

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS BELLO CHEQUIN

**MATERIAIS BIOMIMÉTICOS E ESTUDO DA SUPERHIDROFOBIA E
CARACTERÍSTICAS AUTOLIMPANTES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA
2017

MATHEUS BELLO CHEQUIN

**MATERIAIS BIOMIMÉTICOS E ESTUDO DA SUPERHIDROFOBIA E
CARACTERÍSTICAS AUTOLIMPANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Prof^a. Sandra Mara Kaminski
Tramontin

Co-orientador: Prof^o. Dr. Laercio Javarez
Junior

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

MATERIAIS BIOMIMÉTICOS E ESTUDO DA SUPERHIDROFOBIA E CARACTERÍSTICAS AUTOLIMPANTES

por

MATHEUS BELLO CHEQUIN

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 22 de maio de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Orientadora

Prof. Dr. Oscar Regis Júnior
Membro Titular

Profa. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minhas irmãs que sempre foram minha fonte de inspiração e exemplos que seguirei por toda a vida.

A minha orientadora Prof. Sandra, pelos ensinamentos, amizade, paciência, profissionalismo e pelo seu lado humano e compreensivo.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Laércio, pelos ensinamentos, sugestões e competência que demonstrou durante esses anos da minha graduação.

A minha universidade, funcionários e corpo docente, pelo auxílio e por toda a aprendizagem, sempre serei muito grato.

Aos meus amigos Renato, Juliana, Camila, Guilherme, Danilo, Diego e Fabrício pela amizade verdadeira, incentivo e apoio.

A toda minha família, pelo estímulo e suporte que me deram, principalmente durante essa etapa de minha vida.

E a todos que de alguma forma fizeram parte da minha graduação e sempre torceram por mim e me ajudaram nesses anos de estudos.

RESUMO

A natureza, desde muitos anos atrás, seleciona os mais aptos a sobreviverem em circunstâncias ambientais intensas e, por isso muitas superfícies biológicas desenvolveram funcionalidades eficientes como estratégia para sobrevivência. A superhidrofobia e autolimpeza são uma delas e recentemente são muito estudadas no campo da nanotecnologia para o desenvolvimento de produtos comerciais. Este trabalho mostra uma visão geral das superfícies biológicas superhidrofóbicas e autolimpantes e uma análise dos materiais biomiméticos em desenvolvimento ou que já estão disponíveis no mercado com essas propriedades. Como resultado, é mostrado o quão influente é o design da textura superficial do material, o qual origina uma rugosidade específica para cada tipo de característica desejada.

Palavras-chave: Superhidrofobia. Autolimpeza. Nanotecnologia. Materiais Biomiméticos. Rugosidade.

ABSTRACT

The nature, since many years ago, selects the most able to survive in intense environmental conditions and therefore many biological surfaces developed efficient features as a strategy for survival. The super-hydrophobicity and self-cleaning are one of them and are very recently studied in the field of nanotechnology for the development of commercial products. This work shows an overview of the super hydrophobic and self-cleaning biological surfaces and an analysis of biomimetic materials in development or already commercially available on the market with these properties. As a result, it is shown how influential is the design of the surface texture of the material, which results in a specific roughness for each type of feature desired.

Keywords: Super-hydrophobicity. Self-cleaning. Nanotechnology. Biomimetic Materials. Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Representação de uma folha que apresenta hidrofobia, <i>Regnellidium diphyllum</i> . (b) Folhas de <i>Brassica oleracea</i> representando folhas com superfícies superhidrofóbicas. (c) Superfície hidrofílica de uma folha de <i>Alocasia odora</i> e (d) Folha de <i>Ruellia devosiana</i> superhidrofílica.....	13
Figura 2 - Modelo de Young.....	14
Figura 3 - Modelo Wenzel	14
Figura 4 - Modelo Cassie	15
Figura 5 - Folha de lótus, <i>Nelumbo nucifera</i>	16
Figura 6 - (i) Imagem microscópica da superfície da folha da <i>Nelumbo nucifera</i> ; (ii) micropapila; (iii) cristais de cera epicuticular sobre a superfície.....	17
Figura 7 - Folha de arroz com a direção das papilas indicada	17
Figura 8 - Nano e microestruturas presentes na asa da (a) borboleta <i>Morpho aega</i> . RO = radial outward (direção radial para fora da superfície).....	18
Figura 9 - (a) Borboleta <i>Morpho aega</i> com o sentido da sua adesão direcional indicada. (b) As gotas deslizam facilmente na direção de RO e (c) na direção contrária elas não apresentam nenhum movimento.....	19
Figura 10 - Asa da cigarra	20
Figura 11 - Mecanismo de autolimpeza ilustrado. (a) Superfície qualquer com impurezas e (b) superfície superhidrofóbica com impurezas	21
Figura 12 - Estrutura da pele do tubarão de Galápagos (<i>Carcharhinus galapagensis</i>) em um microscópio eletrônico.....	22
Figura 13 - Imagens do MEV da superfície da folha de lótus. Micropapila de 5-9 micrômetros de diâmetro e cera epicuticular presente em toda superfície	24
Figura 14 - Micro e nanopilares que formam a estrutura da superfície da folha de lótus.....	24
Figura 15 - Imagens do MEV das estruturas responsáveis pela superhidrofobia na folha de arroz	25
Figura 16 - Seta indicando a direção da papila na folha de arroz	26
Figura 17 - Comparação do comportamento da superfície da pétala de rosa (vermelha) com a da folha de lótus (verde).....	27
Figura 18 - Imagem do MEV de uma papila com as dobras cuticulares	27

