

UNIVERSIDADE DE SANTA CRUZ DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL –
DOUTORADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL

CAMILA CRAUSS

**APLICAÇÃO DE FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA COM PEROVSKITAS
DE NÍOBIO E ÓXIDO DE ZINCO NA DEGRADAÇÃO DE POLUENTES**

Santa Cruz do Sul
2021

Camila Crauss

**Aplicação de fotocatalise heterogênea com perovskitas de nióbio e óxido de zinco
na degradação de poluentes**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental – Doutorado, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, como requisito parcial para o título de Doutor em Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Prof.^(a) Dr (a). Adriane de Assis Lawisch Rodriguez

Santa Cruz do Sul
2021

RESUMO

A busca por tecnologias e materiais para minimizar as consequências da contaminação de água e do ar tem sido tema de pesquisas nos últimos anos. A fotocatalise se destaca como uma tecnologia pertinente a esta aplicação, visto que promove a degradação dos poluentes e microrganismos minimizando a geração de subprodutos ou resíduos tóxicos. Este trabalho visa sintetizar, caracterizar e aplicar três materiais fotocatalisadores: o niobato de prata e de sódio (AgNbO_3 e NaNbO_3) por rota sol-gel, e óxido de zinco (ZnO) produzido por biossíntese através da utilização de extrato de folhas de *Eucalyptus Globulus*. Os materiais foram caracterizados por difração de Raios X (DRX), Espectroscopia Raman, área superficial BET, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), indicando que a síntese dos niobatos foram bem-sucedidas, e a de óxido de zinco demonstrou bons resultados, embora necessite de ajustes. Os três materiais foram analisados quanto a atividade fotocatalítica na forma de pó, e suportados, tanto em matriz cerâmica quanto em biochar, sendo então aplicados na degradação de azul de metileno (AM) em meio líquido e no estudo da inibição de crescimento fúngico (bioaerosol). Observou-se que os três materiais foram efetivos na degradação de AM, com degradação de 90%, 99% e 98% para os materiais em pó AgNbO_3 , NaNbO_3 e ZnO , respectivamente. Os materiais suportados são mais facilmente removidos após o processo, entretanto apresentam eficiência reduzida. Na avaliação da inibição do crescimento fúngico, com amostragem pelo método de impactação, observou-se uma redução de número de UFC/m³ de 46 % e 37 % para os catalisadores AgNbO_3 e ZnO , respectivamente.

Palavras-chave: Fotocatalise, niobato de sódio, niobato de prata, óxido de zinco, biossíntese, fungos

ABSTRACT

HETEROGENEOUS PHOTOCATALYSIS APPLICATIONS WITH NIOBIUM AND ZINC OXIDES FOR POLLUTANTS DEGRADATION

The Search for materials and Technologies to minimize air and water contamination consequences has been a research topic in the last years. Heterogeneous photocatalysis is a relevant technology for this application due to its capacity to promote microorganisms degradation and pollutants removal with minimum contaminants generation. This work aims to synthesize, characterize, and apply three photocatalyst materials: silver niobate (AgNbO_3), sodium niobate (NaNbO_3), both obtained by sol-gel route, and zinc oxide (ZnO), obtained by green synthesis with Eucalyptus Globulus leaves. The materials were characterized by X-Ray Diffraction (XRD), Raman Spectroscopy, BET specific surface area, scanning electron microscopy (SEM), and energy dispersive spectroscopy (EDS), which indicated a satisfactory synthesis result with the ideal crystal formation for niobates. The zinc oxide demonstrated good results, although, still needs synthesis improvements. The materials were analyzed for their photocatalytic activity in powder, ceramic supported, and biochar supported forms and then tested for methylene blue degradation (liquid phase) and fungus growth inhibition (bioaerosol). It was observed that the three materials were effective in methylene blue degradation, demonstrating reductions of 90 %, 99 %, and 98 % respectively in AgNbO_3 , NaNbO_3 , and ZnO powder form. The supported catalysts were slightly less effective for the process. Fungus growth inhibition was analyzed by impaction method, and a reduction of 46 % and 37 % CFU/m³ were observed, respectively, for the AgNbO_3 and ZnO catalysts.

