

BIOMIMÉTICA APLICADA AO DESIGN DE MODA: DESENVOLVIMENTO DE TECIDOS COM ALTA HIDROFOBICIDADE POR MEIO DE PROCESSO SIMPLIFICADO

BIOMIMICRY APPLIED TO FASHION DESIGN: DEVELOPMENT OF HIGHLY
HYDROPHOBIC FABRICS THROUGH A SIMPLIFIED PROCESS

Lauren Carus

Mestra e Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil) (2012 e 2017). Professora Doutora nos cursos de Design e Moda da Universidade Feevale e atua como professora e pesquisadora na Pós-Graduação em Indústria Criativa (Novo Hamburgo/Brasil).
E-mail: lauren.carus@ufrgs.br

Morgana Schutz

Mestranda em Design pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil). Graduada em Moda pela Universidade Feevale (Novo Hamburgo/Brasil) e com MBA em Negócios de Moda pela UniRitter (Porto Alegre/Brasil). Atua na Gestão de Negócios Melissa como Analista de Linha de Produto II na Grendene S/A.
E-mail: morganaschut@gmail.com

Vitor Artur Heisler dos Santos

Mestrando em Design pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).
Atua como UX Designer Pleno na Ilegra.
E-mail: vitorhds@gmail.com

Mariana Pohlmann de Oliveira

Doutora em Engenharia com ênfase em Ciência e Tecnologia de Materiais (2017) pelo PPGE3M/Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil). Professora Adjunta no Departamento de Design e Expressão Gráfica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil) e professora permanente do Programa de Pós-Graduação em Design, integra a equipe do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LDSM/Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil)).
E-mail: marianapohlman@gmail.com

Antonio Takimi

Graduado em Engenharia de Materiais e doutor em Ciência e Tecnologia dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil). Professor adjunto do curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil) e docente orientador de mestrado e doutorado nos Programas de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais (PPGE3M) e em Design (PGDesign/UFRGS) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Porto Alegre/Brasil).
E-mail: antonio.takimi@gmail.com

Recebido em: 6 de março de 2025
Aprovado em: 16 de junho de 2025
Sistema de Avaliação: Double Blind Review
BCIJ | v. 5 | n. 1 | p. 118-135 | jan./jun. 2025
DOI: <https://doi.org/10.25112/bcij.v5i1.4328>



RESUMO

A biomimética é uma abordagem científica que busca, na natureza, soluções para desafios de design e tecnologia. No setor têxtil e na moda, ela pode ser aplicada ao desenvolvimento de tecidos funcionais (como materiais com propriedades hidrodinâmicas, antibacterianas e outras) e aviamentos, contribuindo significativamente para o potencial inovador das criações desta área. Com base nessa abordagem, esta pesquisa propõe novos métodos de funcionalização têxtil bioinspirada no “efeito lótus”. O foco está em tornar o beneficiamento terciário do setor têxtil mais eficiente, reduzindo etapas de tratamento de superfícies para obtenção de tecidos com propriedades super hidrofóbicas. Para isso, foram testados dois métodos de funcionalização, aspersão e imersão de tecidos em solução. Ambas as técnicas utilizaram como reagentes PDMS dissolvido em solvente alifático (98% em peso) e Aerosil R812 (2% em peso), a fim de simplificar o processo e reduzir o consumo de energia e emissão de efluentes. Os resultados demonstram que as técnicas adotadas possibilitam a criação de superfícies hidro-repelentes, evidenciando sua viabilidade para aplicações mais sustentáveis no setor.

Palavras-chave: Design; Tecnologia têxtil; Biomimética.

ABSTRACT

Biomimicry is a scientific approach that seeks nature-inspired solutions to design and technological challenges. In the textile and fashion sectors, it can be applied to the development of functional fabrics (such as materials with hydrodynamic, antibacterial, and other properties), contributing to the innovative potential of creations in this field. Based on this approach, this research proposes new methods of textile functionalization inspired by the “lotus effect.” The focus is on making the tertiary finishing stage of the textile industry more efficient by reducing surface treatment steps to obtain fabrics with superhydrophobic properties. To this end, two functionalization methods were tested: spraying and immersion of fabrics in solution. Both techniques used PDMS dissolved in an aliphatic solvent (98% by weight) and Aerosil R812 (2% by weight) as reagents, aiming to simplify the process and reduce energy consumption and effluent generation. The results show that the adopted techniques enable the creation of water-repellent surfaces, demonstrating their viability for more sustainable applications in the sector.

Keywords: Design; Textile technology; Biomimetics.



1 INTRODUÇÃO

A Economia Criativa passou a integrar o escopo das Políticas Públicas em 2012, com a criação da Secretaria da Economia Criativa (SEC), vinculada ao então Ministério da Cultura do Brasil. Entre os diversos setores criativos, o segmento de Criações Funcionais – que inclui o Design de Moda – tem se destacado pelo uso de tecnologias inovadoras (Cruz, 2015). No campo da moda, os materiais nanotecnológicos tornaram-se um diferencial estratégico, impulsionando o crescimento do mercado. Segundo Vicente (2021), os tecidos tecnológicos se consolidaram como um fator de vantagem competitiva, agregando maior valor percebido aos produtos da área e aumentando a satisfação dos usuários, que hoje esperam das roupas funcionalidades adicionais além do simples ato de vestir.

Um exemplo de tecnologia amplamente divulgado, tanto no meio científico quanto no comercial, é o dos tecidos super-hidrofóbicos inspirados na morfologia da folha de lótus (*Nelumbo nucifera*). O estudo do chamado “efeito lótus” possibilitou, além da criação de têxteis impermeáveis, o desenvolvimento de tintas e revestimentos autolimpantes, turbinas de avião que não congelam, entre muitos outros produtos — todos baseados nos princípios observados nas nanoestruturas da superfície dessa planta (Lee; Michielsen, 2006; Araujo, 2018).

Essa inovação têxtil evidenciou a conexão entre o design de moda e a biomimética, especialmente com o avanço de tecnologias como a microscopia e a espectrometria, que permitem análises mais aprofundadas de materiais. Esse campo de pesquisa baseia-se no estudo de estruturas, processos e sistemas naturais para a criação de soluções sustentáveis e inovadoras (De Sá; Viana, 2020). A observação morfológica de superfícies possibilita a mimetização de microestruturas presentes na natureza que, ao longo de milhões de anos de evolução, revelam soluções eficientes e simplificadas, passíveis de serem aplicadas aos desafios enfrentados pelo design (Barthelat, 2007).

