

Exposição às nanopartículas no ambiente de trabalho e os riscos potenciais à saúde humana: uma revisão integrativa

Exposure to nanoparticles in the workplace and potential risks to human health: an integrative review

Amanda Marques Lopes Estolano¹

 orcid.org/0000-0002-3045-9117

Bianca Maria Vasconcelos Valério⁴

 orcid.org/0000-0002-0163-465X

Roberto Revoredo de Almeida Filho²

 orcid.org/0000-0001-9339-0455

Felipe Mendes da Cruz⁵

 orcid.org/0000-0002-0163-465X

Eliane Maria Gorga Lago³

 orcid.org/0000-0003-0987-3492

¹ Doutoranda em Ciência de Materiais, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil. E-mail: amandaestolano@ufpe.br

² Mestre em Engenharia civil e Especializata em Engenharia e Segurança do Trabalho, Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, Brasil. E-mail: rraf@poli.br

^{3,4,5} Professores da Escola Politécnica de Pernambuco, Recife, Brasil. E-mail: eliane.lago@upe.br; bianca.vasconcelos@upe.br; felipemendeslsh@poli.br

DOI: 10.25286/rep.v9i2.2746

Esta obra apresenta Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

Como citar este artigo pela NBR 6023/2018: Estolano, Amanda M. L.; Almeida Filho, Roberto R. de; Lago, Eliane M. G.; Cruz, Felipe M. da. Exposição às nanopartículas no ambiente de trabalho e os riscos potenciais à saúde humana: uma revisão integrativa. Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada, vol 9, n.2, p. 15-24, 2024.

REVISTA DE
Engenharia
e Pesquisa Aplicada

RESUMO

O surgimento de nanotecnologias promove além do desenvolvimento econômico e tecnológico, a geração de produtos com propriedades potencializadas. Uma preocupação no âmbito de saúde e segurança do trabalhador são os riscos potenciais da inalação, ingestão e contato dérmico dos que manuseiam as nanopartículas seja na síntese laboratorial, pesquisa, desenvolvimento, fabricação, uso, reciclagem e descarte do produto. O tamanho das partículas é um dos fatores que as tornam bastante invasivas ao corpo humano e podem também gerar impactos ambientais, como a exposição nos ecossistemas. O objetivo desse estudo foi analisar importantes publicações que abordam a exposição humana às diversas nanopartículas no ambiente ocupacional. A metodologia se baseou na busca de artigos científicos em duas bases de dados (*Scopus* e *Google Acadêmico*) e pelo método de inclusão e exclusão adotados e 60 artigos foram selecionados para compor a discussão do tema proposto. Os resultados evidenciaram que as medidas de controle devem estar intimamente ligadas ao desenvolvimento de técnicas de caracterização e concentração das partículas para o entendimento dos mecanismos de interação biológica, evitando efeitos nocivos ao corpo humano.

PALAVRAS-CHAVE: Nanomateriais; saúde do trabalhador; riscos segurança; nanopartículas;

ABSTRACT

The emergence of nanotechnologies promotes the generation of products with enhanced properties in addition to economic and technological development. A concern in the field of worker health and safety are the potential risks of inhalation, ingestion and dermal contact of those who handle nanoparticles whether in laboratory synthesis, research, development, manufacture, use, recycling and disposal of the product. Particle size is one of the factors that make it very invasive to the human body and can generate environmental impacts, such as exposure to ecosystems. Professional exposure to these nanoparticles must be linked to methods of analysis of the operating environment, the study of nanoparticles for the recognition of physical and chemical characteristics in order to verify the risks when coming into contact with the human body, equipment to periodically control the levels of nanometric particles suspended in the air, and if necessary, collective and individual protection equipment to minimize or eliminate these harmful effects. In this scenario, research aimed at mitigating measures of the impact of nanoparticles on workers' health needs to develop at the same pace as the growth in production of this technology and the emergence of new ones. It is a continuous process and the risks of this activity need to be monitored according to the process and characteristics of the manipulated nanoparticle.

KEYWORDS: Nanomaterials; worker's health; risk; safety; nanoparticles.

1 INTRODUÇÃO

Com o surgimento de novas tecnologias, o ambiente ocupacional caminha para mudanças necessárias a fim de garantir a segurança e saúde dos trabalhadores. Essas mudanças podem estar relacionadas ao surgimento de novos materiais, como é o caso das nanopartículas. Por causa do tamanho reduzido, as partículas se tornam bastante invasivas ao corpo humano e podem entrar por diversas vias, ainda sendo desconhecido a total dimensão dos danos causados aos que manuseiam esses produtos. A partir disso, é necessário implementar meios de prevenção e dimensionar os riscos causados ao trabalhador. As técnicas ainda estão em desenvolvimento, por ser uma tecnologia recente, permitindo futuramente avaliar a exposição ocupacional das nanopartículas com maior precisão (MATOS; SANTOS; BARBOSA, 2011a).

Nanomateriais podem assumir a forma de partículas, tubos, filmes, compostos, fios, flocos e fibras. Podem entrar no corpo humano por inalação, ingestão e / ou contato com a pele durante a fabricação, usinagem, transporte, montagem de componentes, manuseio na síntese em laboratórios (SILVA; AREZES; SWUSTE, 2015) e até a possibilidade de exposição dos consumidores (HSU; CHEIN, 2007) podendo permanecer no corpo por um longo período. Como os nanomateriais são formados por diferentes compostos com várias áreas de superfície, tamanhos, formas, cargas superficiais e energias, eles podem interagir com o tecido humano, danificar ou matar células e órgãos, bloquear o fluxo sanguíneo e causar doenças graves (HAYNES; ASMATULU, 2013).

