TRABALHO COMPLETO
FULL PAPER
XXVII SEPE
Simpósio de Ensino, Pesquisa e Extensão
Teaching, Research and Extension Symposium
24 A 26 DE OUTUBRO 2023
OCTOBER 24th to 26th, 2023
ISSN: 2316-9745
CIÊNCIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
SCIENCE AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT
UFN Universidade Franciscana
https://doi.org/10.48195/sepe2023.27465

NANOPARTÍCULAS EM VESTIMENTAS ESPORTIVAS: UM ESTUDO DE REVISÃO

Gabriel Santos da Rosa[1]; Maria Eduarda Silveira Pedebos[2]; Daniel Moro Druzian[3]; William Leonardo da Silva[4]; Sérgio Roberto Mortari[5]

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo realizar um levantamento, análise e descrição de publicações científicas como artigos sobre nanopartículas em roupas esportivas, com foco em controle de calor, odor, geração de eletricidade e infecções bacterianas. Deste modo, foi realizado uma busca exploratória na base de dados *ScienceDirect* e *Scopus.com* de 2019-set 2023. Em relação a produção de nanopartículas e tecido, utiliza-se a técnica o *nanocoating* (nanorevestimento) e pode ser aplicada diretamente na fibra dos tecidos ou com aplicação em forma de spray sobre a peça de roupa. Com isso, a aplicação/combinação de nanamateriais como o dióxido de titânio (TiO_2-NPs), nanopartículas de prata (Ag-NPs), nanopartículas de óxido de zinco (ZnO-NPs) e fibras de polímeros (diacetato de celulose, celulose bacteriana e politetrafluoretileno) permitem que propriedades como atividade antibacteriana, proteção solar e superhidrofobicidade possibilitam a respirabilidade, estética, flexibilidade e capacidade de não provocar reações alérgicas comparado com tecido de algodão.

Palavras-chave: nanopartículas metálicas; nanotecnologia; esportiva; tecidos.

ABSTRACT

The present study aims to carry out a lifting, analysis, and description of scientific publications such as articles on nanoparticles in sportswear with the focus on heat control, odor, electricity generation and bacterial infections. Thus, an exploratory search was realized in the *ScienceDirect* and *Scopus.com* databases from 2019 to Sep 2023. In relation to the production of nanoparticles and fabric, the nanocoating technique is used and can be applied directly to the fabric fiber or with application in the form of a spray on the item of clothing. The application/combination of nanomaterials such as titanium dioxide (TiO_2-NPs), silver nanoparticles (Ag-NPs), zinc oxide nanoparticles (ZnO-NPs), and polymer fibers (cellulose diacetate, bacterial cellulose and polytetrafluoroethylene) allow properties such as antibacterial activity, solar protection and superhydrophobicity to provide breathability, aesthetics, flexibility, and the ability to not cause allergic reactions compared to cotton fabric.

[1] Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Nanociências - Universidade Franciscana – Gabriel.srosa@ufn.edu.br
[2] Engenheira Química - Universidade Franciscana – duda.pedebos@gmail.com
[3] Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Nanociências - Universidade Franciscana – daniel.druzian@ufn.br
[4] Professor Colaborador – Professor do Curso de Engenharia Química e do Programa de Pós-Graduação em Nanociências – Universidade Franciscana – w.silva@ufn.edu.br
[5] Orientador – Professor do Curso de Engenharia Química e do Programa de Pós-Graduação em Nanociências – Universidade Franciscana – mortari@ufn.edu.br

Keywords: metallic nanoparticles; nanotechnology; sports; tissue.

Eixo Temático: Tecnologia, Inovação e Desenvolvimento Sustentável (TIDS).

1. INTRODUÇÃO

A regulação da temperatura corporal é uma função essencial para os seres vivos endotérmicos, como os humanos (Saper; Machado, 2020). A temperatura central do corpo deve ser mantida dentro de uma faixa estreita em torno de 36,5 - 37,5 °C, para que as funções fisiológicas possam ocorrer de forma adequada (Geneva *et al.,* 2019). Dessa forma, o conforto térmico é geralmente alcançado por meio de dois métodos (Zhao *et al.,* 2021): (a) o uso de ar-condicionado para controlar a temperatura do ar em ambientes fechados e (b) o uso de roupas para regular a temperatura corporal ao ar livre. Assim, roupas comuns feitas de fibras naturais ou sintéticas têm desempenho térmico limitado, visto que essas fibras são relativamente grandes, dificultando a circulação do ar e o isolamento térmico (Carleton; Hsiang, 2016).

