

Os biomateriais têxteis no contexto da Indústria 4.0: o exemplo das fibras das teias de aranhas

Textile biomaterials in the context of Industry 4.0: the example of spider web fibers

Maria Fernanda Müller Pereira da Silva, graduanda em moda, Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc)

mullermariafernanda@gmail.com

Vitória Bobsin de Moraes, graduanda em moda, Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc)

bobsinvitoria@gmail.com

Ligia Lugnani de Souza, graduanda em moda, Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc)

ligia.lugs@gmail.com

Valdecir Babinski Júnior, doutorando em design, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

vj.babinski@gmail.com

Neide Köhler Schulte, Doutora em Design, Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc)

neideschulte@gmail.com

Resumo

O presente artigo tem como objetivo evidenciar vantagens e desvantagens no emprego de biomateriais no contexto da quarta revolução industrial. Para tanto, explora-se o exemplo das fibras das teias de aranhas a partir de uma pesquisa básica e bibliográfica. Em síntese, as vantagens desse material são: (I) a natureza antitrombica, antialérgica e anti-inflamatória; (II) as propriedades cicatrizantes e antimicrobianas; (III) a biocompatibilidade do material; (IV) a alta resistência; (V) a biodegradabilidade; (VI) a alta-performance; (VII) a não liberação de microplásticos; (VIII) a flexibilidade; (IX) a capacidade de geração de energia cinética; (X) a elasticidade; e (XI) as qualidades estéticas (brilho e suavidade). Como desvantagem, elencam-se: (I) supercontração na água; e (II) baixa escalabilidade industrial. A partir do exposto, infere-se que sua aplicação como biomaterial pode favorecer o uso de biotecnologia na quarta revolução industrial ao passo que suas potencialidades pró-sustentabilidade são experimentadas pelas indústrias têxtil e de confecção.

Palavras-chave: Biomateriais têxteis; Indústria 4.0; Fibras das teias de aranhas.

Abstract

This article aims to highlight advantages and disadvantages in the use of biomaterials in the context of the fourth industrial revolution. In order to do so, the example of spiders' web fibers is explored from a basic and bibliographical research. In summary, the advantages of this material are: (I) its antithrombotic, antiallergic and anti-inflammatory nature; (II) healing and antimicrobial properties; (III) the biocompatibility of the material; (IV) high strength; (V) biodegradability; (VI) high-performance; (VII) non-release of microplastics; (VIII) flexibility; (IX) the capacity to generate kinetic energy; (X) the elasticity; and (XI) the aesthetic qualities (brightness and smoothness). As a disadvantage, the following are listed: (I) supercontraction in water; and (II) low industrial scalability. From the above, it is inferred that its application as a biomaterial can favor the use of biotechnology in the fourth industrial revolution, while its pro-sustainability potential is experienced by the textile and clothing industries.

Keywords: Textile biomaterials; Industry 4.0; Spider web fibers.

1. Introdução

A quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0 (I4.0), tem despertado o interesse da comunidade acadêmica e do mercado de moda em função da promessa tecnológica de ruptura com o presente. O conceito trata de um modelo teórico-estrutural cujo cerne está no uso de ciber-espacos para a logística global e a produção customizada de artigos dotados de inteligência artificial (SOARES; CAMPOS, 2019).

Conforme aponta a literatura investigada nesta pesquisa, pela primeira vez na história há a antecipação de uma revolução industrial. Isto ocorre pois, na I4.0, ao mesmo tempo em que novas tecnologias podem ser inseridas na cadeia de produção, criam-se possibilidades de arranjos tecnológicos e de avanços setoriais. Para Carlota (2018), isso significa que, notavelmente, a indústria desenvolverá mudanças em uma década que, de outro modo, levariam 50 anos.

Essa antecipação pode estar fundamentada na eficiência e na otimização dos processos produtivos, visto que a revolução industrial supramencionada se baseia na descentralização das atividades manufatureiras. No prenúncio da I4.0, essas atividades continuam vinculadas com sistemas interligados em redes informatizadas, contudo, aposta-se na hiper-conectividade tecnológica, o que pode permitir que ajustes sejam feitos em tempo real e que produções tornem-se competitivas, local e globalmente (CARLOTA, 2018).

Ribeiro (2017) aponta que a I4.0 tem o potencial de, efetivamente, transformar os processos industriais atuais em sistemas eficientes que possibilitam a criação de artefatos personalizados em larga escala. Outra potencialidade observada pelo autor está na incorporação da biotecnologia ao desenvolvimento de produtos. Com a substituição dos recursos e dos insumos tradicionais, vista a finitude das fontes de matéria-prima empregadas pela indústria contemporânea, mudanças estruturais no emprego de biomateriais podem facilitar e otimizar a conectividade e a personalização desejadas para a revolução em questão.

De modo semelhante, Bittencourt *et al.* (2021) comentam que o impacto da quarta revolução industrial nas indústrias têxtil e de confecção afeta não só a organização da produção, mas também o produto e sua destinação. Nesse sentido, os autores sinalizam que a cadeia produtiva pode passar a empregar biomateriais com tecnologia embarcada para coletar dados de usuários e ambientes. A interpretação desses dados pode fornecer pistas sobre o desejo dos consumidores, seus hábitos de consumo, os espaços onde circulam, entre outras informações. Indiretamente, isso faz com que seja possível criar ações de marketing customizadas e dirigidas para determinados grupos de usuários, ao mesmo tempo em que impacta na diminuição do desperdício material.