A exposição a nanopartículas pode se comportar de três formas distintas de exposição: inalação, ingestão e contato dérmico. A entrada dessas partículas se dá pelo trato respiratório e podem se depositar em distintas regiões do organismo como, por exemplo, no sistema gastrointestinal após a ingestão ou por deglutição. No caso da penetração cutânea, os estudos ainda não são avançados para confirmar esse tipo de exposição através do suor, irritações da pele e poros. Os conhecimentos atuais sobre os riscos toxicológicos ainda são insuficientes e bastante limitados, embora já se apontem a possibilidade de se transportarem para órgãos ou tecidos longe da zona de entrada provocando possíveis patologias respiratórias, cardiovasculares

e do sistema nervoso central (MATOS; SANTOS; BARBOSA, 2011b).

Milhões de toneladas de nanomateriais são produzidos no mundo para fins comerciais e como subprodutos da atividade humana. Incluem, portanto, filtros solares e tintas à base de nanopartículas de titânio (FONSECA et al., 2021), lubrificantes sólidos à base de nanopartículas de sílica, sabões e detergentes à base de proteínas, remediação ambiental através de nanopartículas de metais e nanopartículas de carbono usados em compósitos aplicados em produtos farmacêuticos e dispositivos eletrônicos. Sobre os subprodutos na forma de nanopartículas, podemos exemplificar emissões devido à combustão incompleta de óleo diesel ou minerais resultantes da drenagem ácida em operações de mineração. O revestimento, agregação e desagregação da superfície determinam em grande parte a biodisponibilidade e o comportamento das nanopartículas, controlando o transporte nas águas superficiais e subterrâneas e a sedimentação nas águas superficiais ou deposição nos solos (SIMONET; VALCÁRCEL, 2009a).

Os trabalhadores são as primeiras pessoas expostas aos riscos potenciais de qualquer nova tecnologia, incluindo nanotecnologia, uma vez que estão envolvidos na pesquisa, desenvolvimento, fabricação, produção, uso, reciclagem e descarte de nanomateriais ou produtos que contenham nanomateriais. Esses geralmente têm a maior exposição, o que pode ocorrer no início do desenvolvimento de uma tecnologia, quando os perigos e riscos são incertos (SCHULTE et al., 2014a). Portanto, esse estudo objetiva esclarecer alguns conceitos acerca do risco no manuseio de materiais a nível nanométrico e o impacto na saúde do trabalhador caso as medidas mínimas de segurança não sejam adotadas.

2 METODOLOGIA

A pesquisa realizada foi baseada numa revisão integrativa da literatura, onde foram feitas buscas direcionadas à segurança do trabalho, desenvolvimento de novos materiais a nível nanométrico e o impacto do manuseio desses materiais na saúde humana utilizando como ferramenta as bases de dados Scopus e Google Acadêmico. A pesquisa se baseou em artigos direcionados ao efeito de nanopartículas na saúde humana e optou-se pelas palavras-chave

Nanoparticles e Occupactional environmental (Título-Resumo-Palavras-Chave) na base de dados Scopus. Foram obtidos 381 resultados, porém incluiu-se os que se enquadravam no tipo de documento "Artigo". Portanto, 222 artigos foram analisados através dos títulos, 50 escolhidos para análise de resumos e, por fim, 27 selecionados para compor a revisão. Para potencializar as discussões apresentadas, foram incluídos mais 33 artigos da base de dados do Google Acadêmico. Por fim, 60 artigos foram referenciados nesse estudo. Através das referências utilizadas no levantamento bibliográfico, foram obtidas informações relevantes quanto à importância do tema e mais precisamente exploradas nos resultados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A exposição do trabalhador às partículas no momento do manuseio através da inalação pode ser perigosa, dependendo da natureza química e do tamanho, devido a capacidade intrínseca do material de se depositar em regiões do pulmão e a possibilidade de atingir a corrente sanguínea. Podemos também classificá-las em nanopartículas (diâmetro abaixo de 100nm) e partículas ultrafinas (diâmetro entre 100nm e 300nm). As medidas de segurança recomendadas na indústria de nanomateriais são pragmáticas, visando a minimização da exposição em geral e defendendo o controle contínuo por meio do monitoramento do nível de poluição do ar no local de trabalho e da exposição pessoal a nanopartículas no ar. A avaliação de risco no ambiente de trabalho só pode ser feita a partir da identificação e avaliação das propriedades toxicológicas das partículas projetadas e/ou liberadas (MARRA; VOETZ; KIESLING, 2010a).

Uma das formas de medição da exposição de trabalhadores que manuseiam nanopartículas é a colocação de amostradores estáticos no ambiente de trabalho, e os individuais, com a utilização de filtros na zona de respiração do trabalhador. Esses equipamentos fazem a leitura em tempo real e permite uma análise mais segura da possível quantidade de nanomaterial que seria inalado pelo profissional. O procedimento adequado para a leitura do aparelho é comparar com a situação antes do início dos serviços e posterior ao tempo de produção, para que haja dados de referência. Em geral, os dados que são analisados pelos métodos usualmente empregados nessas análises são o tamanho da partícula, área de superfície, massa, concentração e composição química. (MATOS;

SANTOS; BARBOSA, 2011a).