Figura 19 - Mapa da altura dos nanopilares da asa da cigarra	28
Figura 20 - Imagem do MEV da micro e nanoestrutura da superfície da asa da borboleta <i>Morpho aega</i>	29
Figura 21 - Imagem direita mostra a vista oblíqua da superfície da escama e a esquerda mostra a escama com um corte transversal.....	29
Figura 22 - Terminações das setas da lagartixa do tipo <i>Gekko gecko</i>	30
Figura 23 - (a) Imagem da Lagartixa vista de cima e de baixo; (b) pata da lagartixa; (c) imagem de um dedo da pata; (d) seta; (e) espátula.....	31
Figura 24 - (a) olho do mosquito; (b) microesferas; (c) duas microesferas próximas; (d) nanoestrutura de cada microesfera	32
Figura 25 - Fino filme superhidrofóbico na superfície do vidro	33
Figura 26 - Nanoestrutura da superfície do vidro	34
Figura 27 - Aplicações do nano filme	34
Figura 28 - Carro Nissan com o lado direito aplicado a tinta superhidrofóbica	35
Figura 29 - Superfície com o Ultra-Ever-Dry aplicado com o líquido sendo repellido	36
Figura 30 - Comparação do uso de luvas com e sem o Ultra-Ever-Dry aplicado	36
Figura 31 - Comparação de um prédio sem a Lotusan aplicada (esquerda) e com a Lotusan (direita)	37
Figura 32 - Vista de um microscópio eletrônico. Direita é a imagem da superfície da Lotusan e à esquerda é a da folha de lótus	38
Figura 33 - Ação da água da chuva na parede	38
Figura 34 - Borboleta <i>Morpho</i> e suas estruturas	39
Figura 35 - Buracos que prendem a luz e refletem o azul típico da <i>Morpho aega</i> (à esquerda). Esquema da reflexão da luz que ocorre na asa da borboleta (à direita) .	39
Figura 36 - Desenhos em uma placa de plástico (à esquerda) e imagem dos nano furos em cada um deles (à direita).....	40
Figura 37 - Tecidos com a tecnologia NanoSphere	41
Figura 38 - Fluxograma das características das superfícies superhidrofóbicas estudadas.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipo das superfícies relacionadas com o ângulo de contato que possuem	12
Tabela 2 - Características de plantas superhidrofóbicas.....	42
Tabela 3 - Características de animais com superhidrofobia.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	10
1.1.1 Objetivo geral	10
1.1.2 Objetivos específicos.....	10
1.2 JUSTIFICATIVA	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 CONCEITO DE SUPERHIDROFOBIA	12
2.1.1 Modelos.....	13
2.2 NANÔMETRO	15
2.3 A REPELÊNCIA À ÁGUA NA NATUREZA.....	16
2.4 SUPERFÍCIES AUTOLIMPANTES NA NATUREZA	20
3 METODOLOGIA	23
3.1 SUPERHIDROFOBIA EM PLANTAS E ANIMAIS	23
3.1.1 Folha de Lótus.....	23
3.1.2 Folha de Arroz.....	25
3.1.3 Pétala de Rosa.....	26
3.1.4 Asa da Cigarra	28
3.1.5 Asa da Borboleta.....	28
3.1.6 Pata da Lagartixa	30
3.1.7 Olho do Mosquito	31
3.2 BIOMIMÉTICA NA INDÚSTRIA	32
3.2.1 Vidro Superhidrofóbico.....	33
3.2.2 Carro Autolimpante	35
3.2.3 Ultra-Ever-Dry	35
3.2.4 Lotusan.....	37
3.2.5 Materiais com Iridescência	38
3.2.6 NanoSphere	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5 CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

Com o objetivo de garantir a sobrevivência no meio em que vivem, muitos seres vivos, como animais e plantas, desenvolveram estratégias químicas e físicas para se adaptarem ao ambiente em que suas superfícies estão em contato. A combinação da textura, estrutura, composição e tipo de material, mostram características que despertam o interesse de indústrias, as quais estudam métodos de reproduzi-las para algum tipo de aplicação útil aos humanos. A essa imitação da natureza dá-se o nome de materiais Biomiméticos, que nada mais são materiais que usam a natureza como inspiração para a criação de inovações (MALSHE et al., 2013).

A prova de que a natureza é uma engenharia perfeita pode ser constatada nos artifícios que ela desenvolveu e aprimorou para dar origem às superfícies multifuncionais de alta eficiência; as quais tem como objetivo de se adaptarem às condições do sistema em que ela vive. Essas soluções eficazes super-adesivas, hidrofóbicas, propriedades antirreflexo, autolimpante, mudança de cor e outros exemplos, têm inspirado muitos engenheiros nos seus projetos (BHUSHAN, 2009).

Dentre as superfícies que chamam muito a atenção de cientistas, estão aquelas que apresentam características superhidrofóbicas e autolimpantes, as quais podem vir combinadas ou não. Atualmente existem produtos sendo comercializados com esses tipos de funcionalidades, como telas de dispositivos eletrônicos, pinturas de paredes externas, revestimentos para carros, entre outros. Esses produtos detêm um certo design em nanoescala que remetem às superfícies encontradas em animais e plantas com o mesmo tipo de característica.

Este trabalho analisa os materiais que são baseados no design das superfícies superhidrofóbicas e autolimpantes da natureza, começando por uma descrição da teoria, depois uma análise profunda de cada tipo de superfície mais estudada, uma descrição dos produtos que são desenvolvidos para fins comerciais, e por fim, descreve a relação entre as superfícies da natureza e esses materiais industrializados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Mostrar a importância da nanotecnologia para a construção de materiais biomiméticos, discutir de onde se retira as respostas para o desenvolvimento de produtos superhidrofóbicos e, revelar o quão influente é a rugosidade superficial para se alcançar esse tipo de característica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar as micros e nano estruturas das superfícies superhidrofóbicas encontradas na natureza mais estudadas recentemente por engenheiros e cientistas.
- Comparar o design das texturas superficiais de animais e plantas superhidrofóbicas com os produtos e tecnologias comercializadas ou em fase de desenvolvimento.

1.2 JUSTIFICATIVA

Estão sendo realizadas diversas pesquisas e análises para se alcançar réplicas com um desempenho superhidrofóbico melhor ou igual às características das superfícies biológicas inteligentes existentes na natureza. A superhidrofobia é um dos assuntos mais tratados em muitos artigos de nanotecnologia e que vêm

sendo bastante discutida para a fabricação de novos produtos que facilitam a vida do homem e trazem melhorias tecnológicas na indústria automobilística, militar, têxtil e de eletrônicos, por exemplo.