Empiricamente, observa-se que a integração de biomateriais e tecnologia têxtil pode alcançar tanto nano quanto macro-dimensões. De tecidos inteligentes com capacidade para monitorar a atividade corporal e a saúde dos usuários até insumos com propriedades vivas e sustentáveis que sequestram da atmosfera o excesso de gás carbônico (CO₂), nota-se que o campo possibilita a criação de diferentes artefatos, substratos e estratégias que podem fortalecer a revolução industrial que, em breve, estará em curso.

Assim, este artigo visa a evidenciar vantagens e desvantagens no emprego de biomateriais no contexto da quarta revolução industrial. Para tanto, realizou-se um levantamento teórico assistemático sobre I4.0 e biomateriais com base em uma postura interpretativista que, por sua vez, resultou em uma síntese gráfica. Nesse processo de sumarização, os achados acadêmicos foram tratados de maneira qualitativa e narrativa, o que permite compreender este artigo como uma pesquisa bibliográfica, descritiva e básica — conforme a classificação metodológica de Gil (2008).

Importa comentar que o artigo está vinculado com a pesquisa desenvolvida por Maria Fernanda Müller Pereira da Silva no contexto do curso de bacharelado em Moda, do Centro de Artes, Design e Moda (Ceart) da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc). A pesquisa será defendida em julho de 2022 e está sendo orientada pelo professor Valdecir Babinski Júnior. Logo, introduzido o assunto e contextualizada sua articulação à academia, procede-se para a fundamentação teórica.

2. Indústria 4.0

Na visão de Carlota (2018, p. 5), “atualmente, o mundo está na fronteira da Indústria 3.0, que foi conduzida pelas Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) [...]”. A autora cita que esse modelo industrial continua baseado na forma de produção em quantidade, isto é, quanto mais unidades confeccionadas, menor será o custo unitário. Ademais, a autora esclarece que:

A indústria 3.0 ou 3ª Revolução Industrial sucede a 1ª Revolução Industrial com a introdução da máquina a vapor e a 2ª Revolução Industrial marcada pela invenção da eletricidade, e antecede a 4ª Revolução Industrial em que tudo está conectado através das tecnologias digitais. A 4ª Revolução Industrial causa algum fascínio pois é a primeira vez na história que uma revolução industrial é prevista à priori em vez de ser observada *ex post*, e pelo enorme impacto econômico que promete [...] (CARLOTA, 2018, p. 5).

Nesse sentido, Rodrigues, Fernandes e Sanjulião (2020, p. 2) sustentam que essas “[...] revoluções industriais ocorreram devido a necessidade de adaptação das organizações a demanda crescente de seu período, visando assim um aumento de produtividade industrial [...]”. Para os autores, “[...] de certo modo, a Indústria 4.0 não se difere das Revoluções

anteriores, pois comparada a terceira revolução, a Indústria 4.0 visa transformar a produção de bens e serviços [...]” (RODRIGUES; FERNANDES; SANJULIÃO, 2020, p. 4). Os autores afirmam que, como uma revolução subsidiou o surgimento de outra, pode-se compreender que a I4.0 consiste em um produto da evolução industrial que se caracteriza pela integração de processos físicos e digitais na medida em que se apoia em tecnologias facilitadoras e em produtos inteligentes.

À título de esclarecimento, Carlota (2018) comenta que o termo quarta revolução industrial surgiu na Alemanha (DE) em meados de 2011 como um plano de ação do governo para estimular a competitividade da indústria nacional. À época, acadêmicos, empresários e líderes políticos elaboraram uma estrutura de sistemas em que a produção e a logística de mercadorias eram dirigidos por ambientes ciber-físicos com a utilização intensiva das redes de comunicação para a troca de informações globais em tempo real. Conforme aponta a literatura, essa estrutura surgiu da necessidade de substituir o modelo taylorista de produção massificada por outro que pudesse levar em consideração a customização em massa.

Assim como Carlota (2018), Ribeiro (2017, p. 9) cita que a I4.0 consiste em um modelo teórico que tem como objetivo fornecer estratégias e direcionamentos para atender a demanda mercadológica por “[...] pequenas quantidades e grande variedade de produtos, com tempos de entrega mais curtos, maior exigência relacionada com a sustentabilidade do ciclo de vida e níveis elevados de qualidade e diferenciação [...]”. Nesse percurso, o autor acredita que o modelo pode possibilitar o surgimento de novos paradigmas pró-ambientais, já que “a sustentabilidade continua a ser um dos grandes desafios para a indústria têxtil. Com a introdução da tecnologia da Indústria 4.0 são dados os passos necessários para proteger os recursos naturais do planeta e diminuir os custos de produção” (RIBEIRO, 2017, p. 27).