Existem diversas técnicas capazes de identificar os níveis de exposição às partículas muito pequenas. Uma delas é a Técnica de Avaliação de Emissão de Nanopartículas (NEAT) que usa uma combinação de técnicas de medição e instrumentação para análise de exposição por meio de inalação em instalações que manuseiam ou produzem nanomateriais projetados. Essa técnica usa instrumentação portátil, facilitando o transporte, e análise através de amostras de ar através de filtros. O uso de amostras com base em filtro é crucial para fins de identificação porque os contadores de partículas são geralmente insensíveis à fonte ou composição de partículas e tornam difícil diferenciar entre nanomateriais incidentais e relacionados ao processo usando apenas concentração de número (METHNER et al., 2010).

Trabucco *et. al.* (2022) realizaram medições através da densidade de nanopartículas (TiO₂ e AgHEC) por duas técnicas distintas: uma baseada na concentração de partículas em massa e volume e outra baseada na razão entre o diâmetro aerodinâmico e geométrico das partículas. Porém, os valores são influenciados pelos métodos de atomização, as técnicas usadas para calcular a densidade, os instrumentos usados para emissão de partículas e baixas emissões no processo. Diante dessas variáveis, esses métodos não garantem precisão nos resultados, mas que estão dentro do erro experimental (TRABUCCO et al., 2022).

Stebounova *et. al.* (2018) (STEBOUNOVA et al., 2018) utilizaram um amostrador de deposição respiratória de nanopartículas para analisar concentrações em ambientes ocupacionais. Esse amostrador foi desenvolvido para coletar, de forma separada, nanopartículas de partículas maiores através de um impactador, que remove as partículas acima de 300nm do fluxo de ar, e um cilindro de espuma de poliuretano coleta as partículas menores que 300nm. Portanto, de acordo com esse estudo, o amostrador é capaz de medir com precisão as concentrações de nanopartículas no ambiente industrial. O uso de pré-separadores aerodinâmicos é altamente recomendável para partículas com tamanho maior que 400nm, pois pode influenciar significativamente nos resultados de medição dos instrumentos (TODEA et al., 2017).

A toxicidade e reatividade das nanopartículas

dependem da sua morfologia, tamanho e forma. Isso reforça a utilização de métodos analíticos que oferecem medições de tamanho, como primeira análise importante. Portanto, uma medição preciso tamanho de partícula é uma questão importante para a aplicação de nanopartículas na ciência e tecnologia, bem como um pré-requisito para avaliar os perigos potenciais (BUHR et al., 2009). Com base nos fatos relatados, os requisitos analíticos para uma avaliação precisa da toxicidade das nanopartículas incluem amostragem, tratamento de amostra, separação de nanopartículas e capacidades de detecção de nanopartículas (SIMONET; VALCÁRCEL, 2009b).

Alguns estudos utilizam técnicas para caracterização de nanopartículas, como por exemplo, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (WASISTO; UHDE; PEINER, 2016; WOLLSCHLÄGER et al., 2017; YUVASHREE; LAKSHMI; RAGHUNANDHAKUMAR, 2020), Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) (AARZOO et al., 2022; LIU et al., 2021; WEST et al., 2021), Microscopia de Força Atômica (AFM) (BELLOTTI; PICOTTO; RIBOTTA, 2022; CHOI et al., 2022) e espectroscopias (Raman e infravermelho) (PETREANU et al., 2022). Devido a sua alta resolução e alta velocidade no processamento de imagens, o MEV e o MET são métodos padrão para imagens diretas e dimensionais em escala micro e nano. Embora os METs normalmente alcancem uma resolução lateral mais alta em relação aos Microscópios eletrônicos de varredura devido às energias dos elétrons bem acima de 100eV, os custos de compra e operação são mais elevados. Segundo os estudos de Kurjane et al. (KURJANE et al., 2017), através da Microscopia Eletrônica de Varredura foi possível mostrar que as partículas de poeira dos locais de trabalho compreendem todos os três grupos de tamanho e partículas (microscópicas, ultramicroscópicas e nanométricas) e que partículas das amostras de indústrias de metal contêm mais poeira de tamanho ultramicroscópico e nanométrico e menos pó de tamanho microscópico (inorgânico e orgânico).

Podemos destacar um avanço tecnológico relacionado a métodos mais simples e econômicos de detecção de propriedades físico-químicas de nanopartículas, como é o caso do método de dispersão de luz dinâmica e espectrometria de emissão atômica de plasma acoplado indutivamente (FOREST; VERGNON; POURCHEZ, 2017; GRAFF et al., 2017; IWASAWA

et al., 2013). Clement et al. (CLEMENTE et al., 2018) avaliaram a exposição ambiental e ocupacional às nanopartículas por meio de algumas técnicas para identificar a concentração dos aerossóis gerados a partir de pós secos e distribuição de tamanho de partícula com o auxílio de dois espectrômetros. As técnicas de MEV e MET também se mostraram eficientes com a coleta de nanopartículas coletadas na câmara de teste. Chen et al. (CHEN et al., 2016) utilizou um espectrômetro de partículas de varredura ou mobilidade sequencial para caracterizar algumas nanopartículas transportadas pelo ar e concluiu que a técnica não é a mais adequada para identificar concentração e distribuição de tamanho sendo necessário o uso de técnicas complementares. Portanto, a avaliação completa do risco deve considerar não apenas a avaliação de exposição, mas o conhecimento específico da toxicidade da nanopartícula. As NP liberadas no ambiente ocupacional podem ser diferentes das produzidas por outras fontes (poluição do ar, por exemplo) e precisam ser identificadas e desconsideradas na avaliação dos riscos relativos às partículas geradas no local de trabalho (MARRA; VOETZ; KIESLING, 2010b).