Segundo a UNCTAD (2010), ciência, pesquisa e desenvolvimento integram o conjunto de serviços dentro da economia criativa. Para fomentar esse setor, o órgão recomenda que os governos avaliem continuamente as condições para aquisição e atualização tecnológica. Nessa perspectiva, Eagleman e Brandt (2018) reforçam que a ciência é, por natureza, um processo criativo, e que a inovação tecnológica depende da capacidade de imaginar novas possibilidades. Assim, compreende-se que criatividade e conhecimento são elementos fundamentais tanto nas criações científicas quanto nas artísticas.

Bentz (2014), compreende que as indústrias criativas operam a partir da geração, produção e distribuição de bens e serviços fundamentados no capital intelectual e na criatividade. Esse setor engloba um amplo conjunto de atividades baseadas no conhecimento, que não se limitam a áreas específicas, mas possuem potencial de inserção no mercado, sendo protegidas por direitos de propriedade intelectual.



Diante desse contexto, este trabalho se propôs a investigar uma nova rota para a obtenção de superfícies têxteis super-hidrofóbicas, bioinspirada no efeito lótus, colaborando tanto para as criações científicas quanto para o desenvolvimento de materiais para criações funcionais de moda. A escolha do material teve como base uma amostra de tecido da marca Redhea, a partir da qual foi definida a estrutura têxtil a ser funcionalizada. Os processos de funcionalização adotados foram baseados em métodos que promovem o aumento da rugosidade superficial, por meio da impregnação de nanopartículas, e no tratamento químico da superfície com silanos, utilizando técnicas como aspersão de soluções e imersão em meios contendo os agentes precursores.

Com o objetivo de promover maior eficiência no beneficiamento terciário do setor têxtil e, consequentemente, reduzir as etapas de tratamento de superfície, as técnicas e os reagentes adotados foram selecionados com base na viabilidade de se desenvolver uma única etapa de funcionalização, diminuindo os gastos energéticos associados aos processos de síntese de nanopartículas e secagem. Dessa forma, o estudo desenvolvido pode contribuir com práticas alinhadas aos pilares econômico e ambiental da sustentabilidade.

2 BIOMIMÉTICA E OS MATERIAIS DAS CRIAÇÕES FUNCIONAIS DE MODA

A biomimética — do grego *bios* (vida) e *mimesis* (imitação) — é uma área científica que se inspira na natureza e em seus processos como modelo para a solução de problemas projetuais. Além de servir como fonte de inspiração, ela também funciona como um critério de avaliação, permitindo que invenções humanas sejam analisadas e aperfeiçoadas com base em padrões estabelecidos pela natureza ao longo de milhões de anos de evolução, o que confere a esses modelos atributos de funcionalidade, durabilidade e adequação. Por fim, a biomimética atua como uma mentora, pois a natureza não deve ser vista apenas como um recurso a ser explorado, mas como uma fonte contínua de aprendizado (Gerola; Robaey; Blok, 2023).

No setor têxtil e no campo da moda, a biomimética pode ser explorada como um novo caminho para o desenvolvimento de roupas multifuncionais e inovadoras. Segundo Das *et al.* (2017), o vestuário funcional é utilizado para diferentes finalidades, que vão desde a estética até a proteção do usuário. Esse termo engloba todos os tipos de roupas ou conjuntos desenvolvidos com o objetivo de oferecer propriedades específicas, que vão além das funções convencionais do vestuário.

Para Koch, Bhushan e Barthlott (2008), o primeiro exemplo proeminente da transferência de estruturas biológicas foi o estudo das peles de tubarão para o desenvolvimento de superfícies com menor atrito. As propriedades hidrodinâmicas da pele de tubarão, inicialmente estudadas visando a redução de

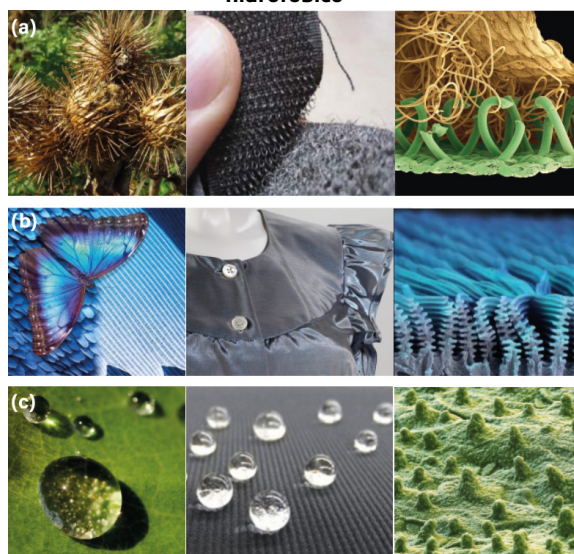


atrito nas superfícies de aeronaves, foram incorporadas ao processo têxtil para fabricação de roupas esportivas. O tecido mais popular, o Fastskin™ da Speedo, foi utilizado em maiôs de natação durante o período de 2008–2009. Esses maiôs são creditados com a melhoria de desempenho e a quebra de mais de 300 recordes de natação.

Das *et al.* (2017) destacam o Velcro como um dos modelos de aplicação da biomimética no desenvolvimento de aviamentos para vestuário. Inventado em 1941 pelo suíço Georges de Mestral, o fecho foi inspirado em uma observação feita durante um passeio de caça nos Alpes, quando ele percebeu que sementes de bardana aderem com facilidade às suas roupas e ao pelo de seu cão. O cientista examinou as sementes ao microscópio e identificou que sua superfície era coberta por minúsculos ganchos naturais, capazes de se entrelaçar com fibras têxteis, pelos ou cabelos. A partir dessa descoberta, buscou replicar esse mecanismo natural em um material sintético originando o sistema de fixação, figura 1(a).

A Morphotex® Fiber demonstra como a biomimética pode auxiliar para a redução da poluição relacionada aos processos de tingimento de tecidos. Inspirada na morfologia das asas de borboletas, o material reproduz efeitos ópticos naturais, possibilitando a visualização de cores por meio de uma alternativa sustentável e livre de resíduos químicos, em substituição aos métodos convencionais de tingimento. Segundo Yuan, Zhou e Zhang (2015), essa estratégia de coloração dispensa o uso de pigmentos ou corantes, utilizando em seu lugar estruturas fotônicas — ordenadas e amorfas — incorporadas diretamente nas fibras, conforme mostra Figura 1(b).

