

Artigo

Materiais Autolimpantes: Conceitos, Propriedades e Aplicações

Neves, J. C.; Mohallem, N. D. S.; Viana, M. M.*

Rev. Virtual Quim., 2021, 13 (2), no prelo. Data de publicação na Web: 3 de Fevereiro de 2021<http://rvq.s bq.org.br>**Self-Cleaning Materials: Concepts, Properties and Applications**

Abstract: In this work, we briefly discuss the relevance of different materials in the evolution of society, the importance of developing new materials and an approach to self-cleaning materials. The role of biomimicry in developing responses to many technological challenges is discussed, and one of the main self-cleaning mechanisms: the Lotus Effect is presented. After a few examples of natural self-cleaning surfaces, the properties of surface wettability and surface tension are discussed, with the concepts of hydrophilicity and hydrophobicity, as well as the relationship between these two properties and the intermolecular interactions. Finally, some examples of these materials applications are presented, as well as other self-cleaning mechanisms.

Keywords: Self-cleaning surface; Lotus effect; nanotechnology.

Resumo

Nesse trabalho é abordada de forma sucinta a relevância dos mais diversos materiais na evolução da sociedade, a importância de se desenvolver novos materiais e uma abordagem sobre os materiais autolimpantes. Em seguida, é evidenciado o papel do biomimetismo no desenvolvimento de respostas aos diversos desafios tecnológicos, e um dos principais mecanismos autolimpantes é apresentado: o Efeito Lótus. Após apresentar alguns exemplos de superfícies autolimpantes naturais, propriedades de superfície como molhabilidade e tensão superficial são discutidas, apresentando os conceitos de hidrofobicidade e hidrofiliabilidade, bem como a relação entre essas duas propriedades e as interações intermoleculares. Por fim, alguns exemplos de aplicação desses materiais são apresentados, bem como outros mecanismos autolimpantes.

Palavras-chave: Superfície autolimpante; efeito Lótus; nanotecnologia.

* Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Química, Campus Pampulha, CEP 31270-901, Belo Horizonte–MG, Brasil.

 marcelomachado@ufmg.br
DOI: [10.21577/1984-6835.20210003](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20210003)

Materiais Autolimpantes: Conceitos, Propriedades e Aplicações

Juliana C. Neves, Nelcy D. S. Mohallem, Marcelo M. Viana*

Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Química, Campus Pampulha, CEP 31270-901, Belo Horizonte–MG, Brasil.

*marcelomachado@ufmg.br

Recebido em 9 de Novembro de 2020. Aceito para publicação em 13 de Dezembro de 2020.

1. Introdução
2. A Ciência Imitando a Natureza
3. Entendendo Algumas Propriedades de Superfície: Molhabilidade e Tensão Superficial
4. Aplicações
 - 4.1. Monumentos históricos
 - 4.2. Tecidos: do sofá aos ambientes hospitalares
 - 4.3. Módulos fotovoltaicos
5. Considerações Finais

1. Introdução

As grandes conquistas e evoluções da sociedade sempre foram acompanhadas pela busca e desenvolvimento de materiais que atendessem às mais diversas necessidades da civilização humana. O homem pré-histórico utilizava madeira, pedra e materiais de origem animal para garantir sua sobrevivência, e a evolução do ser humano tem sido cronologicamente registrada de acordo com os materiais disponíveis até então. Passamos pela Idade da Pedra, Idade do Bronze, Idade do Ferro, e as grandes mudanças que a sociedade experimentou só foram possíveis graças a disponibilidade de materiais adequados para atender as mais variadas e desafiadoras demandas de cada época.^{1,2}

Nesse contexto, a ciência vem sempre buscando desenvolver novos materiais que permitam a realização de revoluções na ciência e tecnologia, podendo trazer benefícios econômicos e melhorias

em nossa qualidade de vida. Pode-se dizer que estamos na era dos materiais multifuncionais e inteligentes,² e um desses importantes materiais que tem despertado muita atenção nessa última década são os chamados materiais autolimpantes. O conceito de autolimpante é bem amplo, mas materiais com essa característica podem ser entendidos como aqueles capazes de se manterem limpos, mesmo em ambientes passíveis de sujeira. Assim, pela ação de uma fonte externa, como a água da chuva, pela ação do sol ou do vento, sujeiras depositadas sobre esses materiais podem ser facilmente eliminadas, permitindo que esse material se mantenha limpo.

Essa possibilidade tecnológica vem ganhando destaque na comunidade científica nos últimos anos, envolvendo tanto estudos fundamentais de desenvolvimento e caracterização desses materiais, quanto de testes de aplicações que norteiam a produção de produtos comerciais, cada vez mais acessíveis e presentes em nosso cotidiano.

2. A Ciência Imitando a Natureza

Muitas das inovações tecnológicas que conhecemos surgiram a partir da ciência se inspirando na natureza. Um dos principais exemplos desse tipo de inspiração envolve o desenvolvimento do velcro, dispositivo que revolucionou diversos setores da indústria.³ A ideia de sua construção surgiu na década de 1940, pelo engenheiro suíço Georges de Mestral, que se baseou na forma com que as sementes de uma planta, chamada Bardana, se agarravam aos pelos de seu cachorro. Ele observou que essas sementes funcionavam como minúsculos ganchos, que naturalmente se prendiam às pequenas argolas formadas nos pelos ou tecidos. Outro exemplo da ciência se inspirando na natureza está relacionado com o design de aeronaves.³ A análise cuidadosa da aerodinâmica e outros mecanismos que auxiliam no voo de diversos animais tem sido há muito tempo uma ferramenta poderosa para que aviões e helicópteros cada vez mais eficientes e menos poluentes possam ser projetados. Essa observação contínua da natureza pela indústria de aviação foi o que, inclusive, permitiu a confecção do maior avião de passageiros do mundo, o Airbus A380. Até então, não era possível construir uma aeronave desse porte, já que, considerando os projetos convencionais, as dimensões desse avião seriam incompatíveis com os principais aeroportos do mundo. A solução encontrada foi inspirar as asas desse avião nas águias-de-estepe, imitando um mecanismo que esses animais apresentam nas suas penas, especialmente naquelas das extremidades de suas asas.³ Esses são alguns dos exemplos do biomimetismo, uma área da ciência que utiliza a natureza como grande fonte de inspiração, para aprender com ela estratégias e soluções que permitam resolver alguns desafios tecnológicos das mais diversas áreas.