As infecções associadas aos cuidados de saúde (HAIs) ocasionadas por agentes patogênicos, como bactérias e vírus, são um problema sério que afeta tanto a sociedade, quanto à economia. Nos últimos anos, a indústria têxtil tem se concentrado no desenvolvimento de tecidos com propriedades funcionais. No entanto, o acabamento têxtil é um obstáculo global para a fabricação de tecidos confortáveis e multifuncionais. A indústria têxtil tem se esforçado para atender às demandas crescentes por tecidos, com novas propriedades funcionais. Para isso, tem investido em nanomateriais promissores e eficientes que podem ser usados para melhorar o desempenho dos tecidos (Morán; Renault, 2018).

As vestimentas são uma necessidade básica do nosso dia a dia, com três funções principais: proteção, modéstia e aquecimento. As roupas convencionais funcionam reduzindo a dissipação de calor do corpo humano para o ambiente frio por meio de processos de convecção e condução. Assim, as fibras de poliéster são amplamente utilizadas na fabricação de roupas e produtos industriais, em virtude ao elevado módulo de elasticidade e boa resistência ao calor e produtos químicos (Ürge-Vorsatz *et al.,* 2012; Cabeza; Gracia, 2021). No entanto, a falta de grupos hidrofílicos na composição de poliéster resulta em baixa absorção de umidade. Além disso, o alto grau de cristalinidade e orientação das fibras de poliéster promove uma estrutura

densificada, diminuindo a permeabilidade à umidade (Wang *et al.,* 2018). Vale ressaltar que as fibras de poliéster têm dificuldade em dissipar a transpiração, o que pode causar sensação de abafamento e desconforto, causando desconfortável, necessitando a utilização de produtos nanotecnólogos, a fim de promover maior conforto e aplicabilidade (Abdelgawad *et al.,* 2020; Fouda *et al.,* 2020).

A nanotecnologia é uma área que tem revolucionado diversos setores, como na indústria de roupas esportivas. A incorporação de nanopartículas metálicas em tecidos esportivos tem proporcionado avanços significativos, principalmente para promover conforto e melhoramento no desempenho de atletas (Mediene; Senoudi, 2023). Por exemplo, as nanopartículas de sílica mesoporosa (MSNs) vêm sendo utilizadas em tecidos nanotecnológicos com a finalidade anti-transpirante e propriedades desodorantes, bem como desempenho antibacteriano (Hassabo *et al.,* 2015; Hassabo; Mohamed, 2019). Tecidos condutores podem ser produzidos misturando fios metálicos com fibras de tecido ou funcionalizando tecidos com uma película de materiais condutores, garantindo maior conforto e resiliência, permeabilidade ao ar e à prova d'água (Mazroua *et al.,* 2019).

Neste contexto, o presente estudo de revisão tem como objetivo identificar as principais nanopartículas metálicas utilizadas em vestimentas de esporte, relacionando aplicações envolvendo atividade antibacteriana, troca de calor, umidade, hidrofobicidade e condutividade elétrica e térmica. A novidade neste *review* é descrever as principais nanopartículas para a aplicação de tecidos nanotecnológicos.