A justificativa deste trabalho está ligada ao estudo de novas tecnologias para se atingir um ângulo de contato entre a água e a superfície cada vez menor, do aprofundamento na área da nanotecnologia com a finalidade de apresentar os tipos de superfícies superhidrofóbicas e autolimpantes encontradas na natureza e qual o design das estruturas superficiais e a influência delas no projeto de um produto comercial.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONCEITO DE SUPERHIDROFOBIA

Quando se diz que uma superfície é superhidrofóbica significa que ela é totalmente repelente à água. O grau de superhidrofobicidade de um material é determinado pelo ângulo de contato.

O ângulo de contato do líquido sobre o sólido é determinado pela tensão superficial do líquido, a energia superficial do sólido, e a interação entre eles (PETERS et al., 2009). O goniômetro é o instrumento utilizado para medir a angulação da gota d'água sobre uma superfície sólida. Quando esse ângulo estático é próximo de 0° grau, dá-se o nome de superfície superhidrofílica. Se o ângulo apresentado for menor que 90° graus, a superfície sólida é considerada hidrofílica, indicando que ela é favorável à molhabilidade. Para as hidrofóbicas, tem-se um ângulo de contato maior que 90° graus. Nesse tipo de superfície o líquido tem um contato menor com o substrato favorecendo a formação de gotas de líquido mais compactas. Em ângulos maiores que 150° , a superfície ganha o nome de superhidrofóbica (MURAKAMI et al., 2014).

Um breve resumo pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1 - Tipo das superfícies relacionadas com o ângulo de contato que possuem

Ângulo de contato	Tipo de superfície
Próximo de 0°	Superhidrofílica
$< 90^\circ$	Hidrofílica
$90^\circ - 150^\circ$	Hidrofóbica
$> 150^\circ$	Superhidrofóbica

Fonte: Autoria própria.

Na figura 1, nota-se exemplos dos quatro tipos de superfícies supracitados em plantas encontradas na natureza.

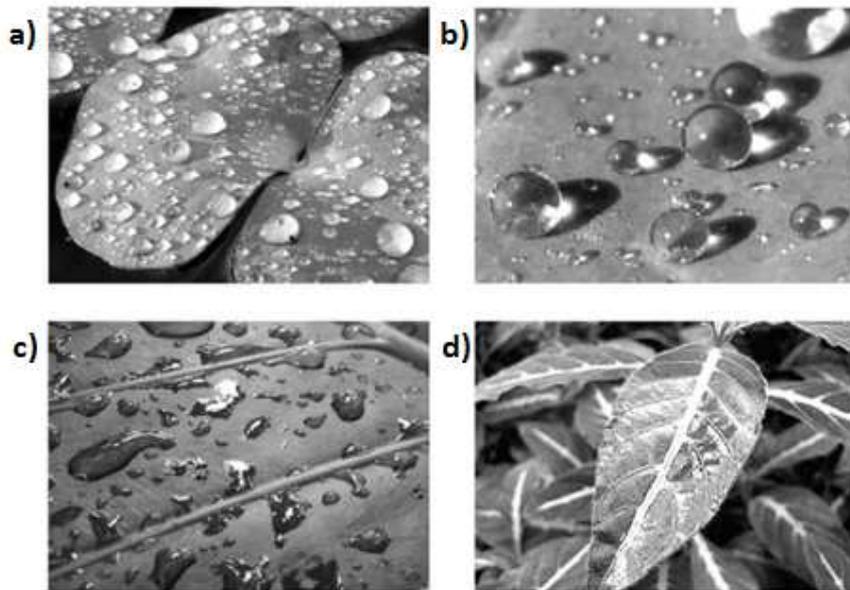


Figura 1 - (a) Representação de uma folha que apresenta hidrofobia, *Regnellidium diphyllum*. (b) Folhas de *Brassica oleracea* representando folhas com superfícies superhidrofóbicas. (c) Superfície hidrofílica de uma folha de *Alocasia odora* e (d) Folha de *Ruellia devosiana* superhidrofílica

Fonte: Adaptado KOCH; BARTHLOTT, 2009.

2.1.1 Modelos

Existem três modelos que descrevem os tipos de molhabilidade das superfícies que serão citados a seguir.

Thomas Young descreveu o ângulo de contato de uma gota líquida em um substrato conforme a figura 2. Esse modelo é determinado pelo equilíbrio termodinâmico de três interfaces sob a gota conforme a equação (1) de Young (YOON et al., 2014).

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (1)$$

Onde:

- θ = ângulo de contato;
- γ_{SG} = tensão de superfície da interface sólido-gás;
- γ_{SL} = tensão de superfície da interface líquido-sólido;
- γ_{LG} = tensão de superfície da interface gás-líquido.

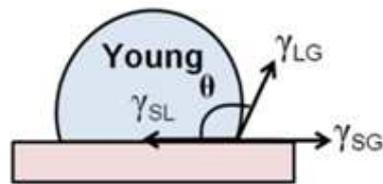


Figura 2 - Modelo de Young
Fonte: YOON et al.,2014.

Essa equação somente é usada para superfícies planas e homogêneas (YOON et al., 2014). Para a molhabilidade das superfícies que apresentam rugosidades, Wenzel e Cassie & Baxter estabeleceram equações para definição do ângulo de contato nessas superfícies (PETERS et al., 2009).

A figura 3 mostra um líquido que molha totalmente a textura da superfície, a qual descreve o modelo de Wenzel, representado pela equação (2) abaixo (YOON et al., 2014).

$$\cos \theta_W = r \cos \theta \quad (2)$$

Onde:

- θ_W = ângulo de contato de Wenzel;
- θ = ângulo de contato de Young;
- r = fator de rugosidade da superfície.

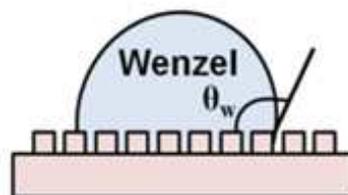


Figura 3 - Modelo Wenzel
Fonte: YOON et al.,2014.

O fator de rugosidade r de Wenzel é dado pela razão entre a área sólido-líquido e a projetada (YOON et al., 2014). As gotas desse estado exibem uma alta adesão à superfície, porque as linhas de contato das gotas preenchem totalmente a aspereza da mesma.