O entendimento de um dos principais mecanismos autolimpantes também envolveu o biomimetismo, a partir de uma avaliação do que ocorre em alguns organismos vivos. A capacidade autolimpante de folhas de algumas plantas foi observada ainda no fim da década de 1970. Contudo, somente em 1997 foi publicado o primeiro estudo científico que investigou de forma sistemática o comportamento autolimpante de diversas espécies de plantas, pelos pesquisadores alemães Neinhuis e Barthlott.⁴ Após avaliar cerca

de 200 espécies diferentes, observou-se que esse comportamento autolimpante era devido a algumas características específicas apresentadas por todas essas superfícies naturais, em termos de sua composição química e geometria. Notou-se que alguns tipos de ceras são excretados nas superfícies das plantas, fazendo com que essas superfícies apresentem um caráter hidrofóbico. Além disso, ao observar a morfologia dessas superfícies com o auxílio de microscópios eletrônicos, percebeu-se que essas eram bastante rugosas, compostas por diversas estruturas de dimensões microscópicas arrançadas como cerdas de uma escova (Figura 1.a). A presença dessas microestruturas compoem a superfície das plantas também fazem com que essas superfícies apresentem caráter hidrofóbico extremo, ou seja, sejam superhidrofóbicas.⁴ Quando uma superfície apresenta um caráter superhidrofóbico, a água que entra em contato com essa superfície é fortemente repelida, resultando na formação de gotas de água com geometria tendendo a de uma esfera. Essas gotas de água esféricas tem a capacidade de rolar facilmente sobre esse tipo de superfície, carregando consigo a sujeira depositada, que apresenta predominantemente uma natureza inorgânica (Figura 1.b). Isso permite que a superfície de uma planta, por exemplo, fique limpa sob ação da chuva, nevoeiro ou orvalho. Esse tipo de mecanismo autolimpante é conhecido como Efeito Lótus, fenômeno que foi observado inicialmente na Flor de Lótus, uma planta aquática nativa da Ásia. Além da beleza de suas flores, essa planta chama a atenção pelo fato de nascer em meio à lama, mas sempre se manter limpa, exatamente por apresentar um caráter hidrofóbico extremo.⁵

E, na natureza, esses comportamentos extremos de molhabilidade não são observados apenas em superfícies de plantas. Quando se investigam as interações entre uma superfície sólida de outros organismos vivos e um líquido depositado sobre ela, esse fenômeno também é observado em alguns animais.⁶ A pele dos tubarões, por exemplo, também apresenta características superhidrofóbicas, tendo sido inclusive fonte de inspiração para o desenvolvimento de trajes esportivos tecnológicos.^{6,7} Assim como algumas plantas, os tubarões apresentam na superfície de suas peles diversas estruturas microscópicas (Figura 2.a), responsáveis pela sua superhidrofobicidade.⁷ Dentro d'água, essas

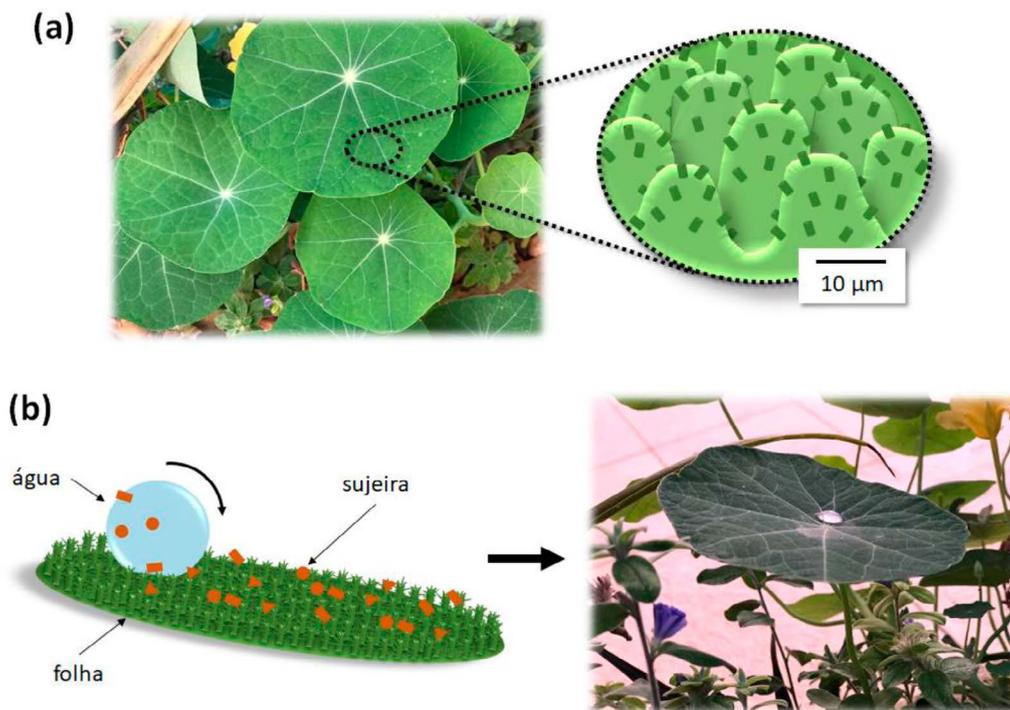


Figura 1. (a) Representação esquemática das estruturas microscópicas que compõem a superfície de uma folha; (b) Representação esquemática do mecanismo autolimpante envolvido no Efeito Lótus

estruturas funcionam como sulcos que permitem reduzir seu atrito na água, fazendo com que a energia gasta no movimento seja minimizada. Outro exemplo de superfícies superhidrofóbicas naturais, que também apresentam tais estruturas microscópicas ordenadas, são as asas de algumas borboletas (Figura 2.b).