É necessário que ocorra o desenvolvimento responsável e seguro da nanotecnologia, pois ainda existem muitas incógnitas e preocupações sobre os nanomateriais. Portanto, é prudente tratá-los como potencialmente perigosos até que haja toxicologia suficiente e que todos os dados de exposição sejam coletados para avaliações de risco e perigo específico de nanomateriais. De fato, a toxicologia deve ser aplicada dentro do contexto de exposição, com toda a especificidade da realidade de vida e trabalho (FRIEDRICH et al., 2022). Nesse período emergente, é preciso ter clareza sobre a extensão da incerteza, necessidade de ações prudentes, estudos que abordem o assunto, bem como promover o desenvolvimento seguro da nanotecnologia e a realização de seus benefícios sociais e comerciais (SCHULTE et al., 2014b).

A partir das pesquisas na área farmacêutica que vários conhecimentos dos efeitos das partículas na saúde foram surgindo, como por exemplo, a toxicologia, cinética farmacológica e distribuição de medicamentos. A interação de forma prolongada entre as partículas nanométricas e as células consiste em um aspecto importante para o estímulo de inflamação e a transferência intersticial das partículas. A toxicidade depende diretamente da natureza das partículas, ou seja, se são intrinsecamente tóxicas (como o quartzo) ou não

(como o dióxido de titânio e o carbono). No caso de materiais não tóxicos, a dose efetiva e a toxicidade estão relacionadas diretamente com a superfície específica da partícula. É uma característica que envolve também materiais considerados inertes, e que demonstraram respostas significativas quanto a forma das nanopartículas (Por exemplo, o Teflon de 30nm). Por outro lado, os nanomateriais tóxicos tem um agravante em relação à área superficial. Os metais de transição, por exemplo, podem gerar radicais livres em muitas nanopartículas, gerando danos oxidativos e estimulação celular (WU, 2005). Portanto, a seguir, é apresentada uma visão geral das características e riscos da exposição de algumas das principais classes de nanopartículas citadas nessa revisão integrativa: o dióxido de titânio, nanotubos de carbono e metais em geral.

3.1 TOXICIDADE DE NANOPARTÍCULAS DE TiO₂

As nanopartículas de dióxido de titânio (TiO₂) vem alcançando destaque na indústria devido a diversidade de produtos que podem ser fabricados utilizando essa nanopartícula, em especial nas áreas biomédicas (JAFARI et al., 2020), cosméticas (YOROV et al., 2021) e até mesmo na construção civil devido a suas propriedades fotocatalíticas (BATSUNGNOEN et al., 2020; SPINAZZÈ et al., 2016). Como foi exposto, o aumento da área superficial tem impacto positivo nas características dos produtos, porém pode apresentar um impacto negativo em relação à saúde humana e degradação do meio ambiente. As nanopartículas de TiO₂ são capazes de entrar diretamente no corpo humano e pode apresentar efeitos graves no fígado, cérebro, baço e rim pois conseguem interagir com sistemas biológicos e cruzar essas barreiras. Por outro lado, os sistemas fisiológicos podem auxiliar no combate a toxicidade dessas nanopartículas e desempenhar função mitigadora dos efeitos adversos. A melhor compreensão das vias de sinalização subjacentes da morte celular pode ser uma abordagem direta para mitigar as consequências indesejadas (DAR; SAEED; WU, 2020).

Segundo os estudos de Hsiao et. al. (HSIAO; HUANG, 2011), nanopartículas de diferentes propriedades químicas e composições acabam seguindo vias de absorção distintas e empregam diferentes mecanismos para suas respostas biológicas finais. Portanto, não é possível estudar apenas um tipo de nanopartícula e generalizar a toxicologia desse grupo de materiais. Nesse estudo, os autores usaram nanopartículas autosintetizadas,

que forneceram nanopós deformato e tamanho controlados, para realizar testes de toxicidade *in vitro*. Primeiro foi analisado nanopartículas de ZnO, e concluiu-se que há influência do tamanho e forma na atividade mitocondrial e a produção de quimiocinas de células A549 (células do epitélio pulmonar humano). Uma grande contribuição foi a área superficial específica em relação a área de superfície real – através da qual as partículas entraram em contato com células internas – afetando assim a toxicidade. A estrutura cristalina nano-TiO₂ também influenciou na citotoxicidade, além das demais características também observadas no ZnO.