Figura 1 - Tecnologias têxteis desenvolvidas por meio do estudo de biomimética: velcro (a), Morphotex® (b) e tecido super-hidrofóbico ©



Fonte: Quadro de imagens elaborado pelos autores



Entre as propriedades naturais mais almejadas para aplicação em superfícies têxteis destaca-se a super-hidrofobicidade. De acordo com Das *et al.* (2017), esses materiais podem ser utilizados na confecção de guarda-chuvas, roupas de chuva, estofados, vestuário esportivo e de proteção, tecidos para interiores automotivos e até mesmo roupas com propriedades autolimpantes. Araujo (2018) explica que a super-hidrofobicidade observada em algumas folhas de plantas resulta da combinação entre uma rugosidade micrométrica da superfície e uma camada de cera com estrutura nanométrica. Essa configuração cria uma microestrutura capaz de reter ar entre as cavidades superficiais, além de reduzir significativamente a energia de superfície, figura 1(c). Como consequência, a água não se espalha, mas escorre em forma de gotas, levando consigo partículas de sujeira — um fenômeno conhecido como efeito lótus.

Para Oxman (2017), é a partir da evolução tecnológica — que possibilitou a compreensão das morfologias em escala nanométrica existentes na natureza — que se torna viável a construção de um mundo mais sustentável e em harmonia com o meio ambiente. Essas estruturas naturais têm servido de inspiração para o desenvolvimento de materiais sintéticos cada vez mais sofisticados, apontando um novo caminho para o avanço científico. Nesse contexto, o design e a ciência dos materiais surgem como áreas fundamentais que capacitam o ser humano a replicar, e até aprimorar, soluções que antes eram exclusivas dos sistemas naturais.

2.1 O “EFEITO LÓTUS” E A SUSTENTABILIDADE

O chamado “efeito Lótus” tem origem na estrutura morfológica das folhas da planta *Nelumbo nucifera*, conhecidas por sua capacidade de repelir gotículas de água. A superfície dessa planta foi fundamental para a descoberta do fenômeno da super-hidrofobicidade, tornando-se um dos principais modelos para o desenvolvimento de superfícies biomiméticas (Araujo, 2018).

A superfície das folhas de lótus possui uma topologia complexa e hierárquica, na qual são combinadas rugosidades em escala micrométrica — formadas por papilas — com uma densa camada de cristais de cera em escala nanométrica. Essa configuração reduz significativamente a área de contato das gotas de água com a superfície (Collins; Safiuddin, 2022; Leslie; Tushar; Ghosh, 2011).

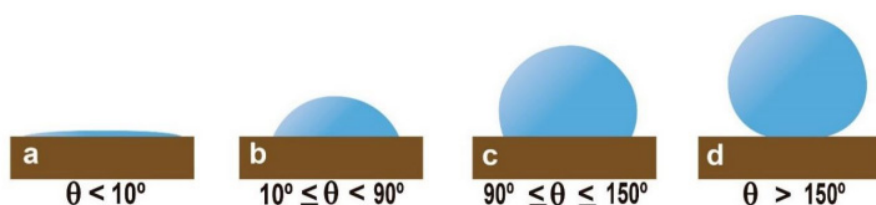
Para o desenvolvimento de superfícies super-hidrofóbicas, uma abordagem comum envolve duas etapas sequenciais de processamento. Inicialmente, busca-se aumentar a rugosidade da superfície através da funcionalização com precursores inorgânicos, frequentemente nanopartículas. Posteriormente, a energia superficial é reduzida pela ancoragem de grupos hidrofóbicos (Sfameni *et al.*, 2023). Entretanto, cada nova etapa de funcionalização inserida no processo de beneficiamento terciário da cadeia produtiva da indústria têxtil apresenta implicações significativas em termos de custos e sustentabilidade. A adição de etapas invariavelmente eleva os custos de fabricação e pode comprometer a sustentabilidade,



considerando o alto consumo de energia e água, além do aumento na geração de efluentes (Liberato; Lutamy, 2022).

Uma ampla gama de métodos tem sido desenvolvida com o objetivo de obter têxteis super-hidrofóbicos. Essas técnicas promovem, inicialmente, a indução de rugosidade na superfície do material e, posteriormente, a combinação com outros processos que resultam em texturas micro e nanométricas (Araujo, 2018). Para que uma superfície seja considerada super-hidrofóbica, o ângulo de contato aparente — formado entre as linhas tangentes às interfaces líquido-gás e líquido-sólido — deve ser superior a 150° , conforme mostra a figura 2 (Araujo, 2018).

Figura 2 – Esquema de gotas em superfícies com diferentes comportamentos de molhabilidade: a) super-hidrofílica; b) hidrofílica; c) hidrofóbica; d) super-hidrofóbica.



Fonte: Araujo, 2018.p.28

Athauda e Ozer (2012) desenvolveram uma superfície têxtil de algodão super-hidrofóbica por meio da funcionalização com nanopartículas de sílica (SiO_2). Segundo o estudo, o processo de beneficiamento têxtil envolveu três etapas principais. A primeira consistiu na preparação do tecido de algodão com epícloridrina, substância que viabiliza a fixação durável das nanopartículas funcionalizadas com grupos amina. Em seguida, realizou-se a deposição de duas camadas distintas de nanopartículas de SiO_2 sobre o substrato: a primeira com partículas funcionalizadas com grupos amina e a segunda com nanopartículas modificadas com epóxi, resultando em uma estrutura hierárquica na superfície do tecido.

Como resultado, os autores obtiveram uma superfície têxtil com ângulo de molhabilidade superior a 150° , caracterizando comportamento super-hidrofóbico. O procedimento descrito pelos pesquisadores adiciona três novas etapas ao processo de beneficiamento têxtil terciário e promove duas etapas de geração de efluentes.

Ren *et al.* (2018) descreveram uma nova técnica para a obtenção de superfícies super-hidrofóbicas em materiais têxteis sintéticos, especificamente em tecidos de poliéster. Os autores investigaram um método baseado na imersão do tecido em uma solução composta por Sylgard 184 (pré-polímero e agente de reticulação), tolueno (solvente) e nanopartículas de óxido de zinco (ZnO), seguida de uma etapa de cura térmica a 110°C . A aplicação dessa técnica resultou em superfícies com ângulo de contato superior a 156° , indicando alto grau de repelência à água.