3. Entendendo Algumas Propriedades de Superfície: Molhabilidade e Tensão Superficial

O comportamento de uma superfície ao entrar em contato com um líquido está intimamente relacionado com uma importante propriedade de superfícies, a molhabilidade. Essa propriedade

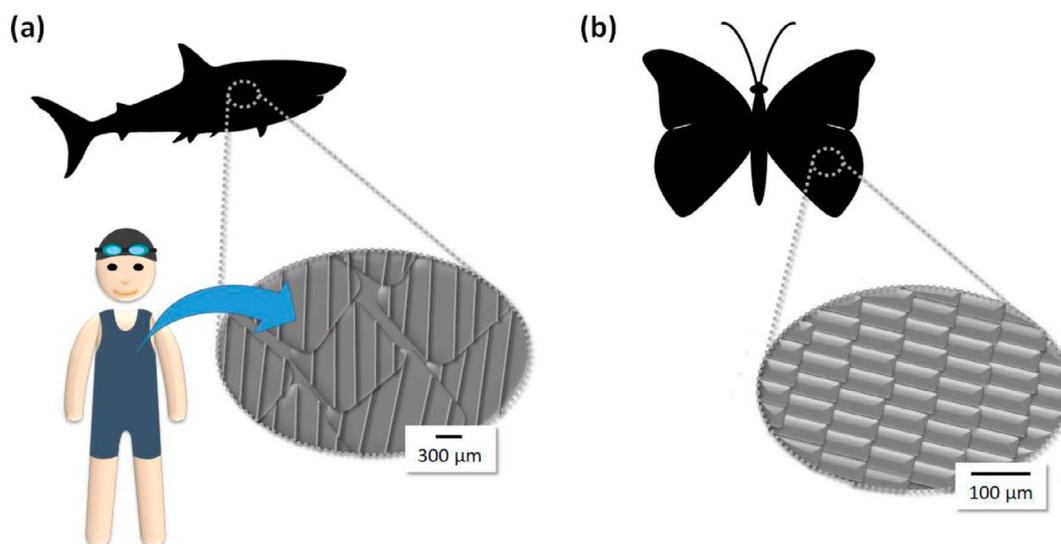


Figura 2. Representação esquemática das estruturas microscópicas que compõem a superfície (a) da pele de tubarões, servindo de inspiração para a produção de maiôs tecnológicos; (b) das asas de borboletas

pode ser entendida como a tendência de um fluido aderir ou espalhar-se sobre uma superfície sólida, e fornece informações relacionadas à intensidade da interação entre uma superfície sólida e o líquido depositado sobre ela. Caso essa interação seja mais intensa, o líquido tende a se espalhar mais sobre a superfície. Do contrário, o líquido é cada vez mais repellido, tendo mínimo contato com a superfície (Figura 3).

Frequentemente, superfícies autolimpantes naturais apresentam um comportamento de molhabilidade extremo, como no caso das superfícies superhidrofóbicas, em que o ângulo de contato entre a gota e a superfície é muito alto, ou no caso das superfícies superhidrofílicas, em que o ângulo de contato entre a gota e a superfície é muito baixo. Os diferentes formatos que a gota apresenta quando esta entra em contato com superfícies distintas está intimamente relacionado com dois importantes fenômenos de superfície: a tensão superficial e a tensão interfacial. Essas são propriedades relacionadas à interface, isto é, a fronteira entre duas fases distintas, quando essas estão em contato físico.

De modo a entender melhor sobre a tensão superficial, considere, por exemplo, a interface da água com o ar, em um copo cheio de água, conforme representado na Figura 4.a. Nesse caso, cada molécula de H_2O é atraída por outra, principalmente devido às ligações de hidrogênio, sendo que essa atração ocorre de formas diferentes no sistema. No interior do líquido, cada molécula de H_2O está inteiramente rodeada por moléculas vizinhas de H_2O , o que faz com que, em todas as direções, cada molécula seja atraída por outra igualmente. Já na superfície do líquido, as moléculas de H_2O se encontram rodeadas por outras moléculas de H_2O apenas ao lado e abaixo. Como consequência, essas moléculas da

superfície (interface líquido-ar) acabam sendo atraídas mais fortemente para o interior do líquido.⁸ Isso faz com que os líquidos sempre busquem minimizar o número de moléculas que compõem sua superfície, se contraindo de forma espontânea, até que adquiram uma área superficial mínima, como uma forma de estabilizar o sistema. Esse é o motivo, por exemplo, pelo qual as gotas de líquidos tendem a ser esféricas, já que, para diferentes sólidos geométricos de um mesmo volume, a esfera é o sólido tridimensional de menor área superficial.⁸

O comportamento da tensão superficial é também o responsável por muitos outros efeitos observados em diversas situações do nosso dia-a-dia. Como os líquidos vão sempre tender a apresentar áreas superficiais mínimas, qualquer processo que implique em aumento dessa área, ou mesmo em um rompimento das interações intermoleculares presentes na superfície, será evitado. É por isso que fenômenos como um clip metálico flutuando sobre a água (Figura 4.b) ou algumas espécies de insetos conseguindo caminhar sobre a superfícies de rios e lagos (Figura 4.c) são possíveis de ocorrer.

