

NANOTECNOLOGIA EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL: NANOMATERIAIS, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES

Paulo Henrique Ribeiro¹, Julia Wippich Lencioni² e Elias Barros Santos¹

1. Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José do Campos, São Paulo, Brasil;

2. Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.

RESUMO

Pesquisas em nanotecnologia e no desenvolvimento de novos produtos manufaturados com nanomateriais são ativamente conduzidas atualmente em vários segmentos industriais, como por exemplo, eletrônica, cosméticos, energia, etc. No setor de construção civil o uso da nanotecnologia é menos expressivo, mas tem sido notável o crescimento nos últimos 10 anos. Vários trabalhos tem mostrado que a incorporação de nanomateriais em materiais de construção (ex. cimento, concreto, argamassa, madeira, etc), mesmo em pequenas quantidades, promove uma melhora nas propriedades finais do material aditivado. Além de melhorar as propriedades primárias dos materiais de construção, como por exemplo, resistência mecânica e corrosão, as nanopartículas podem agregar novas funcionalidades para as matrizes, como atividade fotocatalítica, atividade antimicrobiana e até autolimpante. Entre as nanopartículas utilizadas para tal finalidade estão os óxidos de titânio, silício, alumínio, ferro e zinco. É também observado um grande interesse no uso de nanomateriais a base de carbono, principalmente nanotubos, nanofibras e grafeno. Além disso, alguns estudos mais recentes têm mostrado que materiais plásticos e resíduos sólidos industriais processados para gerar materiais nanoparticulados, quando incorporados em materiais de construção, também resultam em melhorias de propriedades. O objetivo do presente trabalho é apresentar um levantamento atualizado do uso de nanomateriais nos materiais de construção civil, identificando as propriedades resultantes e aplicações desejadas.

Palavras-chave: Nanotecnologia, Nanomateriais e Materiais de construção.

ABSTRACT

Research in nanotechnology and in the development of new products manufactured with nanomaterials are currently being conducted in various industrial segments, such as electronics, cosmetics, energy, etc. In the civil construction field, the use of nanotechnology is less expressive, but the growth in the last 10 years has been remarkable. Several studies have shown that the incorporation of nanomaterials in construction materials (e.g., cement, concrete, mortar, wood, etc.), even in small amounts, promotes an improvement in the final properties of the modified material. In addition to improving the primary properties of construction materials, such as mechanical resistance and corrosion, nanoparticles can add

new functionality to the matrices, such as photocatalytic activity, antimicrobial activity, and even self-cleaning. Among the nanoparticles used for this purpose are oxides of titanium, silicon, aluminum, iron, and zinc. There is also a great interest in the use of carbon-based nanomaterials, mainly nanotubes, nanofibers, and graphene. In addition, some more recent studies have shown that plastic materials and industrial solid waste processed to generate nanoparticulate materials, when incorporated into construction materials, also result in property improvements. The objective of the present work is to show an updated survey of the use of nanomaterials in civil construction materials, identifying the resulting properties and desired applications.

Keywords: Nanotechnology, Nanomaterials and Construction materials.

1. INTRODUÇÃO

A nanotecnologia é uma área multidisciplinar que, atualmente, tem sido considerada uma prioridade estratégica entre os países desenvolvidos com foco em inovação tecnológica (NANO-MAGAZINE, 2021). Alguns autores apontam a nanotecnologia como uma parte essencial para o desenvolvimento da chamada Indústria 4.0 (RAI; RAI, 2012; RIM PLUS, 2016). A estimativa atual de investimento na área é muito promissora, sendo previsto que o mercado global em nanotecnologia movimentará cerca de U\$ 125 bilhões entre 2018-2024. Os principais setores da economia global que mais investem em nanotecnologia são as áreas de eletrônica, energia, biomédica, cosméticos, defesa, automotiva e agricultura (RESEARCH AND MARKETS, 2018). O setor de construção civil apresenta um investimento modesto em nanotecnologia, mas existem diversas publicações atuais, mostrando um interesse crescente por parte deste segmento (TEIZER et al., 2012; RAO et al., 2015). A principal explicação para o grande interesse em nanotecnologia e a sua disseminação para diversas áreas está relacionado ao melhor desempenho apresentado pelos produtos contendo nanomateriais incorporados, quando comparados com os mesmos produtos sem nanoaditivos (ZHOU et al., 2020). Neste sentido, a nanotecnologia surge como uma área promissora e estratégica para inovação industrial.