Em concordância com Ribeiro (2017), Bittencourt *et al.* (2021) defendem que a I4.0 pode minimizar o impacto ambiental da atividade manufatureira. Os autores observam que “[...] com a Indústria 4.0 haverá um aumento de produtividade e [uma] redução de custos nos processos fabris, melhor utilização de recursos e economia de energia, sendo, portanto, um sistema para auxiliar no desenvolvimento sustentável [...]” (BITTENCOURT *et al.*, 2021, p. 9). Para Renck e Barauna (2021, p. 188), o custo ambiental da produção industrial precisa ser reduzido e mitigado urgentemente, pois “[...] a humanidade já usufruiu tanto da natureza que a biocapacidade de produção do planeta Terra já é superada desde a década de 1970, sendo que esse cenário de devastação avança progressivamente [...]”.

Nesse caminho, Renck e Barauna (2021, p. 188) acreditam que “[...] ao propor uma inovação têxtil para a sustentabilidade, é preciso pensar estrategicamente no seu design”. A partir desse argumento, pode-se dizer que, no desenvolvimento de novos artigos vestíveis, a forma e a função devem ser projetadas de modo que sejam abarcados requisitos pró-sustentabilidade de modo efetivo e eficiente. Essa responsabilidade compete aos profissionais de design que, por sua vez, devem tomar conhecimento das diversas formas de extração, manipulação, tratamento e beneficiamento de materiais têxteis. Nesse sentido, ao observar o contexto da I4.0 em Portugal, Ribeiro (2017, p. 37) recomenda aos designers que atentem para o fato de que:

[...] a produção de produtos clássicos baseada em materiais e técnicas tradicionais vai dar lugar a produção de têxteis técnicos e funcionais, com o objetivo de ir além da customização conseguida através do estilismo, sendo que para atingir esse objetivo tem de haver uma aposta na investigação e na inovação tecnológica [...].

Logo, ao desenvolverem novos produtos para as indústrias têxtil e de confecção, os profissionais de design devem levar em consideração a inovação tecnológica, a sustentabilidade e a capacidade das organizações em que atuam de se adaptarem ao contexto da quarta revolução industrial. Nessa dinâmica, insumos pró-ambientais podem ser utilizados por designers para assegurar às empresas a adequação necessária ao cenário de competitividade da I4.0. À exemplo, explora-se a seguir o caso dos biomateriais têxteis.

3. Biomateriais têxteis

Para Barauna *et al.* (2021), nos últimos cinco anos há um crescente interesse sobre os biomateriais nas indústrias têxtil e de confecção. Para os autores, o combate ao aquecimento global, a diminuição do uso de plástico e o veganismo podem ser algumas das justificativas dessa expansão. Porém, importa destacar que a relação dos biomateriais com outras áreas das indústrias supracitadas pode ser mais antiga. Apoiado na literatura científica, Anastácio (2015) classifica a história desses materiais em três gerações, conforme a evolução de suas propriedades e aplicações, a saber: (I) bioinertes; (II) bioativos; e (III) biomateriais.

A primeira geração diz respeito há materiais que tinham baixa interação com outros organismos, como próteses ou ligas metálicas para cirurgias dentárias, sendo esses classificados como bioinertes. A segunda geração de biomateriais foi denominada de bioativos. Trata-se de estimulantes para a regeneração dos tecidos naturais. Por fim, na terceira geração, que diz respeito aos dias atuais, têm-se os biomateriais propriamente ditos, que podem ser manipulados em nível molecular — o que permite a seleção de características apropriadas para a interação com o meio em que estão inseridos (ANASTÁCIO, 2015).

Nessa perspectiva, os biomateriais podem ser compreendidos como um conceito amplo que encontra diversos usos na indústria contemporânea. De modo geral, Renck e Barauna (2021) conceituam biomateriais como insumos avançados que servem de alternativa aos insumos considerados não-sustentáveis. Barauna *et al.* (2021) corroboram com esse argumento ao afirmarem que os biomateriais podem ser entendidos como soluções pró-sustentabilidade em substituição aos recursos convencionais que, via de regra, exercem pressão sobre os limites materiais do planeta.

De maneira semelhante ao exposto por Barauna *et al.* (2021) e Renck e Barauna (2021), mas do ponto de vista da Engenharia Têxtil e da Biomedicina, Sumanasinghe e King (2003) mencionam que os biomateriais podem ser compreendidos como substitutos biológicos dos insumos médicos convencionais cuja função está no reparo, na recuperação e na regeneração de tecidos e órgãos. Para os autores, os biomateriais resultam do conhecimento advindo das áreas de Química dos polímeros, Ciências biológicas, Ciências das fibras, Engenharia molecular, Bioinformática, Genética, Embriologia e Nanotecnologia, entre outras. Tradicionalmente díspares, essas disciplinas podem ser combinadas para que, do corpo de conhecimento resultante, sejam extraídas possibilidades de se criarem biomateriais. Ademais, os autores citam que esses insumos estão em um contínuo processo de inovação.

Acerca do que postulam Sumanasinghe e King (2003), cabe ressaltar que, na literatura científica, os biomateriais têxteis podem ser ora abordados do ponto de vista da *Tissue Engineering* (Engenharia dos tecidos vivos, em livre tradução) e ora examinados pela lente

da *Textile Engineering* (Engenharia têxtil, em livre tradução). Com base nesse segundo ângulo, Barauna *et al.* (2021) consideram que os biomateriais estão em constante mudança visto que seus usos e aplicações ainda possuem uma carga experimental. A partir dessa perspectiva, os autores assinalam que esses materiais podem ser classificados em cinco agrupamentos: (I) os de base biológica; (II) os tecidos biofabricados; (III) os ativos biomontados; (IV) os ingredientes biofabricados; e (V) os agentes biossintéticos.

