Internet]. Columbia: NIOSH; 2013. [acesso em 27 jun. 2013]. Disponível em: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2013-145/pdfs/2013-145.pdf>
22. Geim AK, Novoselov KS. The rise of graphene. *Nat Mater.* 2007;6(3):183-91.
23. Sanchez VC, Jachak A, Hurt RH, Kane AB. Biological interactions of graphene-family nanomaterials: an interdisciplinary review. *Chem Res Toxicol.* 2012;25(1):15-34.
24. Jachak AC, Creighton M, Qiu Y, Kane AB, Hurt RH. Biological interactions and safety of graphene materials. *MRS Bulletin.* 2012;37:1307-13.
25. Li Y, Yuan H, von dem Bussche A, Creighton M, Hurt RH, Kane AB, Gao H. Graphene microsheets enter cells through spontaneous membrane penetration at edge asperities and corner sites. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2013;110(30):12295-300.
26. Roco MC. The long view of nanotechnology development: the National Nanotechnology Initiative at 10 years. *J Nanopart Res.* 2011;13:427-45.
27. Health and Safety Executive (UK). *Health effects of particles produced for nanotechnologies* [Internet]. HSE; 2004 [acesso em 10 ago. 2008]. Disponível em: <http://www.hse.gov.uk/nanotechnology/healtheffects.pdf>
28. Martin MK. First results for safe procedures for handling nanoparticles [Internet]. Paris: NANOSAFE; 2008. (DR-331/200810-5). [acesso em 15 mar. 2013]. Disponível em: [http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR6\\_s.pdf](http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR6_s.pdf)
29. National Institute for Occupational Safety and Health (US). *Filling the Knowledge Gaps for Safe Nanotechnology in the Workplace: a progress report from the NIOSH Nanotechnology Research Center, 2004-2011* [Internet]. Atlanta: Nio-



- sh; 2012. [acesso em 30 jul. 2013]. Disponível em: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2013-101/pdfs/2013-101.pdf>
30. United States National Nanotechnology Initiative. Environmental, health, and safety research strategy [Internet]. 2011. [acesso em 31 jul. 2013]. Disponível em: [http://www.nano.gov/sites/default/files/pub\\_resource/nni\\_2011\\_ehs\\_research\\_strategy.pdf](http://www.nano.gov/sites/default/files/pub_resource/nni_2011_ehs_research_strategy.pdf)
31. Vogt A, Combadiere B, Hadam S, Stieler KM, Lademann J, Schaefer H, Autran B, Sterry W, Blume-Peytavi U. 40 nm but not 750 or 1500 nm, particles enter epidermal CD1a+ cells after transcutaneous application on human skin. *J. Invest. Dermatol.* 2006;126(6):1316-22.
32. Ostiguy C, Roberge B, Woods C, Soucy B. Engineered Nanoparticles: current knowledge about OHS risks and prevention measures. 2. ed. [Internet]. Montreal; IRSST; 2010 [acesso em 10 mar. 2013]. Disponível em: <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PublRSST/R-656.pdf>
33. Bouillard J, Crossley A, Dien JM, Dobson P, Klepping T, Vignes A. What about explosivity and flammability of nanopowders? [Internet]. Paris: NANOSAFE; 2008. (DR-152/200802-2). [acesso em 15 mar. 2013]. Disponível em: [http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR2\\_s.pdf](http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR2_s.pdf)
34. Ineris JB. How to estimate nanoaerosol explosion risk? [Internet]. Paris: NANOSAFE; 2008. (DR-152/423-200810-4). [acesso em 15 mar. 2013]. Disponível em: [http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR4\\_s.pdf](http://www.nanosafe.org/home/liblocal/docs/Dissemination%20report/DR4_s.pdf)
35. International Standard Organization. ISO/TS 12901-1:2012: Nanotechnologies - occupational risk management applied to engineered nanomaterials - Part 1: Principles and approaches. (International standard published). Genebre: ISO; 2012.
36. International Standard Organization. ISO/PRF TS 12901-2: Nanotechnologies - occupational risk management applied to engineered nanomaterials - Part 2: Use of the control banding approach. (Under development). Genebre: ISO; 2013.
37. Baun SFHA, Alstrup-Jensen K. NanoRiskCat: a conceptual decision support tool for nanomaterials [Internet]. Copenhagen: Danish Ministry of the Environment; 2011. [acesso em 18 jul. 2013] Disponível em: <http://www.stepto.com/assets/html-documents/NanoRiskCat%20978-87-92779-11-3.pdf>
38. International Labour Organization. Emerging risks and new patterns of prevention in a changing world of work [Internet]. Geneva: ILO; 2010. [acesso em 1 jan. 2013]. Disponível em: [http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/--ed\\_protect/---protrav/---safework/documents/publication/wcms\\_123653.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/--ed_protect/---protrav/---safework/documents/publication/wcms_123653.pdf)
39. Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du Travail. Toxicité et écotoxicité des nanotubes de carbone : note d'actualité : état de l'art 2011-2012 [Internet]. Paris : ANSES 2012. [acesso em 15 abr. 2013]. Disponível em: <http://www.anses.fr/sites/default/files/documents/AP2007sa0417-3.pdf>
40. National Institute for Occupational Safety and Health (US). Qualitative risk characterization and management of occupational hazards: control banding (CB): a literature review and critical analysis [Internet]. 2009. [acesso em 29 jun. 2013]. Disponível em: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-152/pdfs/2009-152.pdf>
41. Paik SY, Zalk DM, Swuste P. Application of a Pilot Control Banding Tool for Risk Level Assessment and Control of Nanoparticle Exposures. *Ann Occup Hyg.* 2008;52(6):419-28.
42. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety. Development of a specific control banding tool for nanomaterials: Report [Internet]. Paris: ANSES; 2010. [acesso em 15 maio 2013]. Disponível em: <http://www.anses.fr/sites/default/files/documents/AP2008sa-0407RaEN.pdf>
43. Riediker M, Ostiguy C, Triolet J, Troisfontaine P, Vernez D, Bourdel G, Thieriet N, Cadène A. Development of a Control Banding Tool for Nanomaterials. *Journal of Nanomaterials* [Internet]. 2012 [acesso em 12 mar. 2013]. Disponível em: <http://downloads.hindawi.com/journals/jnm/2012/879671.pdf>
44. Brouwer DH. Control banding approaches for nanomaterials. *Ann Occup Hyg.* 2012;56(5)506-14.
45. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (BR). Nanotecnologias: subsídios para a problemática dos riscos e regulação [Internet]. Brasília: ABDI; 2011. [acesso em 30 jul. 2013]. Disponível em: [http://www.abdi.com.br/Estudo/Relat%C3%B3rio%20Nano-Riscos\\_FINALreduzido.pdf](http://www.abdi.com.br/Estudo/Relat%C3%B3rio%20Nano-Riscos_FINALreduzido.pdf)

Data de recebimento: 05/08/2013

Data de aceite: 12/11/2013