Nanomateriais é a definição usada para materiais que apresentam ao menos uma dimensão (tamanho, largura ou altura) na escala nanométrica, entre 1 e 100 nm (JEEVANANDAM et al., 2018). Diversos materiais podem ser preparados em dimensões reduzidas até a escala nanométrica, inclusive apresentando diferentes morfologias, como por exemplo, esferas, cubos, bastões, tubos, placas, etc. (GENTILE; RUFFINO; GRIMALDI, 2016). Nessa escala de tamanho, vários materiais apresentam propriedades diferenciadas quando comparados a sua contraparte micro ou macroscópica, tornando-os interessantes

para o desenvolvimento de novas tecnologias ou para o aperfeiçoamento de tecnologias já existentes. Geralmente, as propriedades dos nanomateriais variam com o tamanho, morfologia e o meio ao qual o material está imerso, sendo parâmetros importantes a serem controlados durante a síntese das nanoestruturas (GILBERTSON et al., 2015). Por exemplo, o ouro, conhecido como metal estável e de cor amarela, quando preparado na forma de nanopartículas esféricas, com dimensão inferior a 100 nm, torna-se muito reativo e pode exibir as cores vermelha, azul ou violeta em função do tamanho da partícula (SILVA et al., 2014). Este tipo de mudança ocorre porque as propriedades ópticas do ouro são afetadas em função da sua redução de tamanho. Isso possibilita que as nanopartículas desse elemento possam ser usadas em aplicações nas quais o ouro em escala micro ou macro não seria adequado.

Dentre os nanomateriais mais estudados e aplicados em nanotecnologias destacam-se as nanopartículas de prata, de dióxido de titânio e de ouro, além de nanoestruturas de carbono, principalmente os nanotubos e o grafeno (ETXEBARRA; GOMEZ-UGANDA; BARRUITA, 2012; ABAMOR; ALLAHVERDIYEU, 2016). Em materiais de construção civil tem sido estudado o potencial uso, principalmente, de nanopartículas de óxidos, tais como SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , ZnO e TiO_2 (HANUS; HARRIS, 2013; LOH; GAYLARDE; SHIRAKAWA, 2018). Tal interesse está relacionado ao fato de o setor de materiais de construção civil demandar grandes quantidades de material. Com isso, os nanomateriais devem ter origem em matérias primas abundantes e/ou serem obtidos a partir de processos químicos de preparação que possam ser escalonados. Além dos óxidos citados, existem diversos estudos e aplicações de nanomateriais de carbono incorporados em materiais de construção, principalmente nanotubos e carbono amorfo (AMIRKHANDANIAN; XIAO, 2011; HAWREEN; BOGAS, 2018). Vários estudos têm mostrado que a adição de nanomateriais em pastas de cimento, concreto, argamassa e aço, resulta na alteração das propriedades desses materiais de construção de forma positiva. Como consequência, tem sido observada uma melhora na resistência mecânica e durabilidade do material aditivado, além da agregação de novas funcionalidades, como por exemplo, propriedade anticorrosiva, autolimpante e antimicrobiana (VENKATANARAYANAN; RANGARAJU, 2014; THAN; LEE, 2017; NAM, 2017). Neste sentido, os materiais de construção aditivados com nanomateriais podem resultar em inovação tecnológica para o setor da construção civil e apresentar vantagens econômicas em relação aos produtos comercializados atualmente.

Diante do contexto apresentado, é possível notar o interesse crescente no uso de nanomateriais como aditivos de materiais de construção com o objetivo de se obter produtos