Os materiais de base biológica podem ser percebidos como insumos que contêm resíduos de frutas ou vegetais combinados com polímeros sintéticos, tal como os tecidos de couros que não são provenientes de animais e os tecidos de algodão combinados com poliéster. Já os tecidos biofabricados podem ser produzidos por células vivas e microrganismos, a exemplo de bactérias, leveduras e micélios. Ressalta-se que esses tecidos podem incluir agentes biossintéticos e ativos biomontados, sendo eles, respectivamente, uma estrutura de larga escala criada por organismos vivos e polímeros sintéticos que podem ser decompostos em bioderivados (BARAUNA *et al.*, 2021).

Todavia, antes de existirem classificações para esses materiais, pesquisas já eram traçadas no intuito de se obterem insumos médicos compatíveis com tecidos humanos em substituição aos materiais convencionais, em especial, no âmbito da *Tissue Engineering*. Nessa lida, Sumanasinghe e King (2003) indicam que o termo biomaterial surgiu a partir de pesquisas desenvolvidas na Universidade de Liverpool, no Reino Unido (UK), durante a década de 1980. Inicialmente, o termo foi empregado para nomear materiais que não eram suficientemente viáveis para fabricação de insumos hospitalares, contudo, apresentavam uma reação expressiva em ambientes biológicos controlados. Os autores mencionam que a partir desse conceito surgiu o termo biotêxteis ou biomateriais têxteis.

Conforme Sumanasinghe e King (2003), os biomateriais têxteis podem ser considerados como estruturas compostas por fibras têxteis que possuem como objetivo exercer uma função específica em um ambiente biológico determinado. Como exemplo, os autores citam tecidos que podem ser empregados em implantes cirúrgicos e cuja eficiência pode ser medida em termos de bioestabilidade e biocompatibilidade. Os autores advogam que a biocompatibilidade se refere à capacidade de um material de obter uma resposta celular aceitável quando hospedado em ambiente biológico. Já a bioestabilidade representa a capacidade dos biomateriais têxteis de manter suas dimensões originais quando estão sob estresse químico ou mecânico.

A exposição a ambientes biológicos hostis também pode ser usada para mensurar o comportamento de um dado biomaterial têxtil. Esses ambientes podem ser tanto alogênicos (humanos), quanto xenogênicos (não-humanos). A exemplo, Sumanasinghe e King (2003) mencionam as próteses vasculares de poliéster que são tricotadas e que recebem um revestimento de carbono para substituírem artérias aórticas em pessoas idosas. Em outro exemplo, os autores tratam dos biomateriais têxteis que podem ser empregados para a reconstrução cirúrgica quando não há tecido autólogo (do próprio paciente) em quantidade viável para que uma operação seja realizada.

Sumanasinghe e King (2003) ainda sustentam que há duas abordagens teóricas na pesquisa em biomateriais têxteis: (I) *in vivo*; e (II) *in vitro*. Na primeira abordagem, os biomateriais têxteis podem ser empregados para a pesquisa em sistemas vivos, isto é, para reparos dentro do corpo humano ou animal. À título de exemplo, os autores citam os tecidos usados na reparação de lesões em peles e ossos e os suportes cardíacos externos desenvolvidos pela empresa Acorn Cardio-vascular Inc.®, que auxiliam na capacidade de bombeamento em pacientes com insuficiência cardíaca (Figura 1).

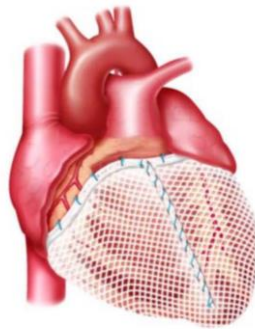


Figura 1: Dispositivo de biomaterial têxtil empregado como suporte cardíaco. Fonte: Sumanasinghe e King (2003, p. 6).

Por outro lado, na abordagem *in vitro*, os biomateriais têxteis podem ser produzidos em instalações laboratoriais ou em ambientes controláveis e propícios para torná-los suprimentos ilimitados para a Biomedicina. Nesse sentido, Sumanasinghe e King (2003) apontam que esses insumos cumprem com finalidades específicas, a saber: (I) restaurar a função de vasos sanguíneos, tendões e cartilagens; (II) auxiliar no funcionamento de dispositivos artificiais extracorpóreos; e (III) produzir enzimas e outras culturas para uso farmacológico e ensaios toxicológicos. Ademais, os autores acrescentam que, para os biomateriais têxteis *in vitro*, busca-se desenvolver características similares às propriedades e qualidades das matérias-primas naturais, tal qual ocorre com os biopolímeros.

Como exemplos de biopolímeros naturais, Sumanasinghe e King (2003) citam as proteínas da seda, os polissacarídeos das algas marinhas, os alginatos e a quitosana que tem sua origem em mariscos. Na Biomedicina, os autores apontam que esses biopolímeros podem ser utilizados para a construção de malhas fibrosas que se assemelham com tecidos não-tecidos. A vantagem de se usar esses insumos na Biomedicina está em seu potencial de absorção por processos enzimáticos.