Keywords: photocatalysis, sodium niobate, silver niobate, zinc oxide, green synthesis, fungus

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	OBJETIVOS	
2.1	Objetivo Geral.....	
2.2	Objetivos específicos	
3	REVISÃO DE LITERATURA/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	
3.1	Fotocatálise heterogênea	
3.2	Fatores de operação e amostragem	
3.3	Óxidos de nióbio e Óxido de zinco.....	
3.3.1	Perovskitas a base de nióbio (AgNbO ₃ e NaNbO ₃).....	
3.3.2	Óxido de zinco	
4	METODOLOGIA	
4.1	Síntese e caracterização dos fotocatalisadores	
4.2	Preparação das amostras	
4.3	Aplicação ambiental: testes de fotocatalise	
5	ARTIGO 1 – SÍNTESE, CARACTERIZAÇÃO E ATIVIDADE FOTOCATALÍTICA DE AGNBO₃ E NANBO₃	
5.1	INTRODUÇÃO	
5.2	METODOLOGIA	
5.2.1	Síntese dos niobatos	
5.2.2	Produção do Biochar	
5.2.3	Método de incorporação	
5.2.4	Caracterização dos materiais	
5.2.5	Teste de fotólise e fotocatalise.....	
5.3	RESULTADOS	
5.3.1	Resultado da caracterização	
5.3.2	Fotocatálise.....	
5.4	CONCLUSÃO	
6	ARTIGO 2 - ÓXIDO DE ZINCO PRODUZIDO ATRAVÉS DE SÍNTESE VERDE APLICADO EM DEGRADAÇÃO DE CORANTE ORGÂNICO. .. ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.	
6.1	INTRODUÇÃO	
6.2	METODOLOGIA	
6.2.1	Síntese do óxido.....	
6.2.2	Produção do Biochar	
6.2.3	Método de incorporação	
6.2.4	Caracterização dos materiais	

6.2.5	Teste de fotólise e fotocatalise.....	
6.3	Resultados.....	
6.3.1	Resultado da caracterização.....	
6.3.2	Fotocatalise e fotocatalise.....	
6.4	Conclusão.....	
7	ARTIGO 3 – INIBIÇÃO DO CRESCIMENTO FÚNGICO PELA APLICAÇÃO DE FOTOCATALISE COM ÓXIDOS DE NIÓBIO E ÓXIDO DE ZINCO.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
7.1	INTRODUÇÃO.....	
7.2	METODOLOGIA.....	
7.2.1	Materiais fotocatalisadores.....	
7.2.2	Testes de fotocatalise.....	
7.3	RESULTADOS.....	
7.3.1	Teste por deposição passiva com ZnO comercial.....	Erro! Indicador não definido.
7.3.2	Resultados por impactação com fotocatalisadores produzidos em laboratório.....	
7.4	CONCLUSÃO.....	
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	
9	REFERÊNCIAS.....	8

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação acerca da contaminação de água e ar vem sendo tema de pesquisa e a busca por tecnologias e materiais que possam minimizar as consequências desta contaminação está sempre em pauta. Poluentes como pesticidas, farmacêuticos, produtos de cuidados pessoais, corantes, produtos veterinários, compostos industriais e aditivos alimentícios nem sempre são completamente removidos tanto em águas superficiais para tratamento e consumo (TRÖGER et al., 2021) quanto em águas subterrâneas (LAPWORTH et al., 2012).

O reconhecimento da poluição do ar como tema de saúde pública ao redor do mundo vem sendo ampliado, ao passo que pesquisas indicam uma grande diversidade de doenças relacionadas a esta problemática. Relatórios da Organização Mundial da Saúde (WHO) indicam que no ano de 2012, houveram 6 milhões de mortes prematuras causadas pela exposição à poluição do ar (WHO, 2016).

Segundo a WHO (2010) a qualidade do ar é um fator determinante na saúde e qualidade de vida das pessoas, e este é um problema mundial, mas especialmente preocupante em países em desenvolvimento. Para (CHEN et al., 2017; FULLERTON; BRUCE; GORDON, 2008) este fato se deve ao extenso uso de biomassa como fonte de energia para cocção de alimentos, iluminação e aquecimento das residências, principalmente da parcela mais pobre da população, causando problemas de saúde relacionados a doenças respiratórias, tuberculose, câncer de pulmão, doenças cardiovasculares, catarata, entre outros.