2. METODOLOGIA

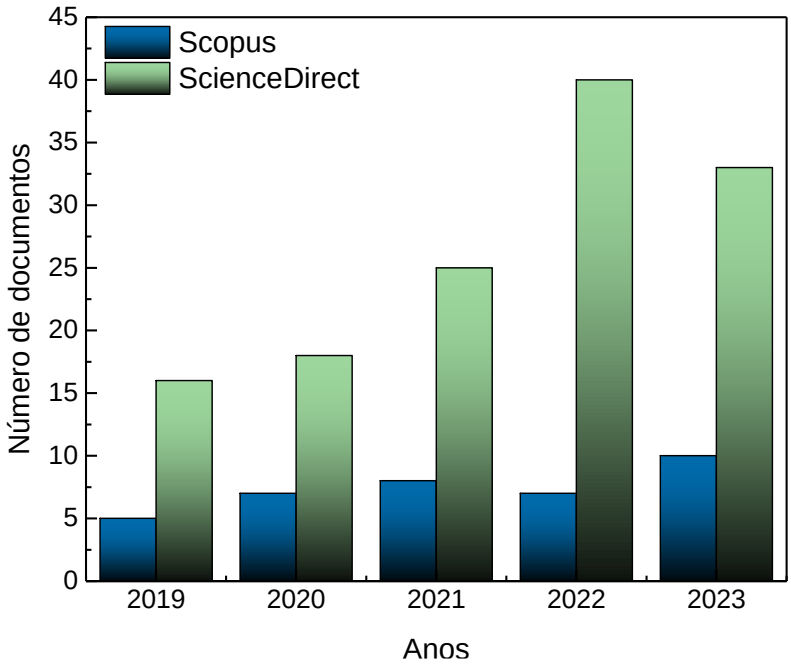
O presente estudo de revisão foi realizado no formato integrativo da literatura, sendo qualitativo e exploratório, por meio da análise de artigos científicos nas plataformas *ScienceDirect* (https://www.sciencedirect.com) e *Scopus* (https://www.scopus.com), seguindo a lógica booleana, no período de 2019 a setembro de 2023. Além disso, foram utilizadas as palavras ‘nanopartículas’ e ‘vestimentas de esporte’ e seus respectivos descritores em inglês ‘*nanoparticles*’ AND ‘*sports clothing’*. Todos os estudos analisados foram aqueles que apresentavam o tema descrito e em associação com processos envolvendo nanopartículas metálicas,

visando analisar as principais aplicações (como antibacteriana, hidrofobicidade e resistência ao calor) e parâmetros que afetam diretamente as nanopartículas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta os artigos encontrados nas plataformas *Science Direct* e *Scopus* no período de 2019 a setembro de 2023.

Figura 1 – Artigos científicos publicados por ano nas bases de dados *ScienceDirect* e *Scopus* entre 2019 e set/2023.



Fonte: Construção do Autor.

Conforme a Figura 1, foram encontrados 132 e 37 artigos científicos nas bases de dados *ScienceDirect* e *Scopus.com*, respectivamente. Resumidamente, o tema de vestimentas esportivas contendo nanomateriais demonstra uma tendência crescente de artigos publicados correlacionando diferentes tamanhos, propriedades e aplicações possivelmente, devido às novas pesquisas envolvendo aplicações antibacterianas, superfície de contato, resistência ao calor e frio e confortabilidade. Além disso, o aumento no número de artigos ocorre em ambas as plataformas com os primeiros artigos publicados apresentando um aumento percentual de artigos no ScienceDirect de 221%, denotando um tema atual, importante e relevante. Vale

ressaltar que as diferenças encontradas nas bases de dados podem ser devidas ao número de periódicos associados à cada base de dados (Scopus e à ScienceDirect). A Tabela 1 apresenta os resultados encontrados para tecidos esportivos, aplicações e principais propriedades das nanopartículas utilizadas das plataformas *ScienceDirect* e *Scopus* (2019-set/2023).

Tabela 1 – Resultados encontrados para vestimentas esportivas contendo nanopartículas nas plataformas *ScienceDirect* e *Scopus* (2019-set/2023).

Nanopartículas	Aplicação	Propriedades	Referência
CA-BIC	Tecidos resistentes a ambientes extremos	k = 27,2–28,4 $mW.m^{-1}.K^{-1}$, P_p = 99,25–99,36% e Θ = 162°	Yin *et al.,* 2022
ZnO-NPs@SiO_2h	Tecidos antibacterianos	MIC = 2,73 x 10^6 $cells.mL^{-1}$ e Θ = 155°	Kim *et al.,* 2021
PPy@TiO_2-NPs	Tecidos multifuncionais e durável	σ = 10^{-14} $S.cm^{-1}$ e P_s = 74 nm	Mohamed *et al.,* 2021
PTFEf	Tecidos integrados com eletrônicos vestíveis	ε = 11,0% e Ab_s = 83,7%	Zhang, Y. *et al.,* 2022
Pal-PDA@PET	Tecidos para menores transpiração	Θ = 9,46° e ΔHe = 1429 $J.g^{-1}$	Zhang, X. *et al.,* 2022
CelB@$CoFe_2O_4$	Tecidos com sensores eletromagnéticos flexíveis	Bio = 100% (56 horas) e R_r = 37,13 MPa	Chen *et al.,* 2022
AuNPs-c	Tecidos antibacterianos	MIC = bactérias gram-positivas (≥ 98,5%) e MIC = gram-negativas (≥ 99,94%)	Zhu *et al.,* 2022
AgNPs@TMSPM	Tecidos hidrofóbico em algodão	Θ = 148,3°	Pal *et al.,* 2022