Assim como na *Tissue Engineering*, na *Textile Engineering* os biomateriais podem ser empregados para atender usos específicos em cenários controlados. Nessa perspectiva, Renck e Barauna (2021) acreditam que, para que se alcance o fim desejado, os designers devem levar em consideração questões de ordem tanto técnicas quanto ambientais. Como exemplo, as autoras citam como pontos a serem observados: (I) a disponibilidade de matéria-prima local; (II) a variedade e o tipo de recursos naturais que podem ser empregados pela organização ou pelo designer no projeto de novos produtos; (III) a qualificação da mão-de-obra envolvida; (IV) as condições de trabalho e a salubridade dos ambientes de extração, manufatura e beneficiamento dos materiais; e (V) a emissão de gases tóxicos, de resíduos sólidos e de efluentes contaminantes.

Todavia, Renck e Barauna (2021) mencionam que não se deve desprezar as questões socioculturais, econômicas e geográficas, tais como: (I) o conhecimento e os valores da organização ou do designer; (II) os modelos produtivos predominantes, localmente; (III) o clima; (IV) a urbanização; (V) o sentido de pertencimento e de territorialidade dos trabalhadores e dos consumidores relacionados com a empresa; e (VI) a sazonalidade das tendências das indústrias têxtil e de confecção.

Dessa maneira, tanto em uma abordagem quanto em outra, os biomateriais têxteis cumprem com funções específicas que orientam desde o seu cultivo até sua aplicabilidade.

Entre esses biomateriais — que para Marques *et al.* (2017) podem ser denominados de materiais têxteis inusitados — estão as fibras provenientes do abacaxi, da uva, do cogumelo e das teias de aranhas. Este último exemplo será detalhado a seguir.

3.1 As fibras das teias de aranhas

Entre os diversos biomateriais têxteis cujas pesquisas recentes apontam possibilidades para o uso em um contexto futuro de avanço tecnológico estão as fibras das teias de aranhas — material denominado, também, de seda de aranha. Para Silva Neto e Marques (2020, p. 277), “é notória que a seda de aranha contém características únicas para ser amplamente utilizada, e mostra-se ser um recurso alternativo para ser aplicado no ramo biotecnológico, devido suas diversas capacidades mecânicas e aspectos físico-químicos [...]”.

Saravanan (2006) menciona que a seda das teias de aranhas consiste em fibras proteicas naturais que apresentam texturas filamentosas. Esse material possui propriedades superiores às fibras naturais e sintéticas. Para Marques *et al.* (2017), entre essas propriedades está a de resistência, que pode chegar a ser 53% melhor do que a da seda natural. Segundo os autores, o material não é produzido pelas aranhas de fato, mas sim por bichos-da-seda que são geneticamente modificados para que suas glândulas e fiandeiras cumpram este fim.

O bicho-da-seda é o nome popular dado à larva da mariposa *Bombyx mori*, que pertence à ordem das *Lepidopteras* e ao filo *Arthropoda*. As vantagens em se utilizarem bichos-da-seda no lugar de aranhas está no formato fiável que o casulo desses insetos apresenta e, também, no fato de serem de fácil domesticação, diferente dos aracnídeos que podem ser territorialistas e apresentar comportamentos agressivos (SILVA NETO; MARQUES, 2020).

Saravanan (2006) e Marques *et al.* (2017) comentam que as fibras das teias de aranhas que são produzidas pelos bichos-da-seda têm sido empregadas para a construção de fios cirúrgicos e coletes à prova de balas. Isto decorre das propriedades do material que se assemelha ao Kevlar® comumente usado para a proteção balística. Saravanan (2006) também menciona que essas fibras podem ser utilizadas para a confecção de paraquedas, redes de pesca, cordas de elevadores, pontes, pilares, entre outros artefatos.

Conforme supracitado, o material ainda pode ser usado na Biomedicina, uma vez que apresenta biodegradabilidade. Empregado em suturas, biomembranas e em curativos para auxiliar na coagulação sanguínea, as fibras das teias de aranhas podem apresentar um baixo potencial inflamatório ao passo em que possuem uma natureza antitrombica. Esse material também pode ser utilizado para a recuperação de ligamentos de joelho, a reconstrução de tendões artificiais e como auxiliar em cirurgias oculares (SARAVANAN, 2006; SWANSON *et al.* 2009). Silva Neto e Marques (2020, p. 270) explicam que essas aplicações se devem ao fato de que “os biomateriais das aranhas ganharam visibilidade, pois ao entrarem em contato com tecidos vivos, não desencadeiam resposta alérgica ou inflamatória [...]”.

Da perspectiva da Arquitetura e da Construção Civil, Pacheco-Torgal e Jalali (2011) defendem que as fibras das teias de aranhas excedem a tração do aço na relação resistência *versus* massa. Segundo os autores, “[...] enquanto o aço de alta resistência atinge uma

ruptura para uma extensão inferior a 1%, o fio de teia de aranha consegue uma extensão de 30% antes de atingir a ruptura [...]” (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2011, p. 2-3). Essa energia de ruptura elevada, torna o material propício para o emprego em estruturas que podem sofrer impactos consideráveis, regularmente.