com propriedades melhoradas, o que trará um impacto significativo no setor de construção civil. Neste trabalho, o foco principal é apresentar uma revisão atualizada das pesquisas aplicadas usando nanotecnologia em materiais de construção. Não é intenção deste artigo, discutir o mérito científico e as discussões técnicas dos trabalhos. Para essa finalidade, recomenda-se ao leitor consultar diretamente a referência de seu interesse. Será apresentada uma revisão de alguns trabalhos publicados nos últimos anos, mostrando os principais nanomateriais estudados, as propriedades resultantes nos materiais de construção e as aplicações finais. Com esse panorama, o presente trabalho traz informações relevantes e atuais sobre o potencial uso de nanotecnologia em materiais de construção civil.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A nanotecnologia tem trazido inovação para vários segmentos industriais e estudos recentes têm apontado que a indústria de materiais de construção tem surgido como um setor com grande potencial de crescimento. Nanomateriais com propriedades, tais como, alta reatividade química, resistência a corrosão, resistência mecânica e alta estabilidade são de grande interesse tecnológico para a área de construção civil. Além disso, o uso de nanomateriais na construção civil também poderá afetar a forma de trabalho no setor, desde a seleção do material de construção aos métodos de processamento e técnicas de manuseio no ambiente de aplicação (ZHENG; LOZANO; MO, 2011; CRUCHO et al., 2019). Isso também mostra que, com a introdução da nanotecnologia em materiais de construção, novas habilidades podem ser demandadas dos profissionais desse setor. Nos próximos tópicos serão apresentadas as principais aplicações de nanomateriais em materiais de construção, enfatizando as propriedades e vantagens resultantes.

2.1. INCORPORAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

A definição clássica de nanopartículas (NPs) é de um agrupamento de átomos ou moléculas ligadas entre si com tamanho variando entre 1 e 100 nm (POOLE JR.; OWENS, 2003). Entretanto, também é aceita a definição de NPs como sendo partículas sólidas que podem ser não-cristalinas, um agregado de cristalitos ou um monocristalito com dimensão entre 1 e 1000 nm (SHIPWAY; WILLNER, 2001). As nanopartículas apresentam

propriedades físicas e químicas diferenciadas das suas contrapartes maiores, principalmente devido ao aumento da razão superfície-volume e dos efeitos quânticos resultantes do confinamento espacial (POOLE JR.; OWENS, 2003). Na literatura revisada, observou-se ser mais comum em materiais de construção civil a incorporação de nanopartículas de óxidos metálicos e semicondutores, com tamanhos variando de 5 a 300 nm, como mostrado na Figura 1 para o TiO_2 .

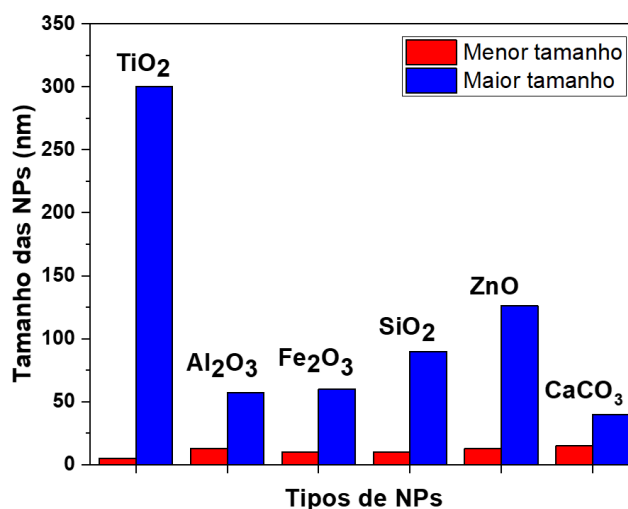


Figura 1. Intervalos de tamanho das nanopartículas incorporadas em materiais de construção encontrados em alguns trabalhos revisados (CAMILETTI; SOLIMAN; NEHDI, 2013; OLTULU; SAHIN, 2013; LIU; LI; XU, 2015; CHEN; KOU; POON, 2012).

O tamanho das NPs é um aspecto extremamente importante a ser considerado do ponto de vista prático, uma vez que as suas propriedades físico-químicas são dependentes deste parâmetro e podem influenciar significativamente a característica final do material aditivado. Isso dificulta fazer comparações diretas da eficiência de diferentes materiais de construção aditivados com o mesmo tipo de nanopartículas. Esta comparação direta só é possível se os materiais forem modificados com o mesmo tipo, tamanho e quantidade de nanopartículas, ou seja, aplicadas exatamente na mesma condição experimental.

Oltulu e Sahin (2013), relataram o uso de NPs comerciais de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 com dimensões de 12, 13 e 60 nm, respectivamente, como aditivos de argamassa. As amostras de argamassa aditivadas com as NPs apresentaram um aumento da resistência mecânica à compressão de 19,2; 5,6 e 4,8 % respectivamente. Além disso, os autores também mostraram que a resistência mecânica à compressão foi melhorada em 31,6 %, quando a argamassa foi aditivada com uma mistura, na mesma proporção, das três nanopartículas, evidenciando um efeito sinérgico cooperativo na propriedade final do material de construção.