Quando um líquido não penetra na textura da superfície, temos o modelo de Cassie-Baxter, figura 4. Por conta da retenção de ar, ocorre a diminuição da área de contato entre a superfície e a gota, diminuindo a força adesiva. Em comparação com

o estado Wenzel, o Cassie possui um ângulo de contato muito maior e baixa histerese, resultando em uma superfície em que a gota se desliza facilmente (ROACH et al., 2008). Equação de Cassie, a qual pode ser vista abaixo, indica que o ângulo de contato aumenta à medida em que f_s diminui (YOON et al., 2014).

$$\cos \theta_c = f_s(1 + \cos \theta) - 1 \quad (3)$$

Onde:

- θ_c = ângulo de contato efetivo do estado de Cassie;
- f_s = fração do sólido em contato com o líquido.

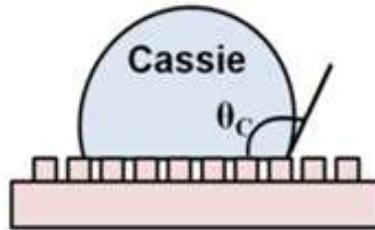


Figura 4 - Modelo Cassie
Fonte: YOON et al.,2014.

2.2 NANÔMETRO

Nanômetro é uma medida de comprimento do SI (Sistema Internacional) relacionada a corpos de tamanho bem reduzido.

Quando se divide o metro em um milhão de partes, chega-se ao micrômetro (μm). Dividindo o micrômetro em mil pedaços, tem-se o nanômetro (nm), ou seja, o metro equivale a 10^9 nm. Então, 1 nm é 1 bilhão de vezes menor que o metro ou, é o mesmo que dividir o milímetro em 1 milhão de partes (FERNANDES; FILGUEIRAS, 2008).

2.3 A REPELÊNCIA À ÁGUA NA NATUREZA

A técnica da engenharia reversa é a ferramenta utilizada para que a análise de superfícies da natureza seja realizada. Pesquisadores descobrem alguma função intrigante da fauna e flora e executam um exame aprofundado sobre tal característica, investigando-as em micro e em nano escala.

O reino vegetal apresentam vários exemplos de superhidrofobia. O efeito lótus, como ilustrado na figura 5, é um dos mais estudados quando esse é o principal assunto. As micro e nano estruturas distribuídas aleatoriamente pela superfície combinadas com a cera epicuticular tornam a folha repelente à água (GUO; LIU, 2007).



Figura 5 - Folha de lótus, *Nelumbo nucifera*
Fonte: LIU; JIANG; 2010.

O ângulo de contato elevado da folha, o qual é em torno de 160° , é responsável pelo aumento da tensão superficial da gota d'água, tornando-a assim redonda e que quando deslizam pela superfície carregam consigo partículas contaminantes, motivando um efeito de autolimpeza (KOCH; BARTHLOTT, 2009). Mesmo quando a inclinação é muito baixa, menor que 5° , uma gota d'água na superfície da folha de lótus consegue se deslizar (ROACH et al., 2008).

As micropapilas espalhadas aleatoriamente pela superfície, figura 6 (i), variam de tamanho entre 3-10 μm (BHUSHAN, 2009). Em microescala é possível perceber a textura da rugosidade da superfície e em nano escala é possível analisar a cera que reveste a folha de lótus. Esta possui a forma de túbulos de aproximadamente 100 nm de diâmetro. A forma que essa cera epicuticular possui dá uma certa rugosidade à superfície dando uma grande influência na característica de

superhidrofobia e autolimpeza da planta, a qual será explicada com mais detalhe posteriormente.

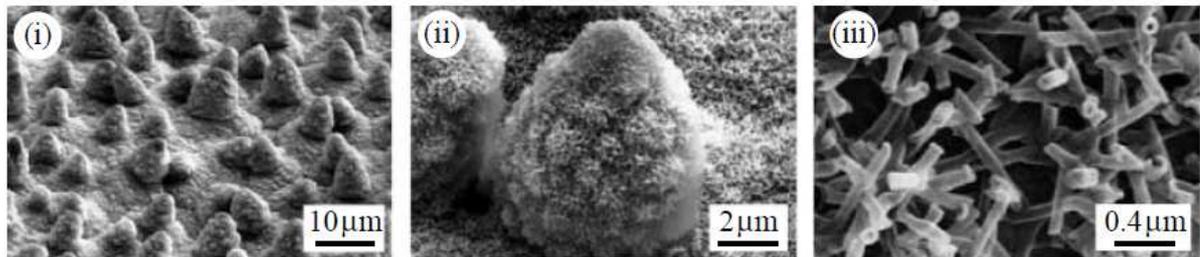


Figura 6 - (i) Imagem microscópica da superfície da folha da *Nelumbo nucifera* (Lótus); (ii) micropapila; (iii) cristais de cera epicuticular sobre a superfície
 Fonte: BHUSHAN, 2009.

O mesmo ocorre com as folhas de arroz. As suas papilas possuem uma média de diâmetro entre 5-8 μm e são alinhadas de forma paralela com a borda da folha (NISHIMOTO; BHUSHAN, 2012). A estrutura de sua superfície possui características similares às da folha de lótus, como pode ser constatado na figura 7.

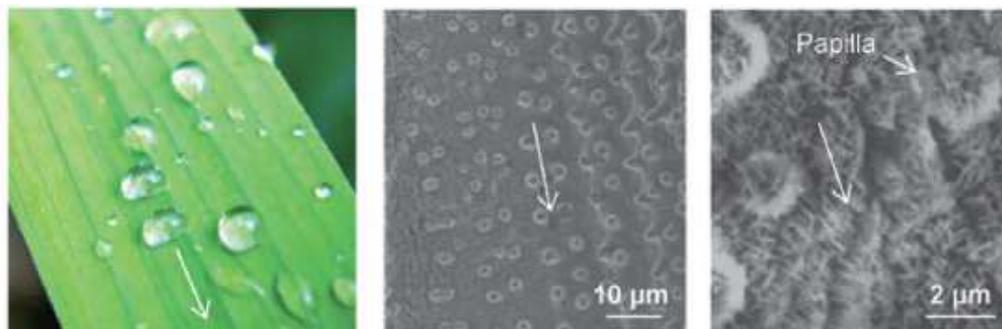


Figura 7 - Folha de arroz com a direção das papilas indicada
 Fonte: ROACH et al., 2008.