Do ponto de vista das indústrias têxtil e de confecção, a potencialidade da seda de aranha já tem sido empregada para a produção de peças de vestuário biotecnológicas. Oliveira (2021) cita o caso do trabalho articulado entre a Bolt Threads® e a designer Stella McCartney. A empresa foi responsável pelo desenvolvimento da Mycosilk®, uma fibra similar à seda tradicional, contudo, dotada de alta-performance e biodegradabilidade. Segundo a autora, “[...] as vantagens desta fibra é que ao se degradar não libera microplásticos no meio ambiente, visto que é uma fibra de base proteica, biodegradando-se completamente [...]” (OLIVEIRA, 2021, p. 72). Outro exemplo é a jaqueta Moon Parka®, desenvolvida pela The North Face® em parceria com a empresa Spiber® (Figura 2).

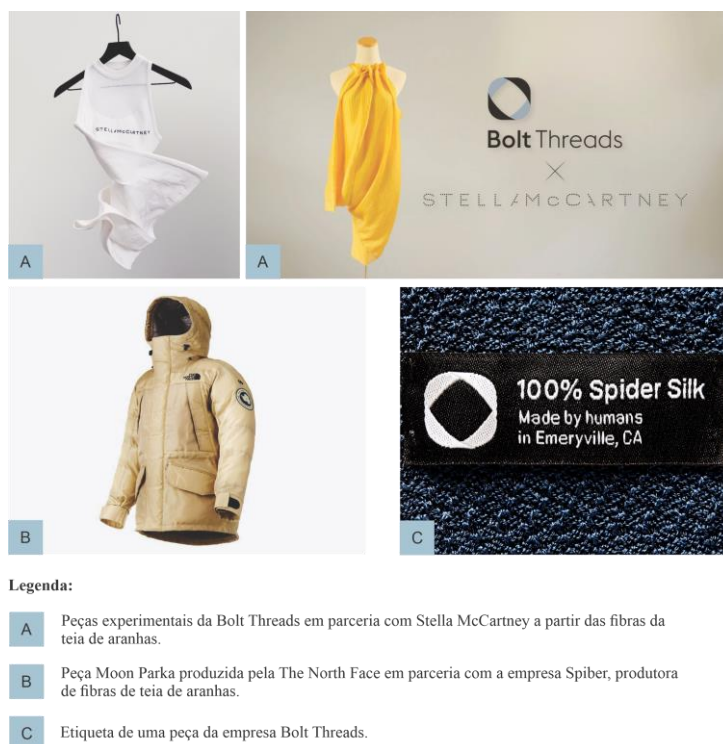


Figura 2: Peças de vestuário desenvolvidas a partir das fibras das teias de aranhas. Fonte: adaptada de Oliveira (2021, p. 74).

Importa comentar que as peças de vestuário desenvolvidas pela Bolt Threads® e pela The North Face® (Figura 2) ainda estão em fase de experimentação. Os testes aos quais são submetidas as fibras visam determinar o melhor aproveitamento de suas qualidades. Nesse sentido, além da alta resistência, Saravanan (2006) cita como característica do material: (I) a flexibilidade da fibra, que pode ser alongada sem se romper; (II) a capacidade de produção de energia cinética, uma vez que, quando a presa é capturada pela teia, sua movimentação é convertida em calor que funciona como alarme sensorial para a aranha; e (III) a elasticidade das teias, que absorve o impacto do inseto e não o catapulta de volta. Silva Neto e Marques (2020) adicionam como características das fibras das teias de aranhas: (I) suas propriedades cicatrizantes e antimicrobianas, o que as tornam alternativas

terapêuticas viáveis em procedimentos dermatológicos; (II) suas qualidades estéticas, como brilho e suavidade, que permitem seu emprego para a produção de cosméticos; e (III) seu potencial de degradabilidade mínima, o que a torna biocompatível com diferentes matérias-primas e ambientes biológicos.

Saravanan (2006) acredita que as qualidades supracitadas podem ter relação com o formato das teias. O autor sublinha que essas teias podem ser do tipo orbicular, emaranhadas ou em formato de folhas. Esses tipos variam conforme o peso das aranhas, sua idade, sua espécie e o tamanho do espaço disponível para armar a teia. De maneira geral, as aranhas não investem tempo na busca por suas presas, todavia, seus esforços podem ser engendrados na síntese da seda e na construção das teias que devem ser resistentes o suficiente para não sofrerem danos com o arrasto do ar ou serem desfeitas com o impacto dos insetos que tentam atravessá-las.

De modo semelhante ao exposto por Saravanan (2006), Swanson *et al.* (2009) acreditam na existência de mais de um tipo de seda proveniente das fibras das teias de aranhas. Para os autores, essa variação decorre do fenótipo, da morfologia, da fisiologia e do comportamento de cada espécie e subespécie. Sobre essa diversidade de sedas, Silva Neto e Marques (2020, p. 270) mencionam que “[...] já foi possível identificar cinco tipos de sedas, que são: Ampola da principal, Ampola da secundária, Tubuliforme, Aciniforme e Espiral de captura [...]”, cada qual com vantagens e desvantagens.