A tensão superficial é, portanto, dependente das forças coesivas, isto é, das interações intermoleculares que ocorrem entre as moléculas que compõem um líquido, e sua intensidade está intimamente relacionada com a natureza dessas interações. Caso essas interações intermoleculares sejam mais intensas, maior a estabilização termodinâmica obtida pela contração da superfície e, dessa forma, maior será o valor de tensão superficial. Do contrário, substâncias que apresentem interações moleculares mais fracas, apresentarão valores baixos de tensão superficial, como é o caso de alguns solventes orgânicos. A Figura 5 apresenta alguns valores de tensão

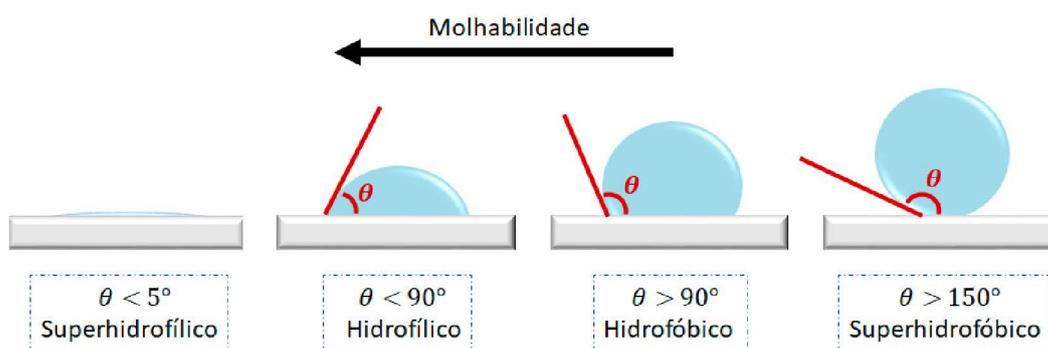


Figura 3. Representação de diferentes condições de molhabilidade de uma superfície por um líquido

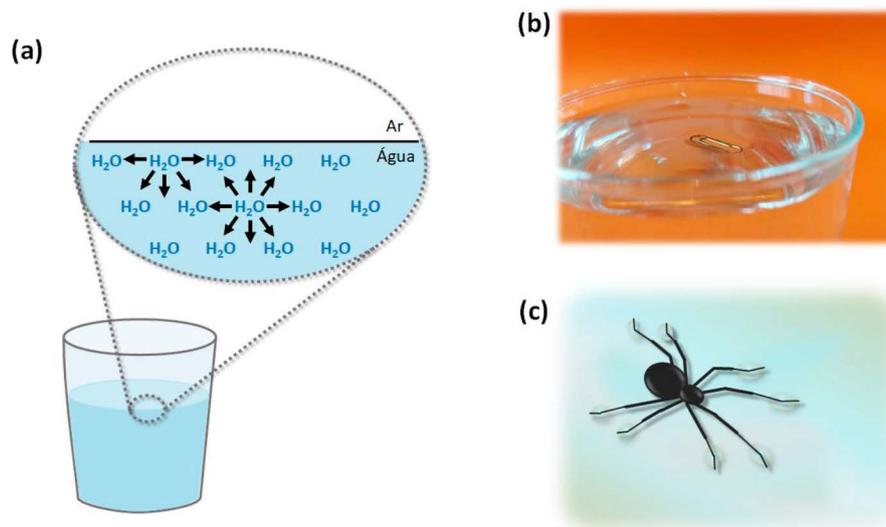


Figura 4. (a) Representação esquemática das forças coesivas atuando em moléculas de água, no interior e na superfície desse líquido; (b) um clip de papel flutuando sobre a água; (c) um inseto caminhando sobre a superfície de um lago, sem afundar

superficial para diferentes líquidos quando em contato com o ar.⁹ O éter etílico, por exemplo, é a substância dentre as listadas com menor valor de tensão superficial, já que apresenta predominantemente interações intermoleculares do tipo dipolo-dipolo, que são comumente interações mais fracas do que a ligação de hidrogênio. A água, por sua vez, apresenta alto valor de tensão superficial para os líquidos em

geral, já que suas moléculas interagem entre si por fortes interações intermoleculares, as ligações de hidrogênio. Já o mercúrio é o líquido com mais alta tensão superficial, já que os átomos que o compõe interagem por meio de ligações metálicas.

Nota-se, portanto, que a tensão superficial está relacionada com as forças coesivas, isto é, com as interações intermoleculares presentes num líquido. Contudo, é necessário investigar também

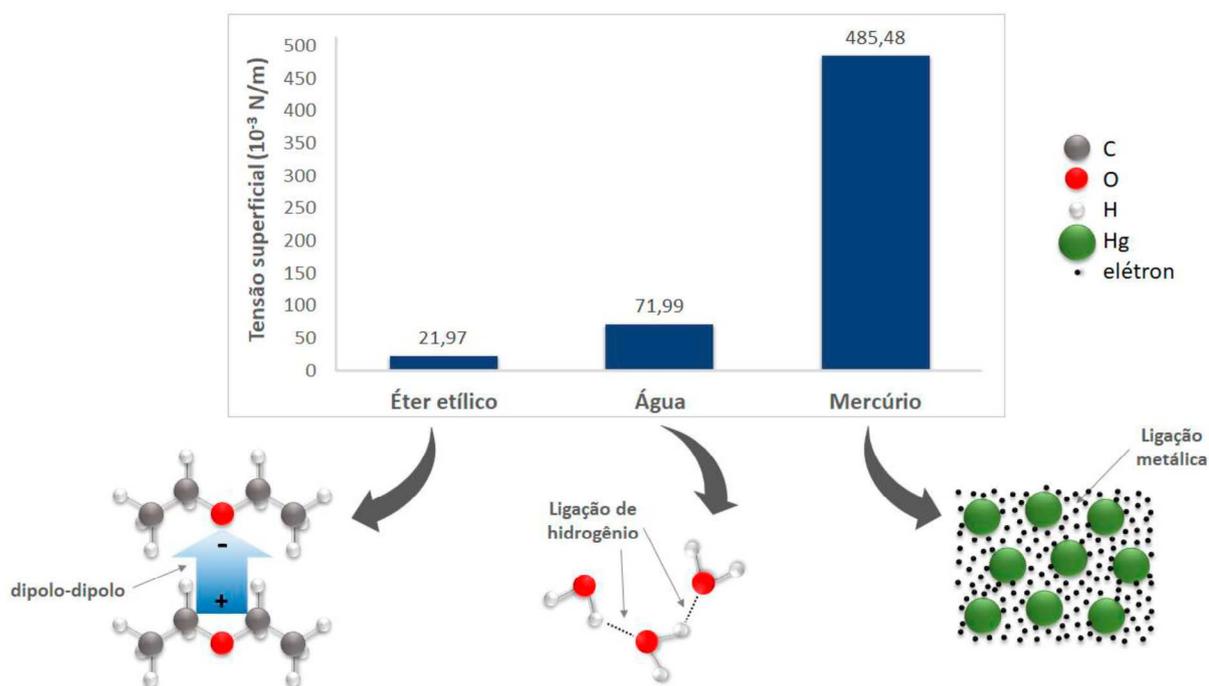


Figura 5. Valores de tensão superficial para diferentes substâncias, a 25°C, em contato com o ar⁹