O método de Ren *et al*, acresce mais duas etapas ao beneficiamento têxtil convencional, o que o torna mais viável e simplificado em comparação ao método proposto por Athauda e Ozer (2012), que envolve maior complexidade e número de fases.

Manzini e Vezzoli (2011), autores do livro *Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis, O: Os Requisitos Ambientais dos Produtos Industriais*, destacam que, entre as estratégias voltadas à promoção da sustentabilidade, estão a redução do uso de materiais e energia, além da adoção de processos de menor impacto ambiental. Alinhada a essa perspectiva, a otimização ou a adoção de alternativas que integrem etapas de forma mais eficiente surge como um caminho promissor para o desenvolvimento de materiais têxteis funcionais com abordagem sustentável. Nesse contexto, a proposição de metodologias de funcionalização em etapa única representa uma estratégia relevante, ao possibilitar a redução de processos e o menor consumo de reagentes.

Complementando essa visão, Bentz (2018) observa que transformar ideias em novas formas de experimentação e resolução de problemas, com o suporte de dispositivos técnico-científicos, constitui a essência da criatividade científica. Assim, ao impulsionar o desenvolvimento de novos métodos por meio da produção científica, promove-se também o fortalecimento da economia criativa, articulando inovação, sustentabilidade e geração de valor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente trabalho, uma amostra de tecido de microfibras, com nome comercial Energy, foi selecionada como substrato para o desenvolvimento da técnica de funcionalização, visando obtenção de propriedade super-hidrofóbica. A composição e a gramatura do material utilizado estão detalhadas no quadro 1. A seleção da amostra de microfibras foi baseada em um tecido de referência comercializado pela empresa Redhead, que apresenta propriedades hidrofóbicas, composição de 100% algodão e tecelagem em malha. Dentre as semelhanças entre o tecido selecionado e a referência, destacam-se a tecelagem e a gramatura. No entanto, no quesito composição, a amostra definida consiste em um substrato composto por matéria-prima sintética, enquanto o tecido comercializado é de origem natural. A definição de um material sintético como substrato para funcionalização considera as propriedades de resistência físico-químicas da fibra de poliéster. O poliéster é uma fibra sintética que apresenta excelentes propriedades como alta resistência ao desgaste e ao estiramento, baixo índice de encolhimento e baixa tendência à formação de rugas, o que o torna um material prático, de baixo custo e com reduzida necessidade de manutenção.



Quadro 1 - Materiais utilizados como amostras para funcionalização têxtil

Material - Nome comercial	Composição	Tecelagem	Gramatura g/m ²
Referência (Redhead)	100% algodão	malha	~160
Energy	91% poliéster 9% elastano	malha	160

Fonte: Autores (2025)

As amostras de microfibras passaram por uma etapa de higienização prévia, seguindo os protocolos de limpeza para substratos têxteis detalhados por Athauda *et al.* (2014). Este processo envolveu a imersão das amostras em uma solução aquosa de 500 mL contendo hidróxido de sódio (5 g), o tensoativo não iônico Triton X-100 (1,5 g) e ácido nítrico (1,5 mL). Após o tratamento com essa solução, as amostras foram enxaguadas com água deionizada para remover completamente quaisquer resíduos da solução de limpeza. Em seguida, foram submetidas a um processo de secagem ao ar livre, em temperatura ambiente aproximadamente 24 °C, durante um período de 72 horas.

Para modificar a superfície têxtil, utilizou-se uma solução de PDMS dissolvido em solvente alifático (98% em peso) e Aerosil R812 (2% em peso), este último trata-se um agente inorgânico contendo nanopartículas de dióxido de silício (SiO₂). A dispersão dessa mistura foi realizada por ultrassom, com potência de 100 W e tempo total de dispersão de 15 minutos (3 ciclos de 5 minutos ON/5 minutos OFF).

Para a funcionalização dos tecidos, foram adotadas duas vias distintas:

Imersão: As amostras foram imersas na solução de PDMS e Aerosil R812 por 5 minutos, permitindo que o material modificador interagisse com as fibras das amostras e se aderisse à sua superfície. Após esse período, foram removidas e secas à temperatura ambiente, permitindo a evaporação do solvente.

Aspersão: A solução de funcionalização foi aspergida sobre as amostras utilizando um borrifador. Este método permite uma aplicação mais controlada e em camadas da solução. As amostras foram mantidas estendidas em um varal pequeno, e o tempo de secagem entre cada aplicação foi de aproximadamente 5 minutos, permitindo a evaporação do solvente. O processo de aspersão foi repetido por 3 vezes para garantir uma cobertura uniforme e a deposição de uma quantidade suficiente do material modificador na superfície do tecido.

Posteriormente, as amostras tiveram sua superfície caracterizada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV, Hitachi, modelo TM3000). Esta técnica foi utilizada para observar a morfologia da superfície das amostras de tecido antes e após o processo de funcionalização, bem como a distribuição do material aplicado. Acoplada ao MEV, a técnica de Espectroscopia de Raios X por Dispersão



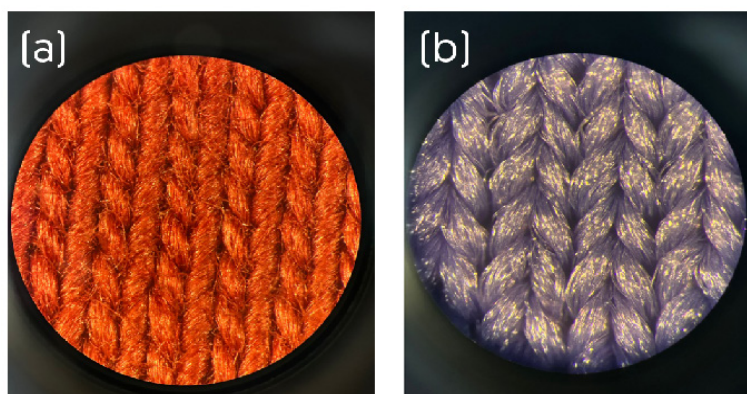
de Energia (EDS, Oxford Instruments, modelo Swift ED3000) foi utilizada para determinar os elementos químicos presentes na superfície das amostras.