A qualidade do ar interno (QAI), em ambientes fechados está diretamente relacionada à saúde e bem estar dos ocupantes (MAINARDI; REDLICH, 2018; STEINEMANN; WARGOCKI; RISMANCHI, 2017), e uma das principais consequências (aguda ou crônica, em curto ou longo prazo) está relacionada ao desconforto e doenças do trato respiratório (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), 2018)

Poluentes biológicos, como vírus, fungos e bactérias, têm grande potencial para desencadear e acentuar reações alérgicas (KANCHONGKITTIPHON et al., 2015), potencializar doenças respiratórias pré-existentes e transmitir doenças infecciosas (US EPA, 2018).

A degradação de materiais orgânicos e inorgânicos, através de um processo fotocatalítico é realizada quando um semicondutor absorve energia suficiente para que os elétrons na banda de valência possam ultrapassar a barreira energética (*band gap*), sendo excitados para a banda de condução, deixando na banda de valência, um número igual de vazios (REN et al., 2017).

A tecnologia da oxidação fotocatalítica vem sendo usada como uma estratégia eficaz e baixo consumo de energia para a melhoria da qualidade do ar. O desempenho da purificação do ar por fotocatalise depende de fatores como a fonte de luz, umidade, tipo de fotocatalisador, configuração do reator, concentração do poluente, entre outros (ZHONG; HAGHIGHAT, 2015).

Para (REN et al., 2017), os sistemas de purificação do ar por fotocatalise oferecem vantagens únicas como o potencial de eliminação de uma ampla gama de poluentes, através de reações básicas em condições ambientes, e a completa degradação de poluentes do ar resultando produtos não tóxicos.

É desejável que a síntese do material catalisador siga os preceitos de redução de impactos ambientais, desta forma, a rota escolhida deve minorar a energia envolvida no processo, evitar geração de resíduos e efluentes, e, em conjunto com o suporte, preferencialmente, permitir a recuperação do material após a aplicação, para reuso.

A escolha dos materiais para o desenvolvimento do trabalho, sua síntese, e aplicação, foram baseadas nestas premissas. Foram testadas três rotas de síntese, sol-gel, solvotermal e coprecipitação, sendo escolhida a rota sol-gel por gerar menor quantidade de resíduos. Da mesma forma, a definição de testar os fotocatalisadores suportados e não somente em pó, de forma que possam ser recuperados com maior facilidade, sem a necessidade incluir um processo de separação.

Este trabalho visa a possibilidade de aplicação dos niobatos de prata e de sódio para a desinfecção do ar, baseando-se em indicador fúngico. Os mesmos critérios se aplicam ao óxido de zinco produzido por síntese verde. Além do estudo em bioaerosol, também se procura a atividade fotocatalítica dos três materiais na degradação de azul de metileno, como marcador de contaminação em meio líquido.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, J. V. P.; DE ASSIS LAWISCH RODRÍGUEZ, A.; ALVES, A. K. Nanomaterials for Fuel Production. In: ALVES, A. K. (Ed.). . **Environmental Applications of Nanomaterials**. Porto Alegre: Springer, 2022. p. 153–169.
- ABED, C. et al. Mg doping induced high structural quality of sol–gel ZnO nanocrystals: Application in photocatalysis. **Applied Surface Science**, v. 349, p. 855–863, 15 set. 2015.
- ABOMUTI, M. A. et al. Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles Using *Salvia officinalis* Leaf Extract and Their Photocatalytic and Antifungal Activities. **Biology 2021, Vol. 10, Page 1075**, v. 10, n. 11, p. 1075, 21 out. 2021.
- AFSHARI, R. Indoor Air Quality and Severity of COVID-19: Where Communicable and Non-communicable Preventive Measures Meet. **Asia Pacific Journal of Medical Toxicology**, v. 9, n. 1, p. 1–2, 1 mar. 2020.
- AGNIHOTRI, S. et al. Photocatalytic and antibacterial potential of silver nanoparticles derived from pineapple waste: process optimization and modeling kinetics for dye removal. **Applied Nanoscience (Switzerland)**, v. 8, n. 8, p. 2077–2092, 1 nov. 2018.
- ALI, A. E. H. et al. Photocatalytic Decolorization of Dye Effluent Using Radiation Developed Polymeric Nanocomposites. **Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials**, v. 26, n. 3, p. 606–615, 1 maio 2016.
- ALSHEHRI, A. A.; MALIK, M. A. Biogenic fabrication of ZnO nanoparticles using *Trigonella foenum-graecum* (Fenugreek) for proficient photocatalytic degradation of methylene blue under UV irradiation. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 30, n. 17, p. 16156–16173, 1 set. 2019.
- ARNEY, D. et al. Flux synthesis of AgNbO₃: Effect of particle surfaces and sizes on photocatalytic activity. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 214, n. 1, p. 54–60, 5 jul. 2010.
- AZIZ, M. A. A. et al. **A review of heterogeneous catalysts for syngas production via dry**