as interações entre líquidos e a superfície de um sólido, interações essas que estão intimamente relacionadas à tensão interfacial. Quando um líquido está em contato direto com um sólido, as interações envolvidas entre essas duas fases estão relacionadas com as chamadas forças de adesão. Enquanto nas forças de coesão estão envolvidas as interações intermoleculares apenas entre as moléculas que compõem o líquido, as forças de adesão envolvem as interações intermoleculares entre as moléculas do líquido e aquelas que compõem a superfície sólida (Figura 6). E os diferentes formatos da gota de um líquido serão determinados pelo balanço entre as forças de adesão e coesão, quando esse líquido entra em contato com superfícies distintas. Caso as forças coesivas sejam mais intensas do que as adesivas, menor será a molhabilidade dessa superfície sólida pelo líquido, o que significa que a gota tenderá a um formato cada vez mais esférico. Já no caso de as forças adesivas serem mais intensas do que as coesivas, a gota tende a se espalhar mais sobre a superfície.

Conforme foi abordado até aqui, materiais que apresentam um comportamento superhidrofóbico possuem capacidade autolimpante para alguns tipos de sujeira, devido a um importante mecanismo: o Efeito Lótus. Porém, é importante ressaltar que, apesar de toda a sua importância, superfícies com propriedades superhidrofóbicas não são as únicas superfícies a apresentar esse comportamento de autolimpeza. Os materiais superhidrofílicos, aquelas superfícies que possuem capacidade de serem molhadas completamente pela água, também podem apresentar esse comportamento autolimpante. Isso porque quando a água entra

em contato com uma superfície superhidrofílica, ela se espalha na superfície, levando à formação de uma película contínua, que também tem a capacidade de carregar facilmente consigo alguns tipos de sujeira depositada. Portanto, tanto os materiais superhidrofílicos quanto os materiais superhidrofóbicos podem apresentar atividade autolimpante. Além disso, a autolimpeza de uma superfície não é governada exclusivamente pela sua molhabilidade. Existem outros mecanismos que permitem a autolimpeza, e cada tipo de mecanismo será mais eficiente na remoção de um determinado tipo de sujeira predominante e, portanto, mais adequado a uma dada aplicação.

4. Aplicações

O biomimetismo permitiu o entendimento de um dos principais mecanismos autolimpantes de materiais e, a partir disso, outros mecanismos também puderam ser identificados e desenvolvidos, o que viabilizou inclusive a produção de materiais autolimpantes comerciais. Inspirado nas superfícies autolimpantes naturais, muitos recobrimentos autolimpantes artificiais puderam ser desenvolvidos para serem depositados em superfícies diversas, como em vidros, tecidos, blocos de construção, na produção de tintas especiais, entre outras aplicações.¹⁰ E as vantagens da utilização dos materiais autolimpantes em nosso dia-a-dia são muito mais amplas do que apenas minimizar os esforços na higienização dessas superfícies. A vantagem mais óbvia é que os materiais autolimpantes comerciais permitem a redução do

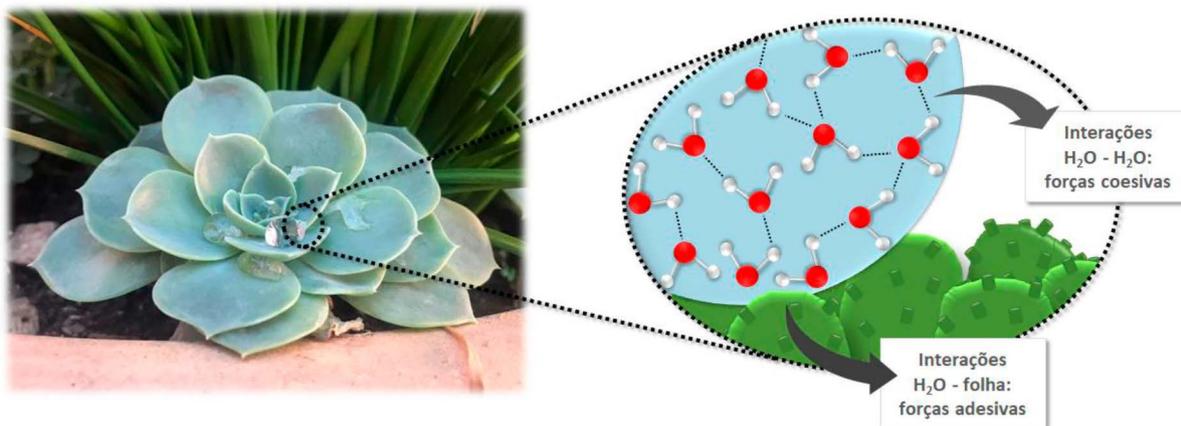


Figura 6. Representação esquemática das forças adesivas e coesivas em uma gota depositada sobre a superfície de uma planta, em que as forças coesivas são mais intensas do que as adesivas

custo de manutenção dessas superfícies, já que a frequência de limpeza dessas será muito menor. Além disso, os materiais autolimpantes também podem permitir o aumento da durabilidade dessas superfícies, agindo como uma barreira de proteção contra danos e processos de corrosão, além de poderem evitar a adesão de gelo ou neve, bem como permitir uma proteção contra poluição ambiental.¹⁰ Assim, muitos estudos vêm sendo realizados no desenvolvimento de novos materiais que apresentem uma capacidade autolimpante, e que também possuam características químicas e estruturais que sejam adequadas para cada um dos mais diversos tipos de aplicação.^{10,11}