O ensaio de molhabilidade foi utilizado para avaliar a variação do ângulo de contato de uma gota de água sobre a superfície das amostras de tecido. A variação deste ângulo foi medida em amostras não tratadas pelo processo de funcionalização e após o tratamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens de microscopia óptica apresentadas na figura 3 mostram a estrutura dos tecidos de referência da empresa Redhead e da microfibra Energy. Infere-se, pelas imagens obtidas (Figura 3a e figura 3b), que os materiais têxteis foram confeccionados utilizando a técnica de malharia por trama, amplamente empregada na produção de tecidos para itens como camisetas, moletoms e cachecóis. Essa técnica se caracteriza pela formação do tecido através de laçadas que se entrelaçam, criando uma estrutura senoidal que permite a movimentação do fio sob tensão (Almeida, 2017).

Figura 3 – Imagens de microscopia óptica amostra de referência (a) substrato escolhido para funcionalização (b), amostra Energy.



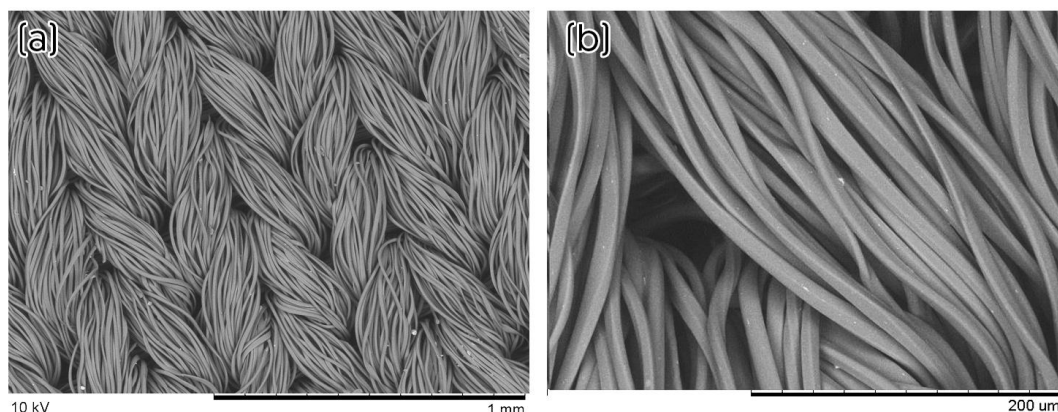
Fonte: Autores (2025)

Conforme a figura 3(a) a amostra de referência possui fios com maior torção em comparação com a amostra da figura 3(b). Essa diferença de torção pode estar relacionada à composição dos materiais. Fibras naturais, como o algodão comercial (com comprimento aproximado de 30-32 mm), geralmente requerem maior torção para aumentar a resistência do fio (Grishanov, 2011). Em contraste, fibras sintéticas podem ser produzidas em comprimentos maiores, o que pode reduzir a necessidade de alta torção.



A análise das imagens de microscopia eletrônica, figura 4, permite visualizar a morfologia da amostra de tecido de microfibra antes da funcionalização para conferir propriedades super-hidrofóbicas. A figura 4(a) evidencia a estrutura em malha do tecido, revelando que cada fio é composto por um conjunto de filamentos. Ao ampliar a imagem em 500x, conforme mostrado na figura 4(b), observa-se que os filamentos possuem superfície regular, e que cada fio apresenta aproximadamente 200 μm de diâmetro.

Figura 4 – Imagens de MEV da amostra Energy antes do processo de funcionalização para ação super-hidrofóbica aproximação 100x (a) aproximação de 500x (b).

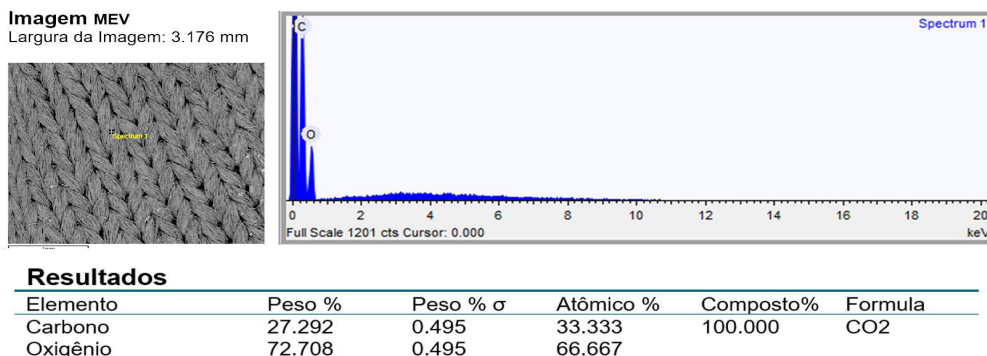


Fonte: Autores (2025)

Os resultados da análise de espectroscopia de raios-X por energia dispersiva (Figura 5) revelam unicamente a presença de carbono e hidrogênio na amostra, elementos característicos de materiais têxteis poliméricos sintéticos. Com base nesses resultados, infere-se que a amostra utilizada como substrato não possui acabamento superficial para conferir funcionalidades, tais como propriedades antibacterianas, proteção UV, ou outras.



Figura 5 – Dados de Espectroscopia para a amostra Energy antes da etapa de funcionalização para ação super-hidrofóbica

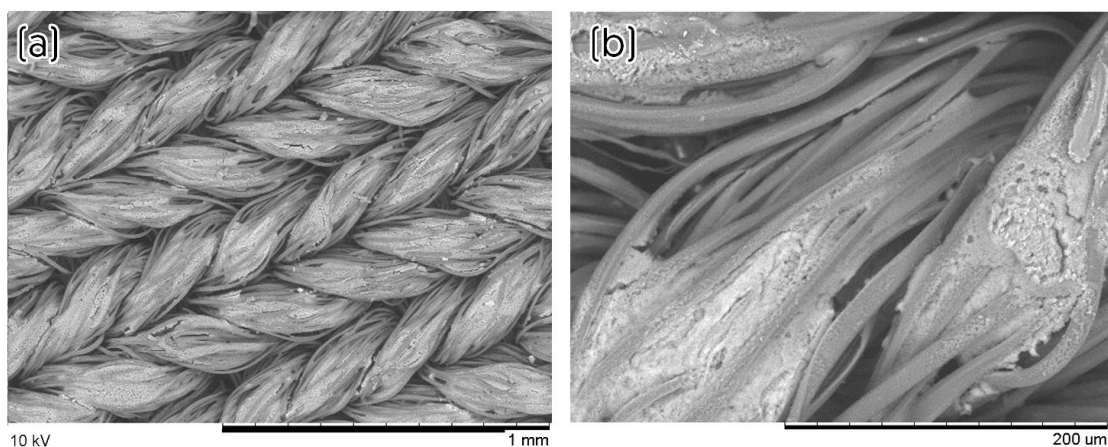


Fonte: Autores (2025)

Após a caracterização do substrato selecionado, o tecido de microfibras foi funcionalizado para obter propriedade hidrorrepente por meio de dois processos: imersão e aspersão. A figura 6 apresenta as imagens de microscopia eletrônica de varredura da amostra tratada por aspersão.