Devido ao tamanho das partículas de TiO₂, mesmo em pequenas doses, a exposição regular pode afetar o cérebro, mucosa intestinal, coração e outros órgãos internos, aumentando os riscos de desenvolvimento de doenças como tumores e cânceres. A toxicidade de nanopartículas é uma área importante para pesquisas futuras, visto que ainda não foram totalmente elucidados os mecanismos atribuídos ao comportamento das NP no corpo humano (BARANOWSKA-WÓJCIK et al., 2020). Nos estudos de Higashikubo et.al. (2021), Fonseca et.al. (2021) e Kaminski et. al (2015), foram analisadas partículas encontradas nos ambientes de trabalho que utilizam o TiO₂ como componente no processo industrial, e identificaram partículas maiores e aglomerados que não ultrapassam os limites de exposição estabelecidos por normas vigentes (FONSECA et al., 2021; HIGASHIKUBO et al., 2021; KAMINSKI et al., 2015). Porém, essas partículas de TiO₂ também podem se apresentar de uma forma mais alongada, na forma rutilo, e desencadear um risco maior de um processo inflamatório no organismo (LA MAESTRA et al., 2021). Portanto é necessário a implantação de medidas adequadas para diminuir essa exposição através de protetores para poeira respirável e gerenciamento adequado do período de trabalho (HIGASHIKUBO et al., 2021).

3.2 TOXICIDADE DE NANOTUBOS DE CARBONO

Os nanotubos de carbono também são caracterizados pela sua elevada produção no emprego de materiais tecnológicos devido as suas propriedades únicas. O aumento na fabricação dessas nanopartículas vem aliado à maior exposição humana e deve ser submetido a análise toxicológica. Podem ter características tanto de nanopartículas, como de fibras convencionais e isso gera uma toxicidade incomum em relação a materiais

semelhantes. De acordo com a literatura, o uso de nanotubos de carbono estimula o crescimento de células mesenquimais e pode causar a formação de granulomas e fibrogênese. Portanto, não há nenhum estudo de inalação disponível que evite o efeito potencial durante a exposição. Estudos também mostram que os nanotubos de carbono podem exibir alguns de seus efeitos por meio de estresse oxidativo e da inflamação (CUI et al., 2005; DONALDSON et al., 2006).

Devido a dados escassos de estudos citotóxicos, o perfil toxicológico dos nanotubos de carbono a nível laboratorial não pode ser avaliado. Várias características da partícula podem influenciar no comportamento e contato com o corpo humano: propriedades físico-químicas, extensão e modo de exposição, concentração, métodos de síntese e dispersão. Mesmo o uso sendo extensa atualmente, a maioria dos aspectos de toxicidade ainda precisa ser aprofundado. (KUMAR BABELE; VERMA; BHATIA, 2021).

3.3 TOXICIDADE DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS

A liberação de íons metálicos particularmente reativos capazes de atravessar as membranas celulares também tem sido implicada na toxicidade das nanopartículas. A produção de radicais livres de oxigênio é um mecanismo predominante que leva à carcinogênese induzida por nanopartículas metálicas (MEDICI et al., 2021). No estudo feito por Curwin et. al. (2011) os trabalhadores realizando tarefas de manuseio em grandes instalações tiveram maiores concentrações de nanopartículas no organismo. Porém, concentrações de massa mais altas aconteceram em instalações de porte médio e durante a produção. A concentração maior se deu no ar, com maior número de partículas suspensas, seguidas de instalações pequenas para todos os tamanhos de partículas medidos. Semelhante ao número de partículas, as instalações de tamanho médio e o processo de produção tiveram a maior concentração de área de superfície de partículas. A análise de Microscopia Eletrônica de Transmissão confirmou a presença de nanopartículas de óxidos metálicos, e em sua grande maioria, partículas aglomeradas, predominantemente de diâmetro variando entre 0,1 e 1 μm (CURWIN; BERTKE, 2011).

Um estudo desenvolvido por Thanachoksawang et. al. (2022) avaliou a exposição e risco à saúde de nanopartículas metálicas em soldadores. O processo de soldagem é capaz de emitir altos níveis

de nanopartículas metálicas suspensas no ar há uma produção significativa de partículas ultrafinas com capacidade de atingir o sistema respiratório e atingindo os alvéolos e corrente sanguínea (AVINO et al., 2015). Nesse estudo os trabalhadores foram expostos a essas NP em altas concentrações por um período longo de trabalho. O objetivo principal era investigar os efeitos biológicos causados por essa exposição. Os resultados mostraram que a toxicidade das nanopartículas metálicas gerou dano oxidativo ao DNA e respostas inflamatórias, induzindo danos progressivos relacionados à mutagenicidade e desenvolvimento do câncer. Mitra et. al. (2021) identificou que para atividades como a soldagem, máscara facial plissada é bastante eficaz para manter o padrão de filtragem exigido para respiradores N95 para partículas entre 10nm e 150nm, mostrando-se ineficiente para tamanhos de partículas menores (MITRA et al., 2021). No estudo feito por Graff et. al. (2016), foram analisados os pós-advindos de atividades da manufatura aditiva contendo essencialmente cromo, níquel e cobalto. Os resultados mostraram que há riscos de exposição e tende a diminuir como pó metálico reciclado em relação ao novo (GRAFF et al., 2017). Azzougagh et. al. (2021) também analisou a exposição ocupacional no ambiente de manufatura aditiva, identificaram partículas variando de 10nm a 10 μm foi reforçado no estudo a necessidade na utilização de equipamentos de proteção individual, utilização de um sistema de coleta para garantir a vedação, além da segurança das pessoas e dos equipamentos. (AZZOUAGH et al., 2021). Em contrapartida, o estudo desenvolvido por Dierschke et. al. (2017) não identificaram efeitos clínicos adversos da exposição à soldagem em relação aos sintomas e à função pulmonar, porém afirmaram que mesmo abaixo dos limites toleráveis, efeitos subclínicos ainda foram identificados (DIERSCHKE et al., 2017).