4.1. Monumentos históricos

Um exemplo de aplicação dos materiais autolimpantes é na proteção e conservação de algumas obras de arte, especialmente de esculturas de pedra, como aquelas feitas de mármore ou pedra-sabão. Esses monumentos, frequentemente vistos expostos ao ambiente, podem sofrer sérios processos de deterioração, enfrentando perdas na sua integridade estrutural ao longo do tempo (Figura 7), principalmente em cidades com altos índices de poluição atmosférica. A degradação de monumentos históricos pode ocorrer tanto por um desgaste físico, devido à pequenas quebras ou arranhões; por processos biológicos, por meio da produção de ácidos fortes por alguns microrganismos; e também por processos químicos, como o fenômeno da chuva ácida.¹² A chuva ácida é um processo que ocorre devido à poluição atmosférica, em que a água da chuva reage com gases poluentes, como os óxidos

de nitrogênio e de enxofre, levando à formação de ácidos fortes. Esses ácidos fortes, como o ácido nítrico e ácido sulfúrico, ao entrar em contato com o mármore ou a pedra-sabão, levam à degradação dos monumentos.¹³

A fim de evitar os processos de degradação, além de buscar diminuir a emissão de gases poluentes na atmosfera, pode-se aplicar a essa superfície alguns tipos de materiais autolimpantes, para evitar que a deterioração de monumentos históricos aconteça. Esses materiais geralmente são recobrimentos constituídos de alguns tipos específicos de polímeros, como o polidimetilsiloxano (PDMS), que pertence à classe dos polímeros conhecidos como silicones, e o politetrafluoretileno (PTFE), conhecido comercialmente como Teflon®.¹⁴ Por causa de suas estruturas químicas, esses polímeros apresentam propriedades que permitem que as forças coesivas numa gota d'água sejam muito mais intensas do que as forças adesivas desses materiais com a gota. Desse modo, esses materiais vão apresentar uma superfície com comportamento hidrofóbico. E devido aos avanços da nanotecnologia, esses recobrimentos são confeccionados de modo que sua superfície apresente rugosidades nanométricas, de forma análoga ao que é observado na Flor de Lótus. Assim, ao serem depositados sobre os monumentos, esses materiais autolimpantes levam à formação de finas películas, geralmente transparentes, e com um comportamento superhidrofóbico. Como resultado, além de permitir que as obras de arte se mantenham limpas de sujeira de natureza inorgânica, esses recobrimentos depositados conferem uma



Figura 7. Estátua em pedra-sabão, componente do maior conjunto de esculturas barrocas do mundo, localizada em Congonhas – MG. Esculpida por Antônio Francisco Lisboa, o Aleijadinho, a obra “Os Doze Profetas” vem sofrendo processos de degradação

proteção a essas peças, impedindo que a água da chuva penetre nos poros das esculturas. Desse modo, pode-se evitar tanto a biodegradação, a degradação física, bem como a degradação por chuva ácida.¹⁴

4.2. Tecidos: do sofá aos ambientes hospitalares

Pode-se também citar como exemplo a aplicação dos materiais autolimpantes nos mais diversos tipos de tecidos. Seja para evitar manchas num sofá, para a produção de maiôs tecnológicos para atletas de alta performance ou para eliminar perigosas bactérias dos lençóis de um leito de hospital, diferentes tecidos podem ser modificados para se comportarem como autolimpantes. No caso dos sofás ditos impermeáveis (Figura 8), os tecidos são frequentemente recobertos com materiais a base de siloxanos ou de compostos organofluorados. Os siloxanos são compostos orgânicos contendo ligações Si-O-Si em sua estrutura, como ocorre nos silicones, enquanto que os compostos organofluorados são aqueles que possuem várias ligações C-F em sua estrutura, como ocorre nas moléculas do Teflon®. Esses compostos possuem estruturas químicas cujas ligações altamente polarizadas C-F e Si-O estão ordenadas nas moléculas de tal forma que as interações intermoleculares com outros materiais é muito fraca. Essa propriedade, combinada com a formação de rugosidades nanométricas, confere a essas superfícies um comportamento superhidrofóbico e, portanto, autolimpante. Essa tecnologia é também utilizada na confecção de tecidos mais modernos para capas de chuvas e roupas para a neve, vestuários de grande

utilidade em cidades muito chuvosas e frias. Por serem feitas de tecidos superhidrofóbicos, essas roupas são muito mais adequadas para serem usadas em ambientes com temperaturas negativas, pois não congelam caso molhem.¹⁵

Os tecidos autolimpantes também podem ser muito adequados em ambientes hospitalares, considerando que a sujidade comum nesses espaços envolve tanto fluidos corporais quanto microrganismos. No Brasil, o Ministério da Saúde estima que cerca de 15% das pessoas internadas são acometidas por infecções hospitalares,¹⁶ e o uso de tecidos bactericidas pode ser uma ferramenta importante na prevenção desse problema. Por isso, muitas pesquisas sobre tecidos autolimpantes têm sido desenvolvidas para essa aplicação.¹⁷ Para conferir essa propriedade bactericida ao tecido, uma estratégia comumente estudada é a inserção de nanopartículas de prata ou cobre a esses materiais, que são capazes de destruir microrganismos nocivos à saúde. Essa estratégia de incorporação de nanopartículas metálicas pode ser utilizada tanto em um tecido convencional como em um tecido já modificado para apresentar comportamento superhidrofóbico, que é eficiente para sujeira de natureza inorgânica.¹⁸

4.3. Módulos fotovoltaicos

Um outro exemplo importante da aplicação de materiais autolimpantes é na superfície de módulos fotovoltaicos, popularmente conhecidos como placas solares. A limpeza de módulos fotovoltaicos é uma questão que pode influenciar a eficiência desse equipamento de forma dramática e, portanto, deve ser monitorada