Inferese pela figura 6 que o processo de funcionalização por aspersão promoveu a deposição homogênea das nanopartículas de SiO₂, contidas na solução, sobre a superfície da amostra. Conforme mostra a Figura 6(a), as nanopartículas aderiram-se entre os filamentos dos fios. Ao ampliar a imagem em MEV, figura 6(b), evidencia-se que os aglomerados de SiO₂ permearam entre os filamentos, no entanto não os encobriram em sua totalidade.

Figura 6 – Imagens de MEV da amostra Energy após o processo de funcionalização por aspersão para ação super-hidrofóbica com aproximação de 100x (a) e com aproximação de 500x (b).



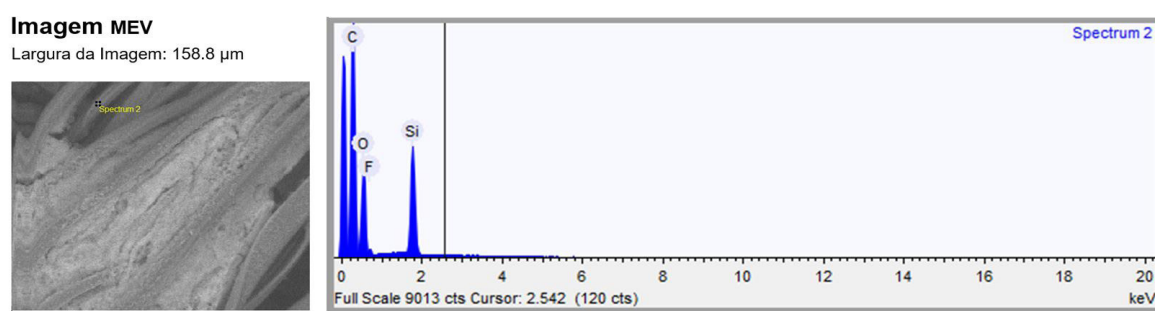
Fonte: Autores (2025)



A análise por espectroscopia EDS revelou alterações significativas na composição elementar da superfície do tecido após o tratamento de funcionalização. Conforme ilustrado na figura 7, os espectros resultantes exibiram picos de energia característicos dos elementos Silício (Si) e Flúor (F).

Os dados obtidos mostram a presença de silício devido à utilização do reagente Aerosil R812. Este material é composto por sílicas hidrofóbicas que se caracterizam por duas propriedades principais: uma área de superfície específica da sílica base entre 230 e 290 m²/g, e a presença de grupos trimetilsilil fixados em sua superfície, conforme detalhado por Mathias e Wannermacher (1997). A detecção de silício, portanto, é uma consequência direta da composição do Aerosil R812 empregado no experimento.

Figura 7 – Dados de Espectroscopia para a amostra Energy após etapa de funcionalização por aspersão para ação super-hidrofóbica.



Resultados

Elementos	Peso %	Peso % σ	Atômico %	Composto %	Fórmula
Carbono	25.013	0.169	31.223	91.649	CO ₂
Flúor	1.986	0.128	1.567	0.000	
Silício	2.975	0.028	1.588	6.365	SiO ₂

Fonte: Autores (2025)

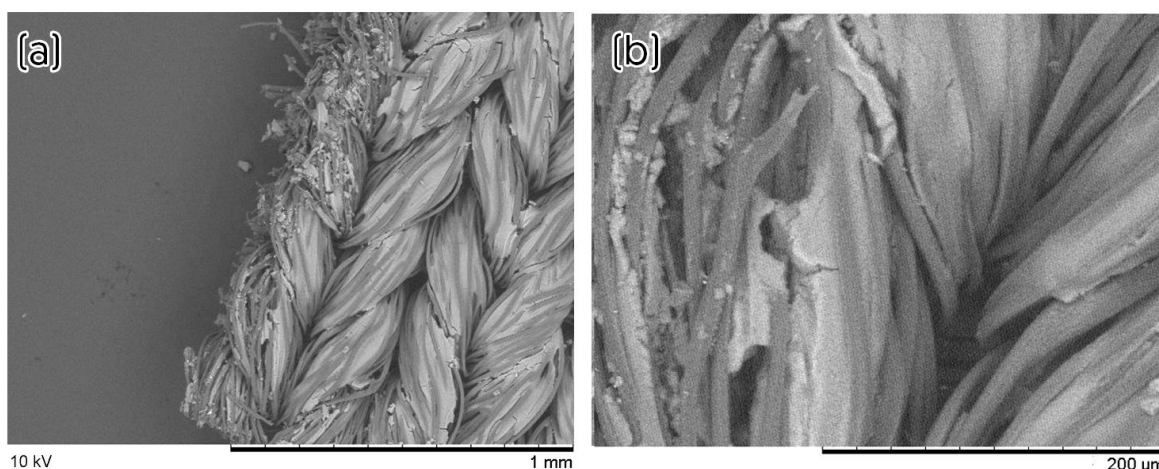
Embora a análise de EDS ainda tenha registrado a presença do elemento flúor, nem a amostra de tecido (composta pelos polímeros poliéster, cuja unidade de repetição é (C₁₀H₈O₄)_n, e elastano, um tipo de poliuretano), nem os reagentes utilizados no desenvolvimento da solução (PDMS, solventes alifáticos e sílica pirogênica Aerosil R812) incluem o flúor em suas estruturas moleculares. Devido a isso, o pico de detecção deste elemento pode estar relacionado a um ruído de identificação gerado pelo equipamento (Bruker, *s.d*).