reforming **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers** Taiwan Institute of Chemical Engineers, , ago. 2019.

BALASUBRAMANIAN, R.; NAINAR, P.; RAJASEKAR, A. Airborne bacteria, fungi, and endotoxin levels in residential microenvironments: A case study. **Aerobiologia**, v. 28, n. 3, p. 375–390, 3 set. 2012.

BANDEIRA, M. et al. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: A review of the synthesis methodology and mechanism of formation. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 15, p. 100223, 1 mar. 2020.

CABO VERDE, S. et al. Microbiological assessment of indoor air quality at different hospital sites. **Research in Microbiology**, v. 166, n. 7, p. 557–563, 1 set. 2015.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CHEMINGUI, H. et al. Facile green synthesis of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs): antibacterial and photocatalytic activities. **Materials Research Express**, v. 6, n. 10, p. 1050b4, 11 set. 2019.

CHEN, J. et al. A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China. **Science of The Total Environment**, v. 579, p. 1000–1034, 1 fev. 2017.

CHEN, P. et al. In-situ synthesis of AgNbO₃/g-C₃N₄ photocatalyst via microwave heating method for efficiently photocatalytic H₂ generation. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 534, p. 163–171, 15 jan. 2019.

CHINNARASU, C. et al. Natural antioxidant fine particles recovery from Eucalyptus globulus leaves using supercritical carbon dioxide assisted processes. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 101, p. 161–169, 1 jun. 2015.

CRUZ, N. D.; GALLIO, E.; GATTO, D. A. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

DALRYMPLE, O. K. et al. A review of the mechanisms and modeling of photocatalytic disinfection. 2010.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA: Aplicações e preparação de amostras**. 4. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DIN, M. I. et al. Fundamentals and photocatalysis of methylene blue dye using various nanocatalytic assemblies- a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 298, p. 126567, 20 maio 2021.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Introduction to Indoor Air Quality****Indoor Air Quality (IAQ)**, 2018. Disponível em: <<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality#health%0Ahttps://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality>>

FAGIER, M. A. Plant-Mediated Biosynthesis and Photocatalysis Activities of Zinc Oxide Nanoparticles: A Prospect towards Dyes Mineralization. **Journal of Nanotechnology**, v. 2021, 2021.

FAROOQ, U. et al. Electrocatalytic and Enhanced Photocatalytic Applications of Sodium Niobate Nanoparticles Developed by Citrate Precursor Route. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 1 dez. 2019.

FERNANDES, D. et al. Synthesis of NaNbO₃ nanowires and their photocatalytic activity. **Ceramics International**, v. 47, n. 7, p. 10185–10188, 1 abr. 2021.

FULLERTON, D. G.; BRUCE, N.; GORDON, S. B. Indoor air pollution from biomass fuel smoke is a major health concern in the developing world. **Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene**, v. 102, n. 9, p. 843–851, 1 set. 2008.

GAMAGE, J.; ZHANG, Z. Applications of Photocatalytic Disinfection. **International Journal of Photoenergy**, v. 2010, p. 11, 2010.

GANCHEVA, M. et al. Design and photocatalytic activity of nanosized zinc oxides. **Applied Surface Science**, v. 368, p. 258–266, 15 abr. 2016.

GAO, B. et al. Enhanced visible-light-driven photocatalytic performance of AgNbO₃ cubes with a high-energy (001) facet. 2019.

GHOSH, B. et al. Estimation of bioaerosol in indoor environment in the university library of

Delhi. **Sustainable Environment Research**, v. 23, n. 3, p. 199–207, 2013.

GHOSH, B.; LAL, H.; SRIVASTAVA, A. **Review of bioaerosols in indoor environment with special reference to sampling, analysis and control mechanisms***Environment International* Elsevier Ltd, , 1 dez. 2015.