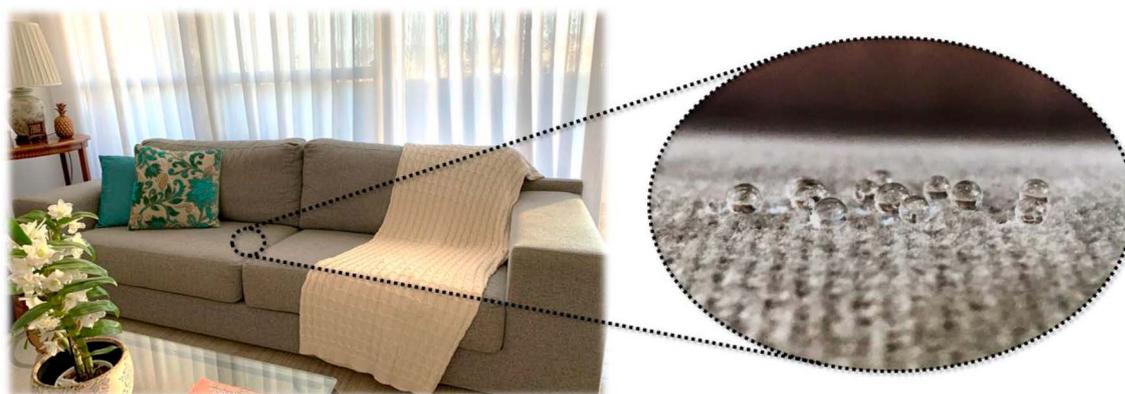


Figura 8. Tecido de sofá com comportamento superhidrofóbico

frequentemente.¹⁹ Isso porque os módulos fotovoltaicos utilizam a luz do sol para a geração de energia elétrica, e a eficiência dessa geração de energia está relacionada, entre outras coisas, à quantidade de luz solar que incide sobre as camadas ativas do equipamento. A presença da sujeira na superfície impede que parte dessa luz solar incidente atinja de fato as camadas ativas do equipamento, podendo levar a diminuições de cerca de 30% (ou até mais) na eficiência de geração de energia elétrica por esse processo.¹⁹ Desse modo, os materiais autolimpantes podem ser muito úteis na resolução desse problema, e os materiais que geralmente são utilizados para essa finalidade são recobrimentos baseados em dióxido de titânio (TiO₂).²⁰

O TiO₂ é um material semicondutor muito utilizado em diversos setores na indústria como o principal pigmento industrial branco. E quando utilizado em aplicações mais tecnológicas, pode apresentar interessante atividade autolimpante, relacionada ao seu comportamento superhidrofílico e capacidade fotocatalítica.²¹ Conforme já mencionado, não são só os mecanismos que envolvem comportamento extremos de molhabilidade, como superhidrofobicidade ou superhidrofilicidade, que vão conferir capacidade autolimpante a um material. Um outro mecanismo que pode ser relacionado com a atividade autolimpante de superfícies é a fotocatalise.²² Esse é um fenômeno que permite a formação de algumas espécies radiculares, quando a superfície de um material semicondutor é irradiada com radiação eletromagnética de energia adequada.²³ Essas espécies radiculares formadas são conhecidas por apresentarem a capacidade de degradar sujeiras compostas por moléculas orgânicas, como por exemplo gorduras e hidrocarbonetos, conferindo

uma atividade autolimpante para a superfície referente a esse tipo de sujeira. Desse modo, o TiO₂ apresenta atividade autolimpante por dois mecanismos conjuntamente, conforme mostrado na figura 9: por meio da superhidrofilicidade, que é muito eficiente na remoção de sujeiras de natureza inorgânica, como poeira e areia; e por meio da fotocatalise, utilizando a radiação eletromagnética oriunda da luz solar para a geração de radicais com a capacidade de degradar compostos orgânicos.²⁴ A combinação de mecanismos é o que torna esse material tão importante como um material autolimpante.

5. Considerações Finais

Os materiais autolimpantes são de notável relevância na sociedade, nas mais diversas aplicações, e materiais autolimpantes comerciais estão cada vez mais disponíveis. A aplicação desses materiais com características de autolimpeza nas mais diversas áreas só vem sendo possível com o desenvolvimento de diferentes recobrimentos autolimpantes. Assim, tem-se visado elaborar estratégias tanto que tragam melhorias ao cotidiano das pessoas, quanto que sejam soluções para grandes questões do mundo moderno. Seja para evitar a limpeza de extensas fachadas de vidro ou desenvolver um tecido que minimize a infecção hospitalar em um momento de pandemia, por exemplo, muitas dessas respostas para problemas tecnológicos puderam ser alcançadas a partir da observação do que ocorre na natureza. E além dessas observações, que muitas vezes são como fontes de inspiração para o desenvolvimento de mecanismos relevantes, a nanotecnologia tem se mostrado ferramenta de extrema importância na produção de novos materiais.

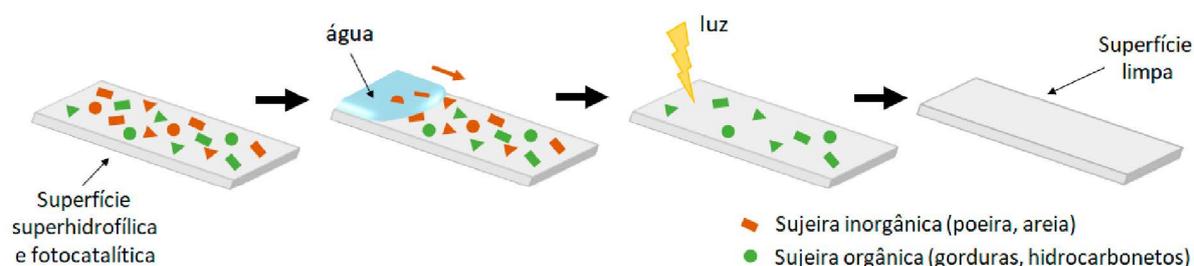


Figura 9. Representação esquemática da ação dos mecanismos autolimpantes que ocorrem em uma superfície superhidrofílica e fotocatalítica