Em outro trabalho com argamassa, os autores utilizaram NPs de TiO_2 comercial, com dimensões entre 14 e 21 nm, como aditivo (SMITS et al., 2013). No referido trabalho, os autores mostraram que as peças de argamassa aditivadas com as nanopartículas de dióxido de titânio apresentaram propriedade fotocatalítica, quando expostas a radiação UV, mantendo-se mais limpas do que as peças de argamassa sem o nanoaditivo. Abo-El-Enein et al. (2018) relataram a síntese de nanopartículas de Fe_2O_3 e ZnO com dimensões de 20 e 70 nanômetros, respectivamente, sendo posteriormente incorporadas em pastas cimentantes. No referido trabalho, os autores realizaram testes de calcinação com as pastas aditivadas, entre 300 e 800 °C, sendo observado um aumento da resistência mecânica quando comparadas com a amostra padrão sem adição de nanopartículas.

Além das nanopartículas de óxidos, também são relatados alguns estudos e aplicações de nanopartículas metálicas em materiais de construção, como por exemplo cobre e ferro. Abiraman e Balasubramanian (2017), relataram a aplicação de tintas de revestimento metálico e acrílico, aditivadas com nanopartículas de cobre de 2 nm de diâmetro, em painéis de madeira, concreto e aço. Os painéis revestidos foram mergulhados em tanques, simulando o ambiente marinho, sendo observada uma redução da incrustação de algas e inibição do crescimento de culturas de bactérias, quando comparados com os painéis revestidos com a tinta sem as NPs de Cu. Este estudo mostrou que a incorporação de nanopartículas de cobre na tinta melhorou a resistência dos painéis às condições marinhas. Crucho et al. (2018), estudaram as propriedades de concreto asfáltico modificado com 4% de nanopartículas metálicas de ferro. No referido trabalho, os autores relataram várias melhoras na performance mecânica do asfalto modificado, tais como, aumento de 5% na estabilidade Marshall, menor deformação permanente, aumento da resistência à fratura, entre outras.

2.2. USO DE NANOMATERIAIS DE CARBONO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Os nanomateriais de carbono são alotropias deste elemento que apresentam diferentes formas estruturais, contendo ao menos uma dimensão na escala nanométrica, 1 – 100 nm (ZAYTSEVA; NEUMANN, 2016). Como exemplos, podem ser citados os nanotubos de carbono (estruturas tubulares com paredes simples ou múltiplas), fulerenos (estruturas esféricas ou esferoidal fechadas), grafenos (estrutura planar de uma única folha de carbono), óxido de grafeno (folha de carbono oxidada), nanodiamantes (estruturas tipo diamante em escala nanométrica), carvão amorfo nanoestruturado e nanofibras de carbono. Na tabela 1

são mostrados alguns exemplos de nanomateriais de carbono aplicados em materiais de construção e as propriedades resultantes.

Tabela 1. Nanomateriais de carbono em materiais de construção civil

Aplicação	Dimensão	Porcentagem em massa	Propriedades observadas no material de construção
Nanotubos de carbono em pasta de cimento	Diâmetro médio 9,5 nm	0,05 – 0,2 %	Aumento da capacidade de resistência à compressão (IRSHIDAT et al., 2020)
Óxido de Grafeno em pasta de cimento	Espessura média 1,0 nm	0,2 – 0,8 %	Aumento da resistência mecânica à compressão (GHAZIZADEH et al., 2018)
Nanofibra de carbono em argamassa	Diâmetro médio 50 – 150 nm	1,0 – 3,0 %	Aumento da resistência mecânica à flexão (HOGANCAMP; GRASLEY, 2017)
Nanofibra de grafite em concreto asfáltico	Diâmetro médio 20-200 nm	0,5 %	Aumento da resistência mecânica à tração, redução da porosidade e redução na taxa de deformação do concreto (YOO et al., 2019)

2.2. OBTENÇÃO DE NANOMATERIAIS A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS E INCORORAÇÃO EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Neste tópico, são apresentados alguns exemplos de outros nanomateriais incorporados em materiais de construção civil que têm apresentado resultados promissores, tanto do ponto de vista de propriedades do material aditivado quanto no aspecto econômico.