GRABOWSKA, E. Selected perovskite oxides: Characterization, preparation and photocatalytic properties-A review. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 186, p. 97–126, 2016.

HARKAT-MADOURI, L. et al. Chemical composition, antibacterial and antioxidant activities of essential oil of Eucalyptus globulus from Algeria. **Industrial Crops and Products**, v. 78, p. 148–153, 30 dez. 2015.

HAYLEYESUS, S. F.; MANAYE, A. M. Microbiological quality of indoor air in University libraries. **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**, v. 4, p. S312–S317, 1 maio 2014.

HOSPODSKY, D. et al. Human Occupancy as a Source of Indoor Airborne Bacteria. **PLoS ONE**, v. 7, n. 4, p. e34867, 18 abr. 2012.

HUAN, Y. et al. Enhanced ferro-photocatalytic performance for ANbO₃ (A = Na, K) nanoparticles. **MBE**, v. 16, n. 5, p. 4122–4134, 2019.

JANG, W. J. et al. **A review on dry reforming of methane in aspect of catalytic properties***Catalysis Today* Elsevier B.V., , mar. 2019.

JESUS, K. F. S. DE. Desenvolvimento e estudo de materiais baseados em AgNbO₃ para armazenamento de energia. 6 ago. 2021.

JORGE DE SOUZA, T. A.; ROSA SOUZA, L. R.; FRANCHI, L. P. Silver nanoparticles: An integrated view of green synthesis methods, transformation in the environment, and toxicity. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 171, p. 691–700, 30 abr. 2019.

JUNG, C. C. et al. Indoor air quality varies with ventilation types and working areas in hospitals. **Building and Environment**, v. 85, p. 190–195, 1 fev. 2015.

KANCHONGKITTIPHON, W. et al. Indoor Environmental Exposures and Exacerbation of Asthma: An Update to the 2000 Review by the Institute of Medicine. **Environmental Health**

- Perspectives**, v. 123, n. 1, p. 6–20, jan. 2015.
- KANHERE, P.; CHEN, Z. A Review on Visible Light Active Perovskite-Based Photocatalysts. **Molecules** **2014**, Vol. **19**, Pages **1995-20022**, v. 19, n. 12, p. 1995–20022, 1 dez. 2014.
- KONG, J. et al. Perovskite-based photocatalysts for organic contaminants removal: Current status and future perspectives. **Catalysis Today**, v. 327, p. 47–63, 1 maio 2019.
- KUDO, A. Development of photocatalyst materials for water splitting. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 31, n. 2, p. 197–202, 1 fev. 2006.
- KUMAR, A.; KUMAR, A.; KRISHNAN, V. Perovskite Oxide Based Materials for Energy and Environment-Oriented Photocatalysis. **ACS Catalysis**, v. 10, n. 17, p. 10253–10315, 2020.
- KUSHNIR, D.; SANDÉN, B. A. Energy Requirements of Carbon Nanoparticle Production. **Journal of Industrial Ecology**, v. 12, n. 3, p. 360–375, 1 jun. 2008.
- LAPWORTH, D. J. et al. **Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence****Environmental Pollution**, 2012.
- LARKIN, P. Introduction: Infrared and Raman Spectroscopy. **Infrared and Raman Spectroscopy**, p. 1–5, jan. 2011.
- LASEK, J.; YU, Y.-H.; WU, J. C. S. Removal of NO_x by photocatalytic processes. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, v. 14, p. 29–52, 2013.
- LEI, Y. et al. Low-temperature preparation of magnetically separable Fe₃O₄@ZnO-RGO for high-performance removal of methylene blue in visible light. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 821, 25 abr. 2020.
- LI, P. et al. The effects of crystal structure and electronic structure on photocatalytic H₂ evolution and CO₂ reduction over two phases of perovskite-structured NaNbO₃. **Journal of Physical Chemistry C**, v. 116, n. 14, p. 7621–7628, 12 abr. 2012.
- LIU, Y.; JIA, X.; WU, X. ZnO core–shell microspheres prepared by one-pot hydrothermal reaction and their photocatalysis properties. **Micro & Nano Letters**, v. 9, n. 5, p. 328–331, 1 maio 2014.
- MAINARDI, A. S.; REDLICH, C. A. Indoor Air Quality Problems at Home, School, and Work.