O equilíbrio adequado de íons metálicos no corpo humano é essencial para a vida e qualquer desequilíbrio pode desencadear o desenvolvimento de estados patológicos, como por exemplo, a intrusão de outros íons metálicos (considerados tóxicos). O diagnóstico adequado é difícil quanto à intoxicação por metais e o monitoramento ambiental de metais e nanopartículas são essenciais para a redução de perigos e identificação de possíveis patologias associadas à exposição (LACHOWICZ et al., 2021). É importante haver uma padronização nas condições de teste de toxicidade e caracterização de nanomateriais e empregar mais técnicas biológicas avançadas que vão além de testes simples de toxicidade a informações sobre o mecanismo específico para a nanopartícula

analisada. Outro dado essencial para analisar os riscos ao ser humano são as concentrações reais presentes no meio ambiente e estas de toxicidade, ao invés de analisar concentrações excessivamente altas nos testes (DJURIŠIĆ et al., 2015). Essa padronização é essencial para a quantificação da repetibilidade e avaliação da reprodutividade, fornecendo uma comparação eficiente dos resultados e auxiliando na gerência de nano-riscos nas diferentes indústrias (VAQUERO et al., 2016).

Além dos danos aos pulmões quando inaladas e aos tecidos, as nanopartículas podem induzir reação pró-inflamatória e estresse oxidativo, levando ao surgimento de doenças como os cânceres. Devido ao tamanho das partículas, há uma facilidade em atravessar a barreira sangue-ar e distribuir-se para outros órgãos do corpo humano (FOREST; POURCHEZ, 2023). Li e Cummins (2020) (LI; CUMMINS, 2020) mostraram a necessidade de estudos relacionados à nanopartículas específicas. Os autores estudaram os riscos ao ser humano exposto às nanopartículas de prata e concluíram que, além da toxicidade aguda em órgãos principais, incluindo fígado, rins e pulmões, o potencial de neurotoxicidade aguda também é uma questão preocupante, que pode ser induzida por doses menores. Yang et. al. (YANG et al., 2019) desenvolveram um método de avaliação e risco de exposição humana às nanopartículas de prata. Esse método fornece uma visão considerável sobre a relação entre as características dos produtos metálicos em spray contendo nanopartículas e as toxicidades correspondentes em várias escalas de tempo.

4 CONCLUSÕES

As nanopartículas vêm sendo caracterizadas através de uma multiplicidade de técnicas, porém a precisão de análises em amostras ambientais requer o desenvolvimento de técnicas existentes e que forneçam uma pré-concentração eficaz e detecção de forma complexa e com poder de resolução variável (nanométrico, micrométrico e métrico). As análises microestruturais são de extrema importância e devem ser mais exploradas para a caracterização inicial das nanopartículas, como tamanho, forma, composição, concentração e área superficial. Esses parâmetros permitirão que as informações sejam processadas para avaliar os riscos potenciais no ambiente ocupacional e para o desenvolvimento de novos equipamentos de proteção individual e coletiva. Portanto é

necessário desenvolver novos métodos de avaliação de toxicidade respeitando as características de cada tipo de partícula e concentração, e para o entendimento dos mecanismos de interação biológica, evitando efeitos nocivos ao corpo humano.

REFERÊNCIAS

- [1] AARZOO et al. Synthesis and characterization of palladium nanoparticles by varying size, shape and synthetic approach: A comparative risk assessment study in-vitro as a step towards the development of safe and sustainable nanotechnology. **Atmospheric Pollution Research**, v. 13, n. 8, p. 101505, ago. 2022.
- [2] AVINO, P. et al. Submicron particles during macro- and micro-weldings procedures in industrial indoor environments and health implications for welding operators. **Metals**, v.5, n.2, p. 1045–1060, 9 jun. 2015.
- [3] AZZOUAGH, M. N. et al. Occupational exposure during metal additive manufacturing: A case study of laser powderbed fusion of aluminum alloy. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 18, n. 6, p. 223–236, 2021.
- [4] BARANOWSKA-WÓJCIK, E. et al. Effects of Titanium Dioxide Nanoparticles Exposure on Human Health — a Review. p. 118–129, 2020.
- [5] BATSUNGNOEN, K. et al. Airborne reactive oxygen species (ROS) is associated with nano TiO₂ concentrations in aerosolized cement particles during simulated work activities. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 22, n. 7, 1 jul. 2020.
- [6] BELLOTTI, R.; PICOTTO, G. B.; RIBOTTA, L. AFM Measurements and Tip Characterization of Nanoparticles with Different Shapes. **Nanomanufacturing and Metrology**, v. 5, n. 2, p. 127–138, 1 jun. 2022.
- [7] BUHR, E. et al. Characterization of nanoparticles by scanning electron microscopy in transmission mode. **Measurement Science and Technology**, v. 20, n. 8, 2009.
- [8] CHEN, B. T. et al. Performance of a scanning mobility particle sizer in measuring diverse types of airborne nanoparticles: Multi-walled carbon nanotubes, welding fumes, and