Um efeito interessante que ocorre nesse tipo de folha é que, na direção paralela às papilas o ângulo de contato gira em torno de 157° graus; já na direção perpendicular encontramos o valor de 146° graus (NISHIMOTO; BHUSHAN, 2012). Esse mesmo efeito não é observado na folha de lótus, a qual possui um ângulo de contato homogêneo por toda a sua superfície. Esse tipo de comportamento permite a réplica de produtos com a sua direcionalidade controlada, quando é necessário permitir que água escorra somente em uma determinada direção.

Ao se tratar de animais, alguns podem apresentar características superhidrofóbicas, como ocorre com as borboletas do tipo *Morpho aega*. Nessa espécie de borboleta é constatado a presença de escamas retangulares com nano-ranuras, figura 8, que dão características superhidrofóbicas e autolimpantes às

suas asas, permitindo-as até mesmo voarem quando está chovendo (MALSHE et al., 2013).

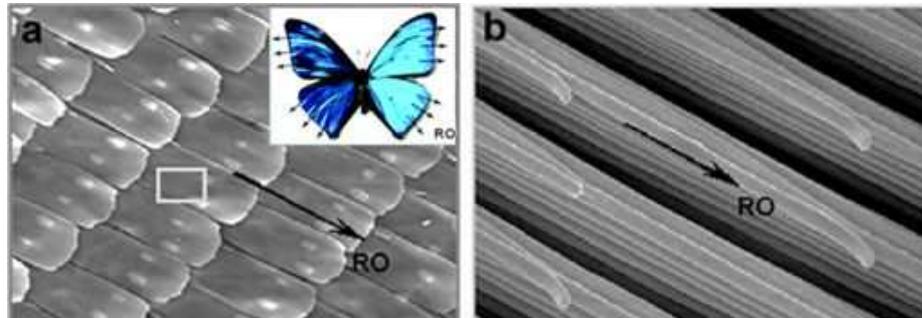


Figura 8 - Nano e microestruturas presentes na asa da (a) borboleta *Morpho aega*. RO = radial outward (direção radial para fora da superfície)
Fonte: MALSHE et al., 2013.

Uma característica peculiar das asas dessa borboleta é que, as gotas de água somente escorrem em um sentido, sempre para fora do corpo da borboleta. Ao tentar deslizar o líquido no sentido contrário, estudos mostram que a gota d'água permanece intacta na superfície (ZHENG et al., 2007). Esse poder de adesão direcional é possível ser analisado pela figura 9. Até quando a asa é colocada 90° inclinada na direção oposta ao centro do corpo da borboleta verifica-se que a gota continua imóvel, assunto que será tratado posteriormente nesse trabalho.

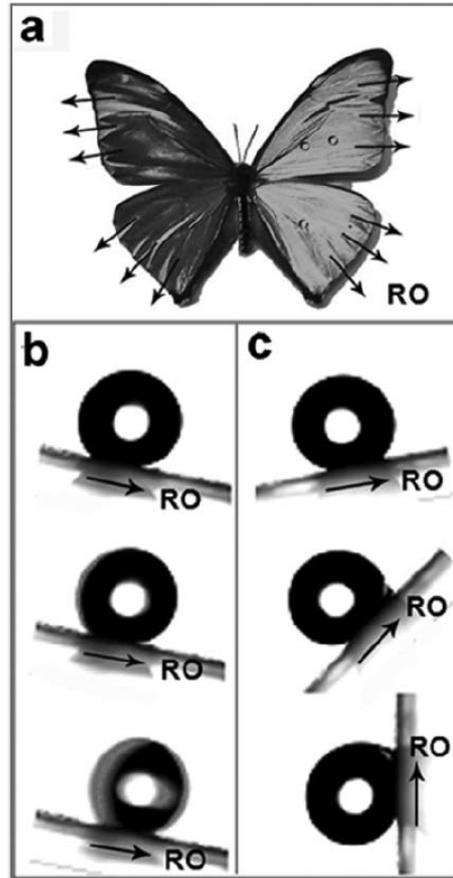


Figura 9 - (a) Borboleta *Morpho aega* com o sentido da sua adesão direcional indicada. (b) As gotas deslizam facilmente na direção de RO e (c) na direção contrária elas não apresentam nenhum movimento

Fonte: ZHENG et al., 2007.

Essa singularidade é extremamente válida para criação de superfícies superhidrofóbicas com a direção de deslizamento totalmente controlável. Existem pesquisadores que afirmam que as asas das borboletas possuem uma combinação das propriedades da folha de lótus e pele de tubarão (BIXLER; BHUSHAN, 2012), isso devido as suas características autolimpantes, a superhidrofobicidade e a força de arrasto.

Nas asas da cigarra, figura 10, tem-se estruturas muito parecidas com as da folha de lótus. Através do espaço entre as estruturas, bolsas de ar são formadas, dando o poder da superhidrofobicidade.

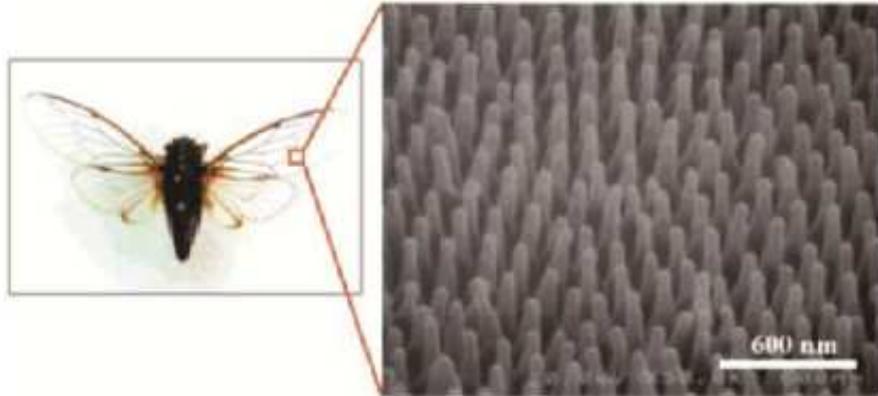


Figura 10 - Asa da cigarra
Fonte: NISHIMOTO; BHUSHAN, 2013.