Agradecimentos

Os autores agradecem às agências de fomento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - Código de Financiamento 001) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Referências bibliográficas

- ¹ Callister Jr., W. D.; *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*, 8a. ed., LTC: Rio de Janeiro, 2012.
- ² Ferreira, A. D. B. L.; Novoa, P. R. O.; Marques, A. T. Multifunctional material systems: a state-of-the-art review. *Composite Structures* **2016**, *151*, 3. [CrossRef]
- ³ Taboada, R. E.; Favret, E. A.; Adrián, M. Biomimetismo: Imitando a la madre naturaleza. *Revista Argentina de Ingenieria* **2014**, *4*, 73. [Link]
- ⁴ Neinhuis, C.; Barthlott, W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces. *Annals of botany* **1997**, *79*, 667. [CrossRef]
- ⁵ Zang, D.; Xun, X.; Gu, Z.; Dong, J.; Pan, T.; Liu, M. Fabrication of superhydrophobic self-cleaning manganese dioxide coatings on Mg alloys inspired by lotus flower. *Ceramics International* **2020**, *46*, 20328. [CrossRef]
- ⁶ Haque, M. Nano Fabrics in the 21st century: a review. *Asian Journal of Nanosciences and Materials* **2019**, *2*, 131. [CrossRef]
- ⁷ Su, B.; Tian, Y.; Jiang, L. Bioinspired interfaces with superwettability: from materials to chemistry. *Journal of the American Chemical Society* **2016**, *138*, 1727. [CrossRef]
- ⁸ Gugliotti, M. A. Química do Corpo Humano: Tensão Superficial nos Pulmões. *Química Nova na Escola* **2002**, *16*, 3. [Link]
- ⁹ Lide, D. R.; *Handbook of Chemistry and Physics*, 84a. ed., CRC Press: Boca Raton, 2004.
- ¹⁰ Latthe, S. S.; Sutar, R. S.; Kodag, V. S.; Bhosale, A. K.; Kumar, A. M.; Sadasivuni, K. K.; Xing, R.; Liu, S. Self-cleaning superhydrophobic coatings: Potential industrial applications. *Progress in Organic Coatings* **2019**, *128*, 52. [CrossRef]
- ¹¹ Dalawai, S. P.; Aly, M. A. S.; Latthe, S. S.; Xing, R.; Sutar, R. S.; Nagappan, S.; Ha, C. S.; Sadasivuni, K. K.; Liu, S. Recent advances in durability of superhydrophobic self-cleaning technology: a critical review. *Progress in Organic Coatings* **2020**, *138*, 105381. [CrossRef]
- ¹² La Russa, M. F.; Rovella, N.; de Buergo, M. A.; Belfiore, C. M.; Pezzino, A.; Crisci, G. M.; Ruffolo, S. A. Nano-TiO₂ coatings for cultural heritage protection: The role of the binder on hydrophobic and self-cleaning efficacy. *Progress in Organic Coatings* **2016**, *91*, 1. [CrossRef]
- ¹³ Maia, D. J.; Gazotti, W. A.; Canela, A. C.; Siqueira, A. E. Chuva ácida: um experimento para introduzir conceitos de equilíbrio químico e acidez no ensino médio. *Química Nova na Escola* **2005**, *21*, 44. [Link]
- ¹⁴ Hosseini M.; Karapanagiotis I.; *Advanced Materials for the Conservation of Stone*, Springer: Cham, 2018.
- ¹⁵ Liu, Y.; Song, D.; Choi, C. H. Anti-and de-icing behaviors of superhydrophobic fabrics. *Coatings* **2018**, *8*, 198. [CrossRef]
- ¹⁶ De Sousa, A. F. L.; De Oliveira, L. B.; Moura, M. E. B. Perfil epidemiológico das infecções hospitalares causadas por procedimentos invasivos em unidade de terapia intensiva. *Revista Prevenção de Infecção e Saúde* **2016**, *2*, 11. [CrossRef]
- ¹⁷ Saad, S. R.; Mahmed, N.; Abdullah, M. M. A. B.; Sandu, A. V. Self-cleaning technology in fabric: A review. *IOP conference series: materials science and engineering* **2016**, *133*, 1. [CrossRef]
- ¹⁸ Ghasemi, N.; Seyfi, J.; Asadollahzadeh, M. J. Imparting superhydrophobic and antibacterial properties onto the cotton fabrics: synergistic effect of zinc oxide nanoparticles and octadecanethiol. *Cellulose* **2018**, *25*, 4211. [CrossRef]
- ¹⁹ Arabatzis, I.; Todorova, N.; Fasaki, I.; Tsesmeli, C.; Peppas, A.; Li, W. X.; Zhao, Z. Photocatalytic, self-cleaning, antireflective coating for photovoltaic panels: Characterization and monitoring in real conditions. *Solar Energy* **2018**, *159*, 251. [CrossRef]
- ²⁰ Rajendran, S.; Naushad, M.; Raju, K.; Boukherroub, R.; *Emerging nanostructured materials for energy and environmental science*, Berlin: Springer, 2019. [CrossRef]
- ²¹ Liu, K.; Cao, M.; Fujishima, A.; Jiang, L. Bio-inspired titanium dioxide materials with special wettability and their applications. *Chemical Reviews* **2014**, *114*, 10044. [CrossRef]
- ²² Banerjee, S.; Dionysiou, D. D.; Pillai, S. C. Self-cleaning applications of TiO₂ by photo-induced hydrophilicity and photocatalysis. *Applied Catalysis B: Environmental* **2015**, *176*, 396. [CrossRef]
- ²³ Fujishima, A.; Rao, T. N.; Tryk, D. A. Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of photochemistry and photobiology C: Photochemistry reviews* **2000**, *1*, 1. [CrossRef]
- ²⁴ Neves, J. C.; Mohallem, N. D.; Viana, M. M. Polydimethylsiloxanes-modified TiO₂ coatings: The role of structural, morphological and optical characteristics in a self-cleaning surface. *Ceramics International* **2020**, *46*, 11606. [CrossRef]