- titanium dioxide spray. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 13, n. 7, p. 501–518, 2 jul. 2016.
- [9] CHOI, J. et al. Mechanical characterization of multi-layered lipid nanoparticles using high-resolution AFM force spectroscopy. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 113, p. 283–292, 25 set. 2022.
- [10] CLEMENTE, A. et al. A versatile generator of nanoparticle aerosols. A novel tool in environmental and occupational exposure assessment. **Science of The Total Environment**, v. 625, p. 978–986, 1 jun. 2018.
- [11] CUI, D. et al. Effect of single wall carbon nanotubes on human HEK293 cells. **Toxicology Letters**, v. 155, n. 1, p. 73–85, 2005.
- [12] CURWIN, B.; BERTKE, S. Exposure characterization of metal oxide nanoparticles in the workplace. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 8, n. 10, p. 580–587, 2011.
- [13] DAR, G. I.; SAEED, M.; WU, A. Toxicity of TiO₂ nanoparticles. **TiO₂ Nanoparticles: Applications in Nanobiotechnology and Nanomedicine**, p. 67–103, 2020.
- [14] DIERSCHKE, K. et al. Acute respiratory effects and biomarkers of inflammation due to welding-derived nanoparticle aggregates. **International Archives of Occupational and Environmental Health**, v. 90, n. 5, p. 451–463, 1 jul. 2017.
- [15] DJURIŠIĆ, A. B. et al. Toxicity of metal oxide nanoparticles: Mechanisms, characterization, and avoiding experimental artefacts. **Small**, v. 11, n. 1, p. 26–44, 7 jan. 2015.
- [16] DONALDSON, K. et al. Carbon nanotubes: A review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety. **Toxicological Sciences**, v. 92, n. 1, p. 5–22, 2006.
- [17] FONSECA, A. S. et al. Occupational Exposure and Environmental Release: The Case Study of Pouring TiO₂ and Filler Materials for Paint Production. **International Journal of Environmental Research and Public Health** 2021, Vol. 18, Page 418, v. 18, n. 2, p. 418, 7 jan. 2021.
- [18] FOREST, V.; POURCHEZ, J. Human biological monitoring of nanoparticles, a new way to investigate potential causal links between exposure to nanoparticles and lung diseases? **Pulmonology**, v. 29, n. 1, p. 4–5, 1 jan. 2023.
- [19] FOREST, V.; VERGNON, J.-M.; POURCHEZ, J. Biological Monitoring of Inhaled Nanoparticles in Patients: An Appealing Approach To Study Causal Link between Human Respiratory Pathology and Exposure to Nanoparticles. **Chemical Research in Toxicology**, p. 10–15, 2017.
- [20] FRIEDRICH, K. et al. Toxicologia crítica aplicada aos agrotóxicos – perspectivas em defesada vida. **Saúde em Debate**, v. 46, n. spe2, p. 293–315, 2022.
- [21] GRAFF, P. et al. Evaluating Measuring Techniques for Occupational Exposure during Additive Manufacturing of Metals: A Pilot Study. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. S1, p. S120–S129, 1 nov. 2017.
- [22] HAYNES, H.; ASMATULU, R. Nanotechnology Safety in the Aerospace Industry. **Nanotechnology Safety**, p. 85–97, 2013.
- [23] HIGASHIKUBO, I. et al. Worker’s personal exposure to pm_{0.1} and pm₄ titanium dioxide nanomaterials during packaging. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 21, n. 6, 1 jun. 2021.
- [24] HSIAO, I. L.; HUANG, Y. J. Effects of various physicochemical characteristics on the toxicities of ZnO and TiO₂ nanoparticles toward human lung epithelial cells. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 7, p. 1219–1228, 2011.
- [25] HSU, L. Y.; CHEIN, H. M. Evaluation of nanoparticle emission for TiO₂ nanopowder coating materials. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 9, n. 1, p. 157–163, jan. 2007.
- [26] IWASAWA, S. et al. [Work environment measurements of nanoparticles in the nanoparticle-handling-process using portable type particle sizer spectrometers]. **Sangyō eiseigaku zasshi = Journal of occupational health**, v. 55, n. 6, p. 269–272, 2013.