As imagens de microscopia eletrônica das amostras funcionalizadas por imersão são apresentadas na figura 8. A análise dessas imagens revela que o processo de imersão, similarmente ao método de aspersão ilustrado na figura 6, resulta na deposição de nanopartículas de sílica tanto sobre a superfície dos fios quanto nos espaços entre os filamentos que os constituem. As imagens de microscopia, figuras 6



e 8, revelam a formação de um revestimento de nanopartículas aglomeradas sobre a estrutura da malha têxtil em ambos os métodos. Contudo, na figura 8 (b), evidencia-se que a deposição das nanopartículas ocorre predominantemente na superfície. Além disso, o material aderido exibe descontinuidades, com áreas dos fios que formam as laçadas da malha, permanecendo descobertas.

Figura 8 – Imagens de MEV da amostra Energy após o processo de funcionalização por imersão para ação super-hidrofóbica com aproximação de 100x (a) e com aproximação de 500x (b).

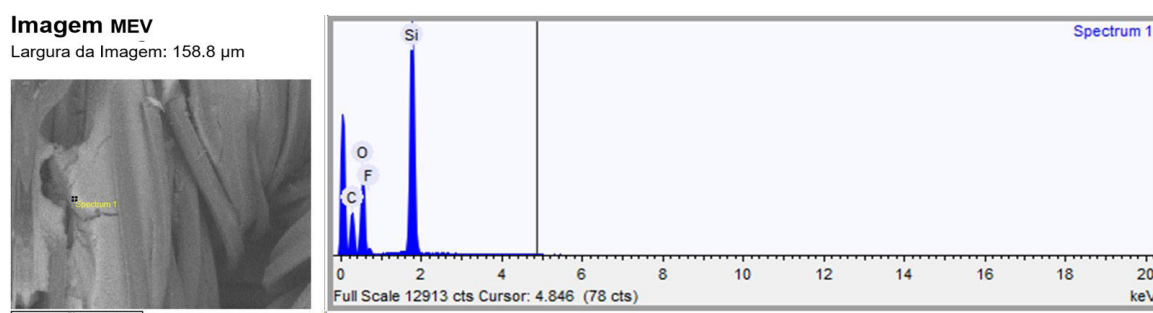


Fonte: Autores (2025)

A amostra tratada por imersão (Figura 9) revelou a presença dos elementos silício (Si) e flúor (F) para o ensaio de EDS. Essa detecção corrobora com o processo de funcionalização de superfícies para obtenção de super-hidrofobicidade descrita por Martin e Bhushan (2017). Em seu trabalho, os autores descreveram que uma solução contendo polidimetilsiloxano (PDMS) e nanopartículas de sílica (SiO_2). O PDMS, intrinsecamente hidrofóbico, atua como base para a repelência à água, enquanto a adição de nanopartículas de SiO_2 promove o aumento da rugosidade superficial. Essa combinação resultou na formação de um revestimento híbrido de propriedade super-hidrofóbica para a superfície de vidro estudada por Martin e Bhushan (2017).



Figura 9 – Dados de Espectroscopia para a amostra Energy após etapa de funcionalização por imersão para ação super-hidrofóbica.



Resultados

Elementos	Peso %	Peso % σ	Atômico %	Composto %	Fórmula
Carbono	18.239	0.255	24.412	66.827	CO ₂
Fluor	3.159	0.184	2.673	0.000	
Silício	14.030	0.100	8.031	30.014	SiO ₂

Fonte: Autores (2025)

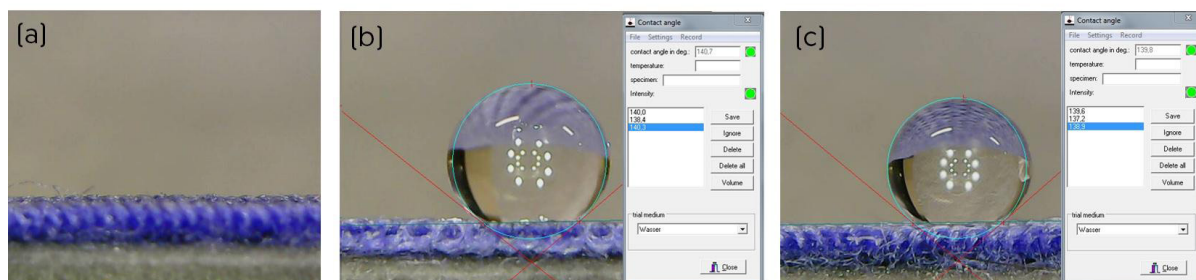
A molhabilidade dos tecidos foi avaliada através da técnica de ângulo de contato estático, pela deposição de gotas de água deionizada sobre a superfície dos materiais (Figura 10). A análise da figura 10(a) revela que, ao ser depositada sobre o tecido Energy não tratado, a gota de água é rapidamente absorvida pelas fibras. Esse comportamento demonstra a natureza intrinsecamente hidrofílica do tecido original.

Após o processo de funcionalização, ambas as amostras — tanto a tratada por aspersão (Figura 10b) quanto a tratada por imersão (Figura 8c) — apresentaram um ângulo de contato com a água de aproximadamente 140°. Esse resultado indica que ambas as técnicas geram superfícies hidrofóbicas, conforme Araujo (2018), uma vez que o ângulo de contato é inferior a 150°.

A obtenção de ângulos de contato dentro dessa faixa, para ambas as técnicas de aplicação, indica que o método de funcionalização adotado foi eficaz na geração da propriedade de repelência à água, independentemente da forma de deposição da solução. De acordo com a classificação adotada, os métodos desenvolvidos proporcionaram ao tecido tratado características hidrofóbicas, ainda que aquém dos parâmetros exigidos para a super-hidrofobicidade.



Figura 10 – Ângulo de contato para amostras de tecido Energy antes do processo de funcionalização (a) após etapa de funcionalização por aspersão (b) e após processo de imersão (c) para ação super-hidrofóbica.



Fonte: Autores (2025)

A adição de propriedades funcionais objetiva agregar valor aos tecidos conferindo aos materiais as características desejadas pelo mercado consumidor. Os custos associados a esse tipo de acabamento variam significativamente, influenciados pelas técnicas e pelos produtos químicos utilizados, além do volume de produção e da complexidade dos acabamentos (Luciano; Pacheco, *s.d.*).