Schaefer et al. (2018), estudaram as propriedades de amostras de concreto aditivadas com resíduo plástico ionizado, com tamanho médio de 170 μm . Apesar de não ter sido usado fragmentos plásticos nanométrico, devido a limitação da técnica de moagem usada na preparação, os autores observaram que as amostras de concreto aditivadas com 1,25% em massa de cimento do plástico ionizado apresentaram redução na porosidade e aumento na resistência mecânica. Na mesma linha de estudo, outros trabalhos também têm demonstrado melhora nas propriedades mecânicas de concretos modificados com diversos tipos de micropartículas e nanopartículas derivadas de material plástico, como por exemplo, policarbonato, polietileno, entre outros (BATAYNEH et al., 2007; HANNAWI et al., 2010; RAI et al., 2012; RODRIGUEZ-HERNANDEZ et al., 2019).

Ainda sobre uso de materiais reciclados na construção civil, Onuaguluchi e Ozgur (2012) relataram o uso de rejeitos de minério de cobre, com partículas a partir de 1000 nm, como aditivos de argamassa. No referido trabalho, os autores mostraram que a adição de 5% de rejeito de cobre, em relação a massa de cimento, pré-umidificado na argamassa, resultou em aumento nas resistências à flexão e à compressão, além da redução da permeabilidade, o que evidencia a redução da porosidade do material. Além disso, também foi observado aumento na resistência ao ataque de ácidos e cloretos.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de nanomateriais na construção civil tem possibilitado o melhoramento das propriedades primárias dos materiais modificados, como por exemplo, resistências mecânicas e à corrosão, bem como agregado novas propriedades, tais como antibacteriana, autolimpante e fotocatalítica. Dentre os nanomateriais aplicados e estudados para uso na construção civil, se destacam as nanopartículas de alguns óxidos metálicos e semicondutores, e algumas nanoestruturas de carbono. Além disso, mais recentemente, tem surgido estudos apontando o uso de materiais reciclados para a mesma finalidade, como por exemplo, plásticos e resíduos da mineração. Os resíduos são processados na tentativa de obter micropartículas ou nanopartículas, sendo posteriormente incorporado em argamassa e concreto, resultando em compósitos mais resistentes, mais leves e baratos, contribuindo ainda para a redução de resíduos sólidos no meio ambiente. Entretanto, a pesquisa em nanotecnologia direcionada aos materiais de construção civil ainda é muito recente, porém tem se mostrado muito promissora apontando como um campo para novas oportunidades e inovação industrial. Como é um setor que demanda materiais em grandes quantidades, pesquisas direcionadas ao escalonamento dos métodos de preparação de nanomateriais, obtenção de nanomateriais a partir de fontes abundantes ou a partir da reutilização de resíduos sólidos são temas urgentes.

4. REFERÊNCIAS

ABAMOR, E. S.; ALLAHVERDIYEV, A. M. A nanotechnology based new approach for chemotherapy of Cutaneous Leishmaniasis: TIO_2 @AG nanoparticles – *Nigella sativa* oil combinations. **Exp Parasitol**, v.166, p. 150-163, 2016.