CA: nanofibras híbridas de diacetato de celulose, BIC: reticulador de isocianato, k = condutividade térmica, P_p = porosidade, Θ = ângulo de contato, ZnO-NPs = nanopartículas de óxido de zinco, SiO_2h = dióxido de silício hidrofóbico, MIC = mínima inibição concentratória, PPy: polipirrol, TiO_2-NPs = nanopartículas de dióxido de titânio, σ = condutividade elétrica, P_s = tamanho das partículas, PTFEf = membrana de nanofibra de politetrafluoroetileno, ε = emissividade térmica, Ab_s = absortividade solar máxima, Pal = paligorsquita, PDA = membrana de polidopamina, PET = tecido de poliéster, ΔH_e = evaporação de entalpia, CelB = celulose bacteriana, $CoFe_2O_4$ = ferrita de cobalto, Bio = biodegradabilidade, R_r = resistência à ruptura, AuNPs-c = nanoclusters de ouro, AgNPs = nanopartículas de prata e TMSPM = silano isento de flúor e metacrilato de 3-(trimetoxissilil).

Fonte: Construção do Autor.

Os aerogéis de nanofibras de diacetato de celulose (CA-BIC) à prova d'água com boa respirabilidade e permeabilidade à umidade foi produzido a partir do método de impregnação, onde a formação de uma hierarquia de estrutura lamelar foi ajustada

para aumentar as propriedades mecânicas como a tensão de compressão (90%) e a elasticidade (suporta 20.000 ciclos) em temperaturas ultrabaixas (-196 °C). Dessa forma, a condutividade térmica encontrada de 27,2–28,4 $mW.m^{-1}.K^{-1}$ foi superior e tecidos de algodão sugerindo um potencial material para retenção de calor (Yin *et al.,* 2022).

As nanopartículas de zinco (ZnO-NPs) depositadas eletrostaticamente em tecidos podem reduzir simultaneamente a adesão das gotículas (Θ = 155°) e a viabilidade das bactérias diminuindo efetivamente o risco de infecção bacteriana possivelmente devido a processos de EPD. Deste modo, as nanopartículas porosas utilizam campos elétricos em substratos (SiO_2h) para controlar a quantidade de deposição das camadas de forma independente sem prejudicar ambas as propriedades (antibacteriana e antiumectante) (Kim *et al.,* 2021).

Têxteis multifuncionais que adquirem mais de uma propriedade ultimamente ganharam mais interesse como o PPy. As nanopartículas de titânio (TiO_2-NPs) denotaram uma elevada condutividade elétrica (10^{-14} $S.cm^{-1}$) inibindo a prevalência e ocorrência de infecções devido a diminuição do tamanho da partícula (± 74 nm) decorrendo o aumento da afinidade pelas cadeias celulósicas mantendo-se higiênico e sem odor mesmo após 20 ciclos de lavagem podendo a utilização em biossensores e blindagem eletromagnética (Mohamed *et al.,* 2021).

Roupas integradas com eletrônicos vestíveis se dividem em 2 funções básicas a gestão térmica e a geração de eletricidade. O PTFEf denota uma emissividade térmica mínima de até 11,0 % e uma absortividade solar máxima de até 83,7% permitindo uma queda de 3 °C no aquecimento interno do tecido em comparação com o algodão economizando 25,2–100 % do consumo de energia do edifício em dez cidades em todo o mundo. Deste modo, produzindo energia solar e passiva, aquecimento radiativo, mas também coleta energia biomecânica para gerar eletricidade (Zhang *et al.,* 2022).

O tecido de poliéster (PET) é um dos tecidos de vestuário mais utilizados no dia a dia; no entanto, a gestão da transpiração do PET é extremamente ruim. A combinação de Pal-PDA@PET aumentou o número de ligações de hidrogênio decorrendo excelentes propriedades de gerenciamento de umidade, baixo consumo de energia e proteção ambiental para aplicações industriais, devido ao aumento da a

hidrofilicidade (Θ = 9,46°), lipofilicidade, absorção de umidade, desempenho de conversão de luz em calor, taxa de evaporação (ΔH_e = 1429 $J.g^{-1}$) e resistência à tração (Zhang. *et al.,* 2022).