2.4 SUPERFÍCIES AUTOLIMPANTES NA NATUREZA

Como relatado anteriormente, o design das superfícies que apresentam superhidrofobicidade, como as da folha de lótus e da borboleta *Morpho aega*, são propícias a apresentarem características de autolimpeza. Mas, o que acontece, é que também temos superfícies que são totalmente hidrofílicas e mostram estratégias que as mantêm despoluídas, isso por conta da nano textura.

A folha de lótus apresenta sempre uma aparência muito limpa devido à facilidade de deslizamento que as gotas d'água possuem quando entram imediatamente em contato com a superfície (BIXLER; BHUSHAN, 2013).

Como a gota d'água apresenta uma forma de quase uma esfera perfeita ela consegue facilmente carregar as partículas externas devido a maioria dessas possuírem maior adesão com a água do que com o substrato em que se encontram. Assim, a gota rola para fora da superfície removendo consigo sujeiras da superfície (ZHANG, Y. et al., 2012).

A figura 11 mostra uma comparação do comportamento de uma superfície superhidrofóbica com impurezas e uma superfície qualquer quando sujeita a um certo ângulo de inclinação.

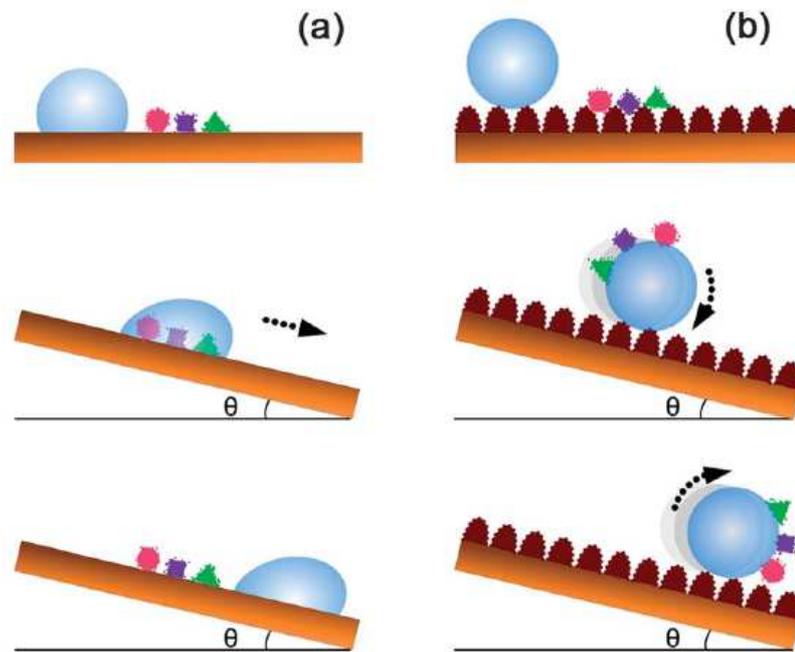


Figura 11 - Mecanismo de autolimpeza ilustrado. (a) Superfície qualquer com impurezas e (b) superfície superhidrofóbica com impurezas
 Fonte: ZHANG et al., 2012.

Artifícios contra o crescimento de microrganismos em superfícies são constatadas em algumas plantas e animais marinhos. A pele do tubarão apresenta uma nano textura que mantém sua pele limpa e protege da incrustação de organismos, além de também ajudar na redução do atrito (BIXLER; BHUSHAN, 2012). Suas escamas em forma de placas retangulares possuem cerca de 200-500 μm de altura e suas ranhuras são alinhadas na direção do fluxo d'água, como ilustrado na figura 12 (BHUSHAN, 2009). É importante ressaltar que a pele do tubarão é hidrofílica, isto é, possui uma molhabilidade alta, ela não é repelente à água.

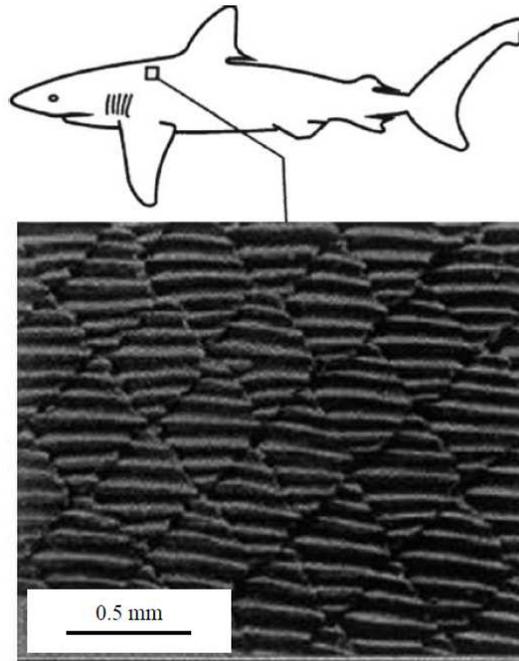


Figura 12 - Estrutura da pele do tubarão de Galápagos (*Carcharhinus galapagensis*) em um microscópio eletrônico
Fonte: BHUSHAN, 2009.

Estudos da pele do tubarão têm inspirado novos revestimentos que ajudam na diminuição do arrasto e que conservam a superfície sempre limpa. Esse tipo de tecnologia já é utilizado em aeronaves como por exemplo. Outra aplicação interessante é nas roupas de nadadores, as quais são dotadas de estruturas que imitam a topografia das escamas de um tubarão para aumentar a eficiência do atleta (MALSHE et al., 2013).

3 METODOLOGIA

A seguir, serão apresentadas as superfícies com características de superhidrofobia em animais e plantas mais discutidas por conta de suas propriedades que as tornam diferentes em relação às demais.

3.1 SUPERHIDROFOBIA EM PLANTAS E ANIMAIS

3.1.1 Folha de Lótus

A folha de lótus apresenta superhidrofobia com um ângulo de contato de 163° e ângulo de inclinação em torno de 3° . Em microescala é possível notar a presença de papilas, e em nanoescala observa-se a presença de finos tubos com 120 nm de diâmetro (LIU; JIANG, 2011).

Com uma análise em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), mostrado na figura 13, percebe-se as particularidades da superfície de uma folha de lótus.