Como desvantagem, Saravanan (2006) afirma que as fibras das teias de aranhas apresentam supercontração na água, o que prejudica seu uso em materiais para esportes aquáticos, por exemplo. Contudo, para Silva Neto e Marques (2020, p. 277), a desvantagem mais expressiva no uso do material está na “[...] produção de análogos, já que há dificuldade para a produção de seda natural em grande escala”. Isto implica dizer que, se superada a fase de experimentação desse biomaterial, suas desvantagens podem ser suplantadas por condições de escalabilidade industrial. Logo, apresentadas as vantagens e desvantagens das fibras das teias de aranhas, procede-se para o resultado.

4. Resultado

Para sumarizar a revisão de literatura assistemática realizada a partir da pesquisa bibliográfica, optou-se pela elaboração de uma Representação Gráfica de Síntese (RGS). A Figura 3 reúne as informações levantadas na pesquisa, com destaque para Saravanan (2006), Swanson *et al.* (2009), Pacheco-Torgal e Jalali (2011), Marques *et al.* (2017), Silva Neto e Marques (2020) e Oliveira (2021).

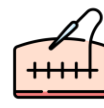
VANTAGENS

 Agrupamento 1
Biomedicina


Natureza antitrombica, antialérgica e anti-inflamatória



Propriedades cicatrizantes e antimicrobianas



Biocompatibilidade do material

 Agrupamento 2
Biotecnologia


Alta resistência



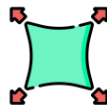
Biodegradabilidade



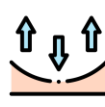
Alta-performance



Não liberação de microplásticos



Flexibilidade



Capacidade de geração de energia cinética



Elasticidade



Qualidades estéticas (brilho e suavidade)

DESVANTAGENS


Supercontração na água



Baixa escalabilidade industrial

Figura 3: Vantagens e desvantagens no emprego de biomateriais no contexto da quarta revolução industrial. Fonte: elaborada pelos autores.

Conforme observa-se na Figura 3, as vantagens e desvantagens do uso de biomateriais como as fibras das teias de aranhas consistem em considerações advindas tanto da *Tissue Engineering* (representadas no agrupamento denominado Biomedicina), quanto da *Textile Engineering* (representadas no agrupamento biotecnologia). Cabe comentar que essas potencialidades e fragilidades limitam-se às fibras investigadas e que, apesar de se induzir que esses mesmos achados podem ser encontrados em outras situações, deve-se atentar para a especificidade de cada biomaterial têxtil. Ou seja, o resultado não pode ser compreendido como um modelo que caracteriza todos os biomateriais têxteis.

Adicionalmente, faz-se importante destacar que as fibras das teias de aranhas não podem ser confundidas com as sedas naturais provenientes da produção do bicho-da-seda, pois trata-se de materiais distintos cujas características, usos e aplicações diferem em suas propriedades, escalas e finalidades. Sublinha-se, também, que o conhecimento gerado a partir dessa pesquisa apresenta o levantamento bibliográfico sobre I4.0 e biomateriais sem se debruçar, nessa instância, em uma análise reflexiva ou crítica. Isto posto, reitera-se que o presente artigo consiste em uma parte do trabalho de conclusão de curso da autora principal, isto é, trata-se de uma pesquisa em estágio inicial.

5. Considerações finais

O presente artigo teve como objetivo evidenciar vantagens e desvantagens no emprego de biomateriais no contexto da quarta revolução industrial. Para tanto, explorou-se o exemplo das fibras das teias de aranhas. Em síntese, as vantagens desse material podem ser organizadas em dois agrupamentos: (I) Biomedicina; e (II) biotecnologia. No primeiro grupo, estão: (I) a natureza antitrombica, antialérgica e anti-inflamatória; (II) as propriedades cicatrizantes e antimicrobianas; e (III) a biocompatibilidade do material. No segundo grupo, citam-se: (I) a alta resistência; (II) a biodegradabilidade; (III) a alta-performance; (IV) a não liberação de microplásticos; (V) a flexibilidade; (VI) a capacidade de geração de energia cinética; (VII) a elasticidade; e (VIII) as qualidades estéticas (brilho e suavidade). Como desvantagem, elencam-se: (I) supercontração na água; e (II) baixa escalabilidade industrial.

Nesse sentido, ressalta-se que, tal como a I4.0 necessita de tempo para avançar, também o emprego das fibras das teias de aranhas demanda estudos à longo prazo para que sejam produzidos insumos viáveis em escala industrial. Estima-se que sua aplicação como biomaterial pode favorecer o uso de biotecnologia na quarta revolução industrial ao passo que suas potencialidades pró-sustentabilidade podem ser experimentadas pelas indústrias têxtil e de confecção.

Assim, para tornar o corpo de conhecimento válido e legitimar as vantagens e desvantagens supramencionadas, faz-se valioso o desenvolvimento de uma pesquisa aplicada, tanto laboratorialmente como em campo. Portanto, sugere-se como agenda de pesquisa que seja aprofundada a revisão teórica e que sejam testados protótipos de biomateriais têxteis na dinâmica da I4.0. Posto esse desafio, assume-se que o artigo não esgota as possibilidades de debate que envolvem a lida com os biomateriais têxteis, vista a complexidade do tema.

Por fim, os autores do artigo agradecem o acolhimento da pesquisa no Encontro de Sustentabilidade em Projeto (ENSUS), em sua edição de 2022. Também se faz importante agradecer o apoio institucional da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc), da Direção de Pesquisa e Pós-Graduação (DPPG) do Centro de Artes, Design e Moda (Ceart), da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPPG) e do corpo discente e docente do Departamento de Moda (DMO) da Udesc.