- ABIRAMAN, T.; BALASUBRAMANIAN, S. Synthesis and Characterization of Large-Scale (<2 nm) Chitosan-Decorated Copper Nanoparticles and Their Application in Antifouling Coating. **Ind Eng Chem Res**, v. 56, n. 6, p. 1498- 1508, 2017.
- ABO-EL-ENEIN, S. A; EL-HOSINY, F. I; EL-GAMAL, S. M. A; AMIN, M. S; RAMADAN, M. Gamma radiation shielding, fire resistance and physicochemical characteristics of Portland cement pastes modified with synthesized Fe₂O₃ and ZnO nanoparticles. **Constr Build Mater**, v. 173, p. 687-706, 2018.
- AMIRKHANIAN, A. N. ; XIAO, F.; AMIRKHANIAN, S. N. Characterization of unaged asphalt binder modified with carbon nano particles. **Int J Pavement Res Technol**, v. 4, n. 5, p. 281-286, 2011.
- BATAYNEH, M.; MARIE, I.; ASI, I. Use of selected waste materials in concrete mixes. **Waste Manage**, v. 27, p. 1870-1876, 2007.
- CAMILETTI, J. ; SOLIMAN, A. ; NEHDI, M. Effects of nano- and micro-limestone addition on early-age properties of ultra-high-performance concrete. **Mater Struct**, v. 46, n. 6, p. 881-898, 2013.
- CHEN, JUN ; KOU, SHI-CONG ; POON, CHI-SUN. Hydration and properties of nano-TiO₂ blended cement composites. **Cem Concr Compos**, v. 34, n. 5, p. 642-649, 2012.
- CRUCHO, J.; PICADO-SANTOS, L. P.; NEVES, J.; CAPITÃO, S. A Review of Nanomaterials' Effect on Mechanical Performance and Aging of Asphalt Mixtures. **App Sc**, v. 9, p. 3657, 2019.
- CRUCHO, J.; PICADO-SANTOS, L. P.; NEVES, J.; CAPITÃO, S. Mechanical performance of asphalt concrete modified with nanoparticles: Nanosilica, zero-valent iron and nanoclay. **Constr Build Mater**, v. 181, p. 309–318, 2018.
- ETXEBARRIA, G.; GOMEZ-URANGA, M.; BARRUTIA, J. Tendencies in scientific output on carbon nanotubes and graphene in global centers of excellence for nanotechnology. **Scientometrics**, v. 91, n. 1, p. 253-268, 2012.
- GENTILE, A.; RUFFINO, F.; GRIMALDI, M. G. Complex-Morphology Metal-Based Nanostructures: Fabrication, Characterization, and Applications. **Nanomaterials**, v. 6, n. 110, p. 1-33, 2016.
- GHAZIZADEH, S.; DUFFOUR, P.; SKIPPER, N. T ; BAI, Y. Understanding the behaviour of graphene oxide in Portland cement paste. **Cem Concr Res**, v. 111, p. 169-182, 2018.
- GILBERTSON, L. M; ZIMMERMAN, J. B.; PLATA, D. L.; HUTCHISON, J. E.; ANASTAS, P. T. Designing nanomaterials to maximize performance and minimize undesirable implications guided by the Principles of Green Chemistry. **Chem Soc Rev**, v. 44, p. 5758-5777, 2015.
- HANNAWI, K.; KAMALI-BERNARD, S.; PRINCE, W. Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. **Waste Manage**, v. 30, p. 2312-2320, 2010.
- HANUS, M. J; HARRIS, A. T. Nanotechnology innovations for the construction industry. **Prog Mater Sci**, v. 58, n. 7, p. 1056-1102, 2013.
- HAWREEN, A.; BOGAS, J. Influence of carbon nanotubes on steel–concrete bond strength. **Mater Struct**, v. 51, n. 6, p. 1-16, 2018.