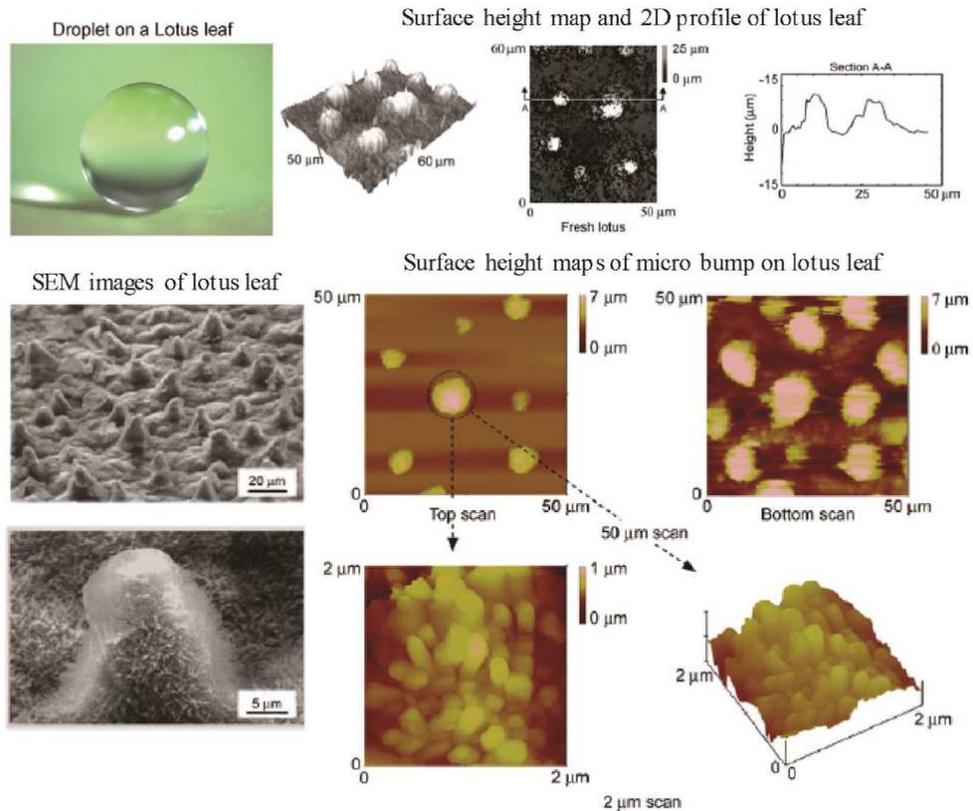


Figura 1 - Imagens do MEV da superfície da folha de lótus. Micropapila de 5-9 micrômetros de diâmetro e cera epicuticular presente em toda superfície
 Fonte: NISHIMOTO; BHUSHAN, 2012.

A interação entre as estruturas da superfície combinadas com a cera epicuticular em formato de pequenos tubos, origina uma superfície com uma rugosidade totalmente superhidrofóbica (ZHANG, Y. L. et al., 2012).

A figura 14 demonstra as duas estruturas responsáveis pela principal característica da folha e como a gota se comporta na superfície. A nano e micro estrutura favorecem a formação de bolhas de ar abaixo da gota, originando o que se chama de efeito lótus (HANCOCK et al., 2012).



Figura 2 - Micro e nanopilares que formam a estrutura da superfície da folha de lótus
 Fonte: STEIGLEDER, 2010.

A folha de lótus apresenta uma superfície de baixa adesão, que como foi citado, com menos de 3° de inclinação, a gota d'água consegue se deslizar facilmente por toda a extensão da folha, ajudando também na limpeza da mesma, fornecendo proteção contra agentes patogênicos.

3.1.2 Folha de Arroz

A folha de arroz detém um ângulo de contato de 157°, ou seja, é superhidrofóbica, e apresenta ângulo de inclinação de 4°. Sua rugosidade superficial é caracterizada pelas papilas entre 5-8 micrômetros, muito parecida com as da folha de lótus. A diferença existente entre elas é que, na folha de arroz, as papilas são apresentadas de forma alinhada paralela à borda (NISHIMOTO; BHUSHAN, 2012).

Com imagens no MEV, figura 15, pode-se com facilidade constatar o alinhamento das microestruturas superficiais da folha de arroz de forma paralela com a borda da folha e em fileiras.

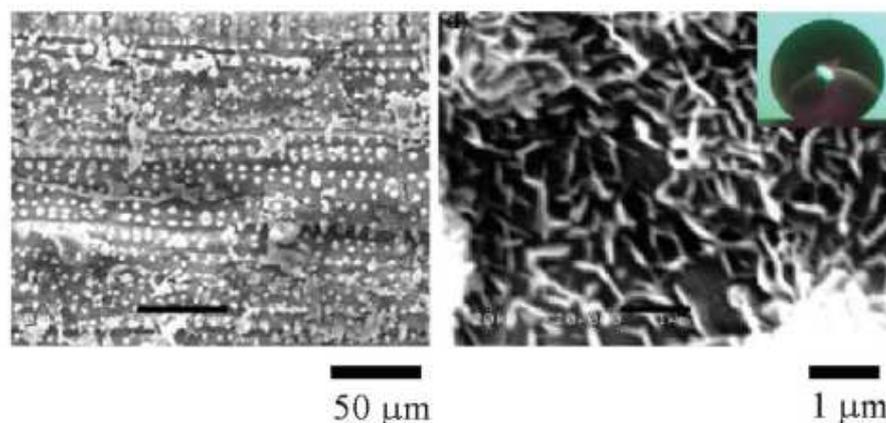


Figura 3 - Imagens do MEV das estruturas responsáveis pela superhidrofobia na folha de arroz . Papilas alinhadas (esquerda) e nanoestrutura de uma papila (direita)
Fonte: ZHU et al., 2014.

Devido à disposição de suas ranhuras, a água escorre melhor na direção das papilas, como indicado na figura 16, ocorrendo o que se chama adesão direcional (ZHU et al., 2014).

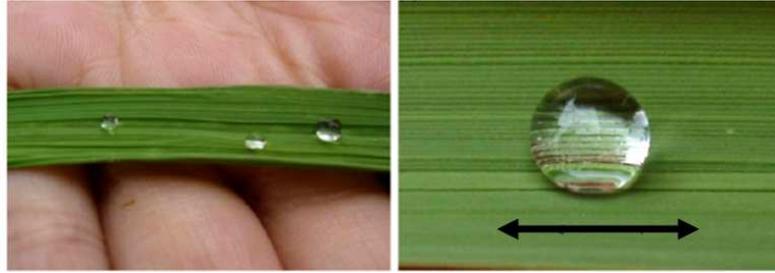


Figura 4 - Seta indicando a direção da papila na folha de arroz
 Fonte: Adaptado ZHU et al. ,2014.