- [27] JAFARI, S. et al. Biomedical applications of TiO₂ nanostructures: Recent advances. **International Journal of Nanomedicine**, v. 15, p. 3447–3470, 2020.
- [28] KAMINSKI, H. et al. Measurements of nanoscale TiO₂ and Al₂O₃ in industrial workplace environments – Methodology and results. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 15, n. 1, p. 129– 141, 2015.
- [29] KUMAR BABELE, P.; VERMA, M. K.; BHATIA, R. K. Carbon nanotubes: A review on risks assessment, mechanism of toxicity and future directives to prevent health implication. **Tech Science Press**, 2021.
- [30] KURJANE, N. et al. The effect of different workplace nanoparticles on the immune systems of employees. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 19, n. 9, 2017.
- [31] LA MAESTRA, S. et al. Dispersion of natural airborne TiO₂ fibres in excavation activity as a potential environmental and human health risk. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 12, 2 jun. 2021.
- [32] LACHOWICZ, J. I. et al. Metals and Metal-Nanoparticles in Human Pathologies : From Exposure to Therapy. **Molecules**, 2021.
- [33] LI, Y.; CUMMINS, E. Toxic/ Hazardous Substances and Environmental Engineering Hazard characterization of silver nanoparticles for human exposure routes. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 55, n. 6, p. 704–725, 2020.
- [34] LIU, X. X. et al. In-situ liquid phase transmission electron microscope and its application in nanoparticle characterization. **Wuli Xuebao/Acta Physica Sinica**, v. 70, n. 8, 20 abr. 2021.
- [35] MARRA, J.; VOETZ, M.; KIESLING, H. J. Monitor for detecting and assessing exposure to airborne nanoparticles. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 12, n. 1, p. 21–37, 2010a.
- [36] MARRA, J.; VOETZ, M.; KIESLING, H. J. Monitor for detecting and assessing exposure to airborne nanoparticles. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 12, n. 1, p. 21–37, jan. 2010b.
- [37] MATOS, L.; SANTOS, P.; BARBOSA, F. As nanopartículas em ambientes ocupacionais. **Segurança**, v. 202, p. 10–14, 2011a.
- [38] MATOS, L.; SANTOS, P.; BARBOSA, F. As nanopartículas em ambientes ocupacionais. **Segurança**, v. 202, p. 10–14, 2011b.
- [39] MEDICI, S. et al. An updated overview on metal nanoparticles toxicity. **Seminars in Cancer Biology**, v. 76, p. 17–26, 1 nov. 2021.
- [40] METHNER, M. et al. Nanoparticle Emission Assessment Technique (NEAT) for the Identification and Measurement of Potential Inhalation Exposure to Engineered Nanomaterials — Part A. v. 9624, 2010.
- [41] MITRA, A. et al. Evaluation of a filtering facepiece respirator and a pleated particulate respirator in filtering ultrafine particles and submicron particles in welding and asphalt plant work environments. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 12, 2 jun. 2021.
- [42] PETREANU, I. et al. Structural Characterization of Silica and Amino-Silica Nanoparticles by Fourier Transform Infrared (FTIR) and Raman Spectroscopy. **Analytical Letters**, 2022.
- [43] SCHULTE, P. A. et al. Occupational safety and health criteria for responsible development of nanotechnology. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 16, n. 1, 2014a.
- [44] SCHULTE, P. A. et al. Occupational safety and health criteria for responsible development of nanotechnology. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 16, n. 1, 2014b.
- [45] SILVA, F.; AREZES, P.; SWUSTE, P. Risk assessment in a research laboratory during sol-gel synthesis of nano-TiO₂. **Safety Science**, v. 80, p. 201–212, 1 dez. 2015.
- [46] SIMONET, B. M.; VALCÁRCEL, M. Monitoring nanoparticles in the environment. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 393, n. 1, p. 17–21, 2009a.
- [47] SIMONET, B. M.; VALCÁRCEL, M. Monitoring nanoparticles in the environment. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**,

v. 393, n. 1, p. 17–21, 2009b.

- [48] SPINAZZÈ, A. et al. Titanium dioxide nanoparticles: occupational exposure assessment in the photocatalytic paving production. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 18, n. 6, 1 jun. 2016.
- [49] STEBOUNOVA, L. V. et al. Particle concentrations in occupational settings measured with a nanoparticle respiratory deposition (NRD) sampler. **Annals of Work Exposures and Health**, v. 62, n. 6, p. 699–710, 6 jul. 2018.
- [50] THANACHOKSAWANG, C. et al. Exposure to airborne iron oxide nanoparticles induces oxidative DNA damage and inflammatory responses: a pilot study in welders and in human lung epithelial cell line. **Toxicology and Environmental Health Sciences**, v. 14, n. 4, p. 339–349, 2022.
- [51] TODEA, A. M. et al. Inter-comparison of personal monitors for nanoparticles exposure at workplaces and in the environment. **Science of The Total Environment**, v. 605–606, p. 929–945, 15 dez. 2017.
- [52] TRABUCCO, S. et al. Measuring TiO₂N and Ag/HEC Airborne Particle Density during a Spray Coating Process. **Toxics**, v. 10, n. 9, 1 set. 2022.
- [53] VAQUERO, C. et al. Exposure assessment to engineered nanoparticles handled in industrial workplaces: The case of alloying nano-TiO₂ in new steel formulations. **Journal of Aerosol Science**, v. 102, p. 1–15, 1 dez. 2016.
- [54] WASISTO, H. S.; UHDE, E.; PEINER, E. Enhanced performance of pocket-sized nanoparticle exposure monitor for healthy indoor environment. **Building and Environment**, v. 95, p. 13–20, 1 jan. 2016.
- [55] WEST, G. H. et al. Occupational exposure risk during spraying of biocidal paint containing silver nanoparticles. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, v. 18, n. 6, p. 237–249, 2021.
- [56] WOLLSCHLÄGER, N. et al. Characterization of the inner structure of porous TiO₂ nanoparticle films in dye sensitive solar cells (DSSC) by focused ion beam (FIB) tomography and transmission Kikuchi diffraction (TKD) in the scanning electron microscope (SEM). **Materials Characterization**, v. 131, p. 39–48, 1 set. 2017.
- [57] WU, C. Y. Nanoparticles and the environment. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 55, n. 6, p. 708–746, 2005.
- [58] YANG, Y. et al. Assessing human exposure risk and lung disease burden posed by airborne silver nanoparticles emitted by consumer spray products. **International Journal of Nanomedicine**, p. 1687–1703, 2019.
- [59] YOROV, K. E. et al. Engineering SiO₂-TiO₂ binary aerogels for sun protection and cosmetic applications. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 169, p. 105099, 1 fev. 2021.
- [60] YUVASHREE, C. S.; LAKSHMI, T.; RAGHUNANDHAKUMAR, S. Characterization of asparagus racemosus mediated silver nanoparticles using UV - VIS spectrophotometer and SEM. **Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology**, v. 21, n. 49–50, p. 62–67, 5 nov. 2020.