Referências

- ANASTÁCIO, Amanda Gleyce. **A importância dos biomateriais e suas aplicações**. 2015. 36 f. TCC (Graduação) — Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2015. Disponível em: <https://bit.ly/3M84UXZ>. Acesso em: 08 fev. 2022.
- BARAUNA, Debora *et al.* Experimentação em Design: biomateriais como uma alternativa para a moda sustentável. In: SIMPÓSIO DE DESIGN SUSTENTÁVEL, 8., 2021, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2021. p. 353-362. Disponível em: <https://bit.ly/3HrgNot>. Acesso em: 07 fev. 2022.
- BITTENCOURT, Leide Laura *et al.* Utilização das ferramentas da Indústria 4.0 para a prototipagem no setor de vestuário. **DAPesquisa**, Florianópolis, v. 16, n. 1, p. 01-25, jul. 2021. Disponível em: <https://bit.ly/3K1jSxQ>. Acesso em: 06 fev. 2022.

CARLOTA, Mariana Casimiro. **A Indústria 4.0 aplicada aos setores da Moda**. 2018. 75 f. Dissertação (Mestrado) — Curso de Engenharia e Gestão Industrial, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3K4gxyj>. Acesso em: 20 nov. 2021.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

MARQUES, Adrienne Fioravante *et al.* Novos materiais têxteis — um estudo sobre moda e sustentabilidade. In: GAMPI PLURAL, 6., 2017, Joinville. **Anais [...]**. Joinville: Univille, 2017. p. 1-12. Disponível em: <https://bit.ly/3mKrytu>. Acesso em: 10 set. 2021.

OLIVEIRA, Carolina Roberte de. **A biotecnologia como ferramenta de inovação para a indústria têxtil e de confecções: estudo de caso SUI**. 2021. 127 f. Dissertação (Mestrado) — Curso de Pós-Graduação em Administração, Universidade de Brasília, Brasília, 2021. Disponível em: <https://bit.ly/35ftPs6>. Acesso em: 09 fev. 2022.

PACHECO-TORGAL, Fernando; JALALI, Said. Materiais biomiméticos: materiais de construção inspirados na natureza. **Arte & Construção**, Portugal, v. 1, n. 1, p. 1-7, mar. 2011. Disponível em: <https://bit.ly/34CwLYX>. Acesso em: 20 jan. 2022.

RENCK, Giovanna Eggers; BARAUNA, Debora. Sustentabilidade na cadeia da moda e o design de biomateriais têxteis. In: ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO, 9., 2021, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021. p. 187-198. Disponível em: <https://bit.ly/3zNnxuH>. Acesso em: 20 nov. 2021.

RIBEIRO, Joaquim Meireles. **O conceito da Indústria 4.0 na Confecção: análise e implementação**. 2017. 99 f. Dissertação (Mestrado) — Curso de Pós-Graduação em Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Minho, 2017. Disponível em: <https://bit.ly/3feniPN>. Acesso em: 03 fev. 2021.

RODRIGUES, Thales Volpe; FERNANDES, Carlos Henrique; SANJULIÃO, Lo-Ruana Karen Amorim Freire. Abordagens conceituais da Indústria 4.0. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 10., 2020, [S.I.]. **Anais [...]**. [S.L.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020. p. 1-11. Disponível em: <https://bit.ly/3JZIUqX>. Acesso em: 21 ago. 2021.

SARAVANAN, Dhandapani. *Spider Silk — Structure, Properties and Spinning*. **Journal of Textile and Apparel, Technology and Management**, Raleigh, v. 5, n. 1, p. 1-20, jan. 2006. Disponível em: <https://bit.ly/3rJ9P9z>. Acesso em: 18 jan. 2022.

SILVA NETO, Irineu Ferreira da; MARQUES, Ana Emília Formiga. Propriedades da seda de aranha no ramo medicinal: uma revisão de literatura. **Educação, Ciência e Saúde**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 268-280, jan./jun. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3gYyIrX>. Acesso em: 07 fev. 2022.

SOARES, Juliana Maria Moreira; CAMPOS, Paulo Eduardo Fonseca de. Tecnologia Assistiva, Impressão 3D e Indústria 4.0. In: CONGRESSO PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN, 13., 2019, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Editora Blucher, 2019. p. 1-15. Disponível em: <https://bit.ly/3eK702d>. Acesso em: 05 fev. 2021.

SUMANASINGHE, Ruwan Deepal; KING, Martin Wilson. *New Trends in Biotextiles — the challenge of tissue engineering*. **Journal of Textile and Apparel, Technology and Management**, Raleigh, v. 3, n. 2, p. 1-13, jul. 2003. Disponível em: <https://bit.ly/3HKgsxT>. Acesso em: 18 jan. 2022.

SWANSON, Brook O. *et al.* *The evolution of complex biomaterial performance: the case of spider silk*. **Integrative and Comparative Biology**, Londres, v. 49, n. 1, p. 21-31, 22 maio 2009. Disponível em: <https://bit.ly/3sBYxmT>. Acesso em: 24 jan. 2022.