Os sensores eletromagnéticos flexíveis em tecidos baseados em compostos foram testados em uma plataforma de testes customizada, manifestando excelentes propriedades de detecção e estabilidade. A CelB@CoFe2O4 apresentou biodegradabilidade em tecido de 100% (em 56 horas) e R_r de 37,13 Mpa, devido à combinação de fibras de celulose com íons de Co^{2+} e Fe^{2+}. Dessa forma, sendo capaz de monitorar sinais de movimento e distinguir o estado de movimento, provando que o sensor eletromagnético flexível biodegradável é promissor utilizado no campo vestível como uma espécie de sensor flexível ecológico (Chen *et al.,* 2022).

Projetar tecidos antimicrobianos e desodorantes duradouros de alta eficiência, é uma meta eterna para a saúde ambiental e pública. Deste modo, os nanoclusters de ouro (AuNPs-c) apresentaram atividades antibacterianas contra bactérias gram-positivas (≥98,5 %) e gram-negativas (≥99,94 %), devido às características intrigantes dos íons de Au^{+} tendo fotodinâmica produção de espécies reativas de oxigênio na luz visível e à rica química da superfície, permitindo o efeito inibitório em bactérias e denotando biocompatibilidade em células fibroblastos (Zhu *et al.,* 2022).

As propriedades antiumectante, morfologia da superfície, composição química e a funcionalidade de tecidos de algodão hidrofóbicos são importantes para vestimentas atuais. Deste modo, a superfície superhidrofobica (Θ = 148,3°) do AgNPs@TMSPM é devido a elevada (> 90%) natureza cristalina dos AgNPs e modificação dos grupos de metacrilato no silano conferindo propriedades multifuncionais (Pal *et al.,* 2022).

Por conseguinte, o uso de nanopartículas em vestimentas esportivas é uma área de pesquisa promissora, com o potencial de melhorar o desempenho dos atletas e reduzir o risco de lesões, as nanopartículas podem ser utilizadas em vestimentas esportivas para uma variedade de aplicações, melhoria do desempenho, redução do risco de lesões ou monitoramento fisiológico. No entanto, ainda existem algumas dificuldades que precisam ser superadas para que essa tecnologia se torne amplamente utilizada, como por exemplo os custos, pois as nanopartículas são geralmente mais caras do que os materiais convencionais, a segurança,

nanopartículas podem ser tóxicas se não forem adequadamente utilizadas e necessário ver a influência no desempenho, pois será preciso determinar se as nanopartículas realmente melhoram o desempenho dos atletas (Zhang *et al.,* 2023).

4. CONCLUSÃO

No respectivo trabalho foi possível realizar um levantamento e descrição de artigos científicas sobre nanopartículas em roupas esportivas com foco nas aplicações de controle de calor, odor, geração de eletricidade e infecções bacterianas. A busca integrativa qualitativa e exploratória na base de dados *ScienceDirect* e *Scopus.com* de 2019-set 2023 evidenciou um aumento de 221% denotando um tema atual, importante e relevante. A aplicações de nanopartículas titânio, prata, ouro, zinco e nanofibras (diacetato de celulose e politetrafluoretileno) em tecidos (geralmente algodão) aumentam as propriedades térmicas e elétricas (condutividade), atividade antibacteriana (devido a inibição pelas espécies reativas de oxigênio), proteção UV-Vis e superhidrofobicidade (interação dos átomos com o meio), devido ao menor tamanho de partícula e interação com o substrato possibilitando uma melhor respirabilidade, estética, flexibilidade e capacidade de não provocar reações alérgicas. Por conseguinte, a temática de tecidos esportivos envolvendo nanotecnologia denotam um aumento exponencial no decorrer dos anos com propriedades excelentes. No entanto, há falta de dados em questão de toxicidade de nanopartículas (biocompatibilidade) deve ser estudado, explanado e salientado.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Grupo de Pesquisa em Nanomaterias Aplicados (GPNAp) e a Universidade Franciscana (UFN). O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ABDELGAWAD, A.M, *et al.* Antibacterial carrageenan/cellulose nanocrystal system loaded with silver nanoparticles, prepared via solid-state technique. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, p. 104276-104289, 2020.

CABEZA, L.F.; GRACIA, A. Thermal energy storage systems for cooling in residential buildings, in: L.F. Cabeza (Ed.). Advances in Thermal Energy Storage Systems, second ed. **Woodhead Publishing**, p. 595-623, 2021.