- American journal of respiratory and critical care medicine**, v. 198, n. 1, 1 jul. 2018.
- MALIK, P. et al. Green Chemistry Based Benign Routes for Nanoparticle Synthesis. **Journal of Nanoparticles**, v. 2014, p. 1–14, 24 mar. 2014.
- MAYRINCK, C. et al. Síntese, Propriedades e Aplicações de Óxido de Zinco Nanoestruturado. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 5, p. 1185–1204, 7 out. 2014.
- MIRI, A. et al. Zinc oxide nanoparticles: Biosynthesis, characterization, antifungal and cytotoxic activity. **Materials Science and Engineering: C**, v. 104, p. 109981, 1 nov. 2019.
- MITTAL, A. K.; CHISTI, Y.; BANERJEE, U. C. Synthesis of metallic nanoparticles using plant extracts. **Biotechnology Advances**, v. 31, n. 2, p. 346–356, 1 mar. 2013.
- MO, Y. Y. et al. Green synthesis of silver nanoparticles using eucalyptus leaf extract. **Materials Letters**, v. 144, p. 165–167, 1 abr. 2015.
- NAGARJUNA, R.; ROY, S.; GANESAN, R. Polymerizable sol-gel precursor mediated synthesis of TiO₂ supported zeolite-4A and its photodegradation of methylene blue. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 211, p. 1–8, 15 jul. 2015.
- NAWAZ, M.; ALMOFTY, S. A.; QURESHI, F. Preparation, formation mechanism, photocatalytic, cytotoxicity and antioxidant activity of sodium niobate nanocubes. **PLoS ONE**, v. 13, n. 9, 1 set. 2018.
- NIEWIADOMSKI, A. et al. Raman spectroscopy, dielectric properties and phase transitions of Ag_{0.96}Li_{0.04}NbO₃ ceramics. **Materials Research Bulletin**, v. 65, p. 123–131, 1 maio 2015.
- OCHIAI, T.; FUJISHIMA, A. Photoelectrochemical properties of TiO₂ photocatalyst and its applications for environmental purification. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, v. 13, p. 247–262, 2012.
- OSUNTOKUN, J.; ONWUDIWE, D. C.; EBENSO, E. E. Green synthesis of ZnO nanoparticles using aqueous Brassica oleracea L. var. italica and the photocatalytic activity. **Green Chemistry Letters and Reviews**, v. 12, n. 4, p. 444–457, 2 out. 2019.
- PARK, D.-U. et al. Assessment of the Levels of Airborne Bacteria, Gram-Negative Bacteria, and Fungi in Hospital Lobbies. **International Journal of Environmental Research and**

- Public Health**, v. 10, n. 2, p. 541–555, 31 jan. 2013.
- PASQUARELLA, C.; PITZURRA, O.; SAVINO, A. The index of microbial air contamination. **Journal of Hospital Infection**, v. 46, p. 241–256, 2000.
- PULGARIN, C.; KIWI, J.; NADTOCHENKO, V. Mechanism of photocatalytic bacterial inactivation on TiO₂ films involving cell-wall damage and lysis. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 128, p. 179–183, 2012.
- QIAN, J. et al. Size-resolved emission rates of airborne bacteria and fungi in an occupied classroom. **Indoor Air**, v. 22, n. 4, p. 339–351, 1 ago. 2012.
- RAI, M. et al. Nanobiotecnologia verde: biossínteses de nanopartículas metálicas e suas aplicações como nanoantimicrobianos. **Ciência e Cultura**, v. 65, n. 3, p. 44–48, jul. 2013.
- RAJASEKAR, A.; BALASUBRAMANIAN, R. Assessment of airborne bacteria and fungi in food courts. **Building and Environment**, v. 46, n. 10, p. 2081–2087, 1 out. 2011.
- RASTOGI, P. et al. **A Data-driven Indoor Air Quality Framework for Post-COVID-19 Workplace Re-entry**. Glasgow, UK: [s.n.].
- REN, H. et al. **Photocatalytic materials and technologies for air purification** *Journal of Hazardous Materials Elsevier B.V.*, 2017. **hotocatalytic materials and technologies for air purification** *Journal of Hazardous Materials Elsevier B.V.*, 2017.
- SHIRATORI, Y. et al. Polymorphism in Micro-, Submicro-, and Nanocrystalline NaNbO₃. **Journal of Physical Chemistry B**, v. 109, n. 43, p. 20122–20130, 3 nov. 2005.
- SINGH, J. et al. ‘Green’ synthesis of metals and their oxide nanoparticles: applications for environmental remediation. **Journal of Nanobiotechnology** **2018 16:1**, v. 16, n. 1, p. 1–24, 30 out. 2018.
- SIRIPIREDDY, B.; MANDAL, B. K. Facile green synthesis of zinc oxide nanoparticles by *Eucalyptus globulus* and their photocatalytic and antioxidant activity. **Advanced Powder Technology**, v. 28, n. 3, p. 785–797, 1 mar. 2017.
- STEINEMANN, A.; WARGOCKI, P.; RISMANCHI, B. Ten questions concerning green buildings and indoor air quality. **Building and Environment**, v. 112, n. 2017, p. 351–358,