- HOGANCAMP, J.; GRASLEY, Z. N. A. Dispersion of High Concentrations of Carbon Nanofibers in Portland Cement Mortars. **J Nanomater**, v. 2017, p. 1-11, 2017.
- IRSHIDAT, M. R.; AL-NUAIMI, N.; SALIM, S.; RABIE, M. Carbon Nanotubes Dosage Optimization for Strength Enhancement of Cementitious Composites. **Procedia Manuf**, v. 44, p. 366-370, 2020.
- JEEVANANDAM, J.; BARHOUM, A.; CHAN, Y. S.; DUFRESNE, A.; DANQUAH, M. K. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. **Beilstein J Nanotechnol**, v. 9, p. 1050-1074, 2018.
- LIU, J.; LI, Q.; XU, S. Influence of nanoparticles on fluidity and mechanical properties of cement mortar. **Constr Build Mater**, v. 101, p. 892-901, 2015.
- NAM, K. Y. Characterization and antimicrobial efficacy of Portland cement impregnated with silver nanoparticles. **J Adv Prosthodont**, v. 9, n. 3, p. 217-223, 2017.
- NANO-MAGAZINE. **The Magazine for Small Science**. Disponível em: <<https://nano-magazine.com/news>>. Acesso em 10/03/2021.
- OLTULU, M.; ŞAHİN, R. Effect of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃ and nano-Fe₂O₃ powders on compressive strengths and capillary water absorption of cement mortar containing fly ash: A comparative study. **Energy Build**, v. 58, p. 292-301, 2013.
- ONUAGULUCHI, O.; EREN, Ö. Recycling of copper tailings as an additive in cement mortars. **Constr Build Mater**, v. 37, p. 723-727, 2012.
- POOLE JR., C. P.; OWENS, F. J. **Introduction to Nanotechnology**. John Wiley & Sons, 2003.
- RAI, S.; RAI, A.; Review: Nanotechnology - The secret of fifth industrial revolution and the future of next generation. **Nus Biosci**, v. 7, n. 2, p. 61-66, 2015.
- RAO, N. V.; RAJASEKHAR, M.; VIJAYALAKSHIMI, K.; VAMSHYKRISHNA, M. The future of civil engineering with the influence and impact of nanotechnology on properties of materials. **Procedia Mater Sci**, v. 10, p. 111-115, 2015.
- RESEARCH AND MARKETS. **The World's Largest Market Research Store**. Disponível em: <<https://www.researchandmarkets.com/reports/4520812/global-nanotechnology-market-by-component>>. Acesso em 10/03/2021.
- RIM PLUS - Industry 4.0. **Advanced Materials (Nanotechnology)**. Disponível em: <www.technopolis-group.com>. Acesso em 10/03/2021.
- RODRIGUEZ-HERNANDEZ, A. G.; MUOZ-TABARES, J. A.; AGUILAR-GUZMN, J. C.; VAZQUEZ-DUHALT, R. A novel and simple method for polyethylene terephthalate (PET) nanoparticle production. **Environ Sci Nano**, v. 6, n. 7, p. 2031-2036, 2019.
- SCHAEFER, C. E.; KUPWADE-PATIL, K.; ORTEGA, M.; SORIANO, C.; BÜYÜKÖZTÜRK, O.; WHITE, A. E.; et al. Irradiated recycled plastic as a concrete additive for improved chemo-mechanical properties and lower carbon footprint. **Waste Manage**, v. 71, p. 426-439, 2018.
- SHIPWAY, A., WILLNER, I. Nanoparticles as structural and functional units in surface-confined architectures. **Chem Commun**, v. 20, p. 2035-2045, 2001.

- SILVA, A. G. M.; RODRIGUES, T. S.; MACEDO, A.; SILVA, R. T. P.; CAMARGO, P. H. C. An undergraduate level experiment on the synthesis of Au nanoparticles and their size-dependent optical and catalytic properties. **Quím Nova**, v. 37, n. 10, p. 1716-1720, 2014.
- SMITS, M.; CHAN, C. K.; TYTGAT, T.; CRAEYE, B.; COSTARRAMONE, N.; LACOMBE, S.; LENAERTS, S. Photocatalytic degradation of soot deposition: Self-cleaning effect on titanium dioxide coated cementitious materials. **Chem Eng J**, v. 222, p. 411-418, 2013.
- TEIZER, J.; VENUGOPAL, M.; TEIZER, W.; FELKL, J. Nanotechnology and Its Impact on Construction: Bridging the Gap between Researchers and Industry Professionals. **J Constr Eng Manage**, v. 138, n. 5, p. 594-604, 2012.
- VENKATANARAYANAN, H. K.; RANGARAJU, P. R. Evaluation of Sulfate Resistance of Portland Cement Mortars Containing Low Carbon Rice Husk Ash. **J Mater Civ Eng**, v. 26, n. 4, p. 582-592, 2014.
- YOO, D.; KIM, S.; KIM, M.; KIM, D.; SHIN, H. Self-healing capability of asphalt concrete with carbon-based materials. **J Mater Res Technol**, v. 8, n. 1, p. 827-839, 2019.
- ZAYTSEVA, O.; NEUMANN, G. Carbon nanomaterials: production, impact on plant development, agricultural and environmental applications. **Chem Biol Technol Agric**, v. 3, p. 1-26, 2016.
- ZHENG, W.; SHIH, H.; LOZANO, K.; MO, Y. Impact of Nanotechnology on Future Civil Engineering Practice and Its Reflection in Current Civil Engineering Education. **J Prof Issues Eng. Educ Pract & Practice**, v. 137, p. 162-173, n. 3, 2011.
- ZHOU, J.; CHIZHIK A. I.; CHU, S.; JIN, D. Single-particle spectroscopy for functional nanomaterials. **Nature**, v. 579, p. 41-50, 2020.