CARLETON, T.A.; HSIANG, S.M. Social and economic impacts of climate. **Science**, v. 353, p. 9837-9848, 2016.

CHEN, K. *et al.* $CoFe_2O_4$ embedded bacterial cellulose for flexible, biodegradable, and self-powered electromagnetic sensor. **Nano Energy**, v. 102, p. 107740-107751, 2022.

FOUDA, M.M.G. *et al.* Utilization of High throughput microcrystalline cellulose decorated silver nanoparticles as an eco-nematicide on root-knot nematodes. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 188, p. 110805-110819, 2020.

GENEVA, I.I. *et al.* Normal body temperature: A systematic review. **Open Forum Infectious Diseases**, v. 6, p. 1-7, 2019.

HASSABO, A.G. *et al.* Metal salts rented in silica microcapsules as inorganic phase change materials for textile usage. **Inorganic Chemistry An Indian Journal**, v. 10, p. 59-65, 2015.

HASSABO, A.G.; MOHAMED, A.L. Novel flame retardant and antibacterial agent containing MgO NPs, phosphorus, nitrogen and silicon units for functionalize cotton fabrics. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 9, p. 4272-4278, 2019.

KIM, J. *et al.* Antibacterial fabric with contradictory functions of water repellency and absorbency realized by electrophoretic deposition of hydrophobic SiO_2 and hydrophilic ZnO nanoparticles. **Progress in Organic Coatings**, v. 161, p. 106455-106467, 2021.

MAZROUA, A.M. *et al.* Nano-composite multi-wall carbon nanotubes using poly(p-phenylene terephthalamide) for enhanced electric conductivity. **Journal of Environmental Chemical Engineering,** v. 7, p. 103002-103015, 2019.

MEDIENE, S.; SENOUDI, A.R. Heating Kinetics of Gold Nanoparticles in Biological Tissues with a Femtosecond Laser. **Physical Sciences Forum**, v. 6, p. 1-8, 2023.

MOHAMED, A.L. *et al.* Preparation of hybrid nanoparticles to enhance the electrical conductivity and performance properties of cotton fabrics. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 542-554, 2021.

MORÁN, G.; RENAULT, R.M. Superhydrophobic surfaces toward prevention of biofilm- associated infections. **Bacterial Pathogenesis and Antibacterial Control**, Intechopen, 2018.

PAL, S. *et al.* Fabrication of AgNPs/Silane coated mechanical and washing durable hydrophobic cotton textile for self-cleaning and oil-water separation application. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 99, p. 100283-100293, 2022.

QIAN, H. *et al.* Mussel inspired superhydrophobic surfaces with enhanced corrosion resistance and dealation antibacterial properties. **Materials Science and Engineering: C**, v. 80, p. 566-577, 2017.

SAPER, C.B.; MACHADO, N.L.S. Flipping the switch on the thermoregulatory system. **Nature**, v. 583, p. 34-35, 2020.

ÜRGE-VORSATZ, D. *et al.* Energy End-Use: Buildings Global Energy Assessment: Toward a Sustainable Future. **Cambridge University Press**, p. 649-760, 2012.

WANG, J. *et al.* Highly crystalline polyesters synthesized from furandicarboxylic acid (FDCA): Potential bio-based engineering plastic. **European Polymer Journal**, v. 109, p. 379-390, 2018.

YIN, S. *et al. In situ* crosslinking of mechanically robust waterproof and moisture permeable cellulose diacetate nanofiber aerogels for warm clothing. **Chemical Engineering Journal**, v. 444, p. 136528-136536, 2022.

ZHANG, X. *et al.* Polydopamine-assisted load of palygorskite on polyester fabric for moisture absorption and perspiration. **Applied Clay Science**, v. 230, p. 106720-106730, 2022.

ZHANG, X. *et al.* Nanoparticles in sportswear: A review of recent advances and challenges. **Nanomaterials**, v. 13, p. 691-704, 2023.

ZHANG, Y. *et al.* A large-area versatile textile for radiative warming and biomechanical energy harvesting. **Nano Energy**, v. 95, p. 106996-107008, 2022.

ZHAO, Q.I. *et al.* Global, regional, and national burden of mortality associated with nonoptimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study. **The Lancet Planetary Health**, v. 5, p. 415-425, 2021.

ZHU, H. *et al.* Gold nanocluster with AIE: A novel photodynamic antibacterial and deodorant molecule. **Biomaterials**, v. 288, p. 121695-121704, 2022.