2017.

T.C., P. et al. Biomimetic Synthesis of Nanoparticles: Science, Technology & Applicability. In: **Biomimetics Learning from Nature**. [s.l.] IntechOpen, 2010.

THABET, S. et al. Photocatalysis on yeast cells: Toward targets and mechanisms. **Applied Catalysis B: Environmental**, p. 169–178, 2013.

THABET, S. et al. Impact of photocatalysis on fungal cells: Depiction of cellular and molecular effects on *Saccharomyces cerevisiae*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 80, n. 24, p. 7527–7535, 15 dez. 2014.

TONG, X. et al. High diversity of airborne fungi in the hospital environment as revealed by meta-sequencing-based microbiome analysis. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–8, 3 jan. 2017.

TRÖGER, R. et al. What's in the water? – Target and suspect screening of contaminants of emerging concern in raw water and drinking water from Europe and Asia. **Water Research**, v. 198, p. 117099, 15 jun. 2021.

US EPA. **Biological Pollutants' Impact on Indoor Air Quality**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/biological-pollutants-impact-indoor-air-quality>>. Acesso em: 25 jun. 2020.

VIANI, I. et al. Passive air sampling: the use of the index of microbial air contamination. **Acta Bio Medica : Atenei Parmensis**, v. 91, n. Suppl 3, p. 92, 2020.

WANG, X. et al. Associations of dwelling characteristics, home dampness, and lifestyle behaviors with indoor airborne culturable fungi: On-site inspection in 454 Shanghai residences. **Building and Environment**, v. 102, p. 159–166, 1 jun. 2016.

WELDEGEBRIEAL, G. K. **Synthesis method, antibacterial and photocatalytic activity of ZnO nanoparticles for azo dyes in wastewater treatment: A review** **Inorganic Chemistry Communications** Elsevier B.V., , 1 out. 2020.

WU, J. et al. Study on the performance of vanadium doped NaNbO₃ photocatalyst degradation antibiotics. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 131, p. 108669, 1 set. 2021.

WU, W. et al. Mechanism and improvement of the visible light photocatalysis of organic

pollutants over microcrystalline AgNbO₃ prepared by a sol-gel method. **Materials Research Bulletin**, v. 48, n. 4, p. 1618–1626, 1 abr. 2013.

ZAKARIA ABOULEISH, M. Y. Indoor Air Quality and Coronavirus Disease (COVID-19). **Public Health**, 7 maio 2020.

ZEMOURI, C. et al. A scoping review on bio-Aerosols in healthcare & the dental environment. **PLoS ONE**, v. 12, n. 5, 1 maio 2017.

ZHAO, L. et al. Silver Niobate Lead-Free Antiferroelectric Ceramics: Enhancing Energy Storage Density by B-Site Doping. **ACS Appl. Mater. Interfaces**, v. 10, p. 52, 2018.

ZHONG, L.; HAGHIGHAT, F. Photocatalytic air cleaners and materials technologies - Abilities and limitations. **Building and Environment**, v. 91, p. 191–203, 2015.

ZHOU, C. et al. Recent advances in niobium-based semiconductors for solar hydrogen production. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 419, p. 213399, set. 2020.

ZIELIŃSKA, B.; BOROWIAK-PALEN, E.; KALENCZUK, R. J. Preparation, characterization and photocatalytic activity of metal-loaded NaNbO₃. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 72, n. 2, p. 117–123, 1 fev. 2011.