Dessa forma, embora a técnica não tenha alcançado propriedade de superhidrofobicidade as técnicas promoveram hidrorrepelência com a adição de apenas uma etapa ao beneficiamento terciário — o que representa uma economia de recursos energéticos e a ausência de etapas como secagem ou grande aumento na geração de efluentes.

Para Fraga (2011, *apud* Santos; Junior), os materiais têxteis podem estar vinculados tanto à indústria do vestuário quanto à indústria da moda. A primeira está relacionada a uma visão capitalista de mercado, enquanto a segunda é mediada pelo elemento “cultura”. Nesse sentido, a roupa passa a integrar a indústria da moda quando funciona como suporte para a expressão cultural. Sob essa perspectiva, o desenvolvimento de novos processos de funcionalização têxtil com base na biomimética contribui para a economia criativa, ao promover o avanço de tecnologias científicas sustentáveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da biomimética no desenvolvimento de tecidos hidrorrepelentes se apresenta como uma estratégia promissora para a simplificação dos processos de funcionalização têxtil. Embora os métodos testados — aspersão e imersão — não tenham alcançado os parâmetros exigidos para a super-hidrofobicidade “Efeito Lótus” (ângulo de contato $> 150^\circ$), os resultados obtidos, com valores em torno de 140° , confirmam a eficácia na criação de superfícies com comportamento hidrofóbico. A realização



do tratamento em etapa única representa um avanço relevante na otimização de recursos, contribuindo para a redução de impactos ambientais e operacionais.

Esta pesquisa também reforça o potencial da biomimética como ferramenta de integração entre ciência, criatividade e sustentabilidade. Possibilitando o desenvolvimento de metodologias simplificadas nas quais mostram-se viáveis para fabricação de materiais têxteis com diferencial tecnológico para as criações funcionais de moda.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. **Malharia de trama e urdume:** Uma abordagem da construção dos tecidos no software autotcad. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná. 2017

ARAUJO, A. O. **Desenvolvimento e caracterização de revestimento biomimético super-hidrofóbico re-
tentor de camada de ar baseado na planta aquática salvinia para redução de arrasto hidrodinâmico.**
Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2018.

ATHAUDA, T. J., OZER, R. R. **Investigation of the effect of dual-size coatings on the hydrophobicity of
cotton surface.** Cellulose 19, 1031–1040 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10570-012-9659-7>

BARTHELAT, F. Biomimetics for next generation materials. **Philosophical Transactions of the Royal So-
ciety A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.** v. 365, n. 1861, p. 2907–2919, 2007.

BRUKER. **What is EDS/EDX? Introducing Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy.** Disponível em: <https://www.bruker.com/en/landingpages/bna/technology/what-is-eds.html> Acesso em: 18 abr. 2025.

COLLINS, C. M.; SAFIUDDIN, M. Lotus-Leaf-Inspired Biomimetic Coatings: Different Types, Key Proper-
ties, and Applications in Infrastructures. **Infrastructures**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 46, 2022.

DE SÁ, A. A. M.; VIANA, D. M. **Design e biomimética:** Uma revisão sobre o estado da arte do cenário bra-
sileiro. Mix sustentável. 137–150. 2020

EAGLEMAN, D.; BRANDT, A. **The Creative Brain.** (Documentário) Produção: Netflix. 2018

GEROLA, A.; ROBAEY, Z.; BLOK, V. What Does it Mean to Mimic Nature? A Typology for Biomimetic De-
sign. **Philosophy & Technology**, [s. l.], v. 36, n. 4, p. 65, 2023.



GRISHANOV. **Structure and properties of textile materials**. Handbook of Textile and Industrial Dyeing, Principles, Processes and Types of Dyes. Volume 1 in Woodhead Publishing Series in Textiles. Pages 28-63, 2011.

KOCH, K.; BHUSHAN, B.; BARTHOLOTT, W. Diversity of structure, morphology and wetting of plant surfaces. **The Royal Society of Chemistry**, vol. 4, p. 1943-1963, 2008.

LEE, H. J.; MICHIELSEN, S. Lotus effect: superhydrophobicity. **Journal of the Textile Institute**, v. 97, n. 5, p. 455-462, 2006

LIBERATO, V. H.; LUTAMYO, N. Sustainable application of nanomaterial for finishing of textile material. In: **Micro and Nano Technologies, Green nanomaterials for Industrial Applications**. Elsevier, 2022.

MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis**. Os Requisitos Ambientais dos Produtos Industriais. EDUSP. 3 Ed. São Paulo. 2011.

MARTIN, S.; BHUSHAN, B. Transparent, wear-resistant, superhydrophobic and superoleophobic poly(dimethylsiloxane) (PDMS) surfaces. **Journal of Colloid and Interface Science**. Vol 488, p. 118-126. 2017.

MATHIAS, J.; WANNEMACHER, G. Basic characteristics and applications of aerosil: 30. The chemistry and physics of the aerosil Surface. **Journal of Colloid and Interface Science**, Vol. 125, p. 61-68. 1997.

OXMAN, N. **Abstract**: The art of design. (Documentário). Produtora: Netflix. Episódio: Nery Oxman. 2ª Temporada. 2017.

SANTOS, H. H. O.; JUNIOR, J. D. R. Aproximação política entre moda e economia criativa. **Iara: Revista de moda, cultura e arte**. Vol. 7, N.1. 2014.

SFAMENI, S.; LAWNICK, T.; RANDO, G.; VISCO, A.; TEXTOR, T.; PLUTINO, M.R. **Super-Hydrophobicity of Polyester Fabrics Driven by Functional Sustainable Fluorine-Free Silane-Based Coatings**. Gels 2023, 9, 109. DOI: <https://doi.org/10.3390/gels9020109>.

UNCTAD. **Relatório de economia criativa 2010: Economia criativa uma, opção de desenvolvimento**. – Brasília: Secretaria da Economia Criativa/Minc; São Paulo: Itaú Cultural, 2012.

VICENTE, C. **Tecidos inteligentes e a sua aplicabilidade na moda**. Sesi Senai, 2021. Disponível em: <https://blog.sesisenai.org.br/tecidos-inteligentes-na-moda> Acesso em: 05 mar. 2024.

YUAN, W.; WU, C.; ZHOU, N.; ZHANG, K. Q. Fibers with the Tunable Structure Colors Based on the Ordered and Amorphous Structures. In: TAO, X. (eds). **Handbook of Smart Textiles**. Springer, Singapore. 2015.