O design da superfície da folha de arroz dá a característica de baixa adesão e, conseqüentemente, o poder de autolimpeza.

3.1.3 Pétala de Rosa

A rugosidade da superfície da pétala de rosa é apresentada por micropapilas de 16 micrômetros de diâmetro e nanoestruturas em cada uma das papilas que resultam em um ângulo de contato de 153° . Além de ser superhidrofóbica, esse tipo de rugosidade mostra uma alta adesão. Mesmo colocando a pétala virada de cabeça para baixo, a gota d'água ainda permanece intacta na superfície (ZHU et al., 2014).

Ocorre um estado de Cassie especial na superfície das pétalas de rosas. Nesse estado, a água consegue se fixar na superfície porque as ranhuras existentes nela são totalmente molhadas por água e já nas papilas não ocorre o mesmo (BHUSHAN, 2012). Na figura 17 há a comparação entre o comportamento de uma superfície da folha de lótus (Cassie-Baxter) e da superfície com o estado Cassie especial.

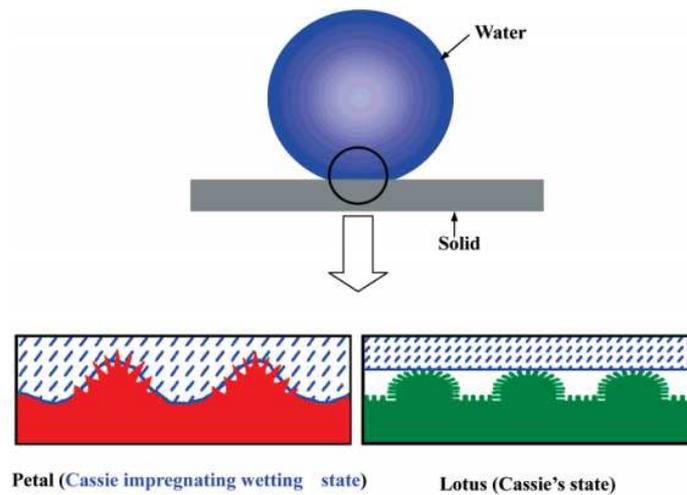


Figura 5 - Comparação do comportamento da superfície da pétala de rosa (vermelha) com a da folha de lótus (verde)

Fonte: FENG et al., 2008.

As dobras cuticulares de 730 nm de largura em cada topo das papilas, mostradas na figura 18, são as responsáveis pela não molhabilidade total da superfície, “aprisionando” a gota líquida à superfície, propiciando o poder de alta adesão à pétala (BHUSHAN, 2009).

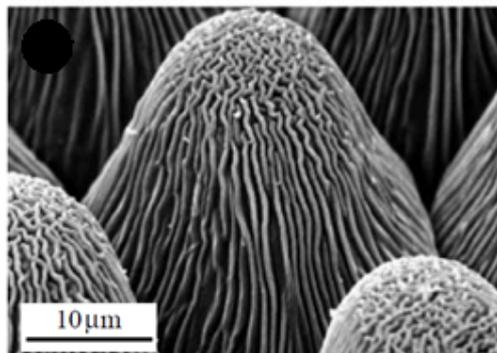


Figura 6 - Imagem do MEV de uma papila com as dobras cuticulares

Fonte: BHUSHAN, 2009.

Uma das propriedades superficiais que também influencia nesse comportamento é a distância entre as papilas. O tamanho do passo na pétala é maior do que o que é encontrado na folha de lótus, causando esse efeito onde área superficial molhada é menor que a do Wenzel e maior do que no estado de Cassie-Baxter (FENG et al., 2008).

3.1.4 Asa da Cigarra

A superhidrofobia, baixa adesão e autolimpeza aparecem na asa da cigarra. A superfície é constituída por uma estrutura formada de nanopilares com largura entre 110 -140 nm e variação de altura de 225 nm a 350 nm. Devido a essa topografia e rugosidade superficial, juntamente com a presença de uma cera, constata-se um ângulo de contato de 160° (NISHIMOTO; BHUSHAN, 2012).

Os nanopilares, figura 19, se encontram bem próximos uns dos outros, apresentando a forma hexagonal (NISHIMOTO; BHUSHAN, 2012). Esse tipo de formato é muito comum quando as estruturas se organizam próximas uma das outras, originando um encaixe perfeito.

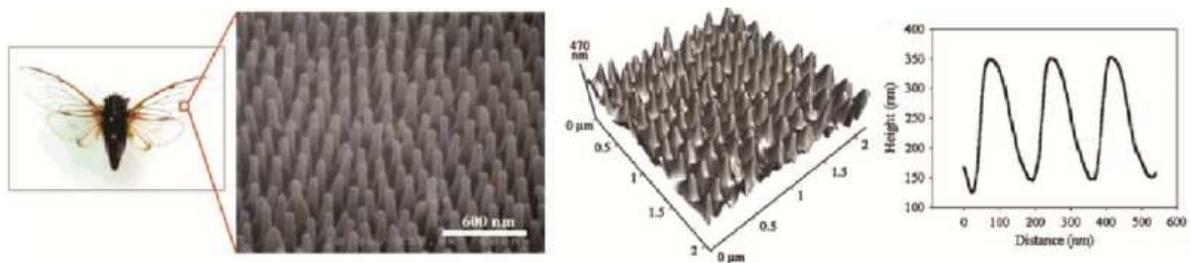


Figura 7 - Mapa da altura dos nanopilares da asa da cigarra
Fonte: NISHIMOTO; BHUSHAN, 2012.

3.1.5 Asa da Borboleta

A borboleta azul, *Morpho aega*, possui uma superfície com adesão direcional, a baixa adesão somente ocorre na direção para fora da asa.

Sua asa possui uma estrutura do tipo escamas retangulares que se encaixam perfeitamente como telhas. Devido a essa forma de encaixe alguns solavancos são criados na superfície, originando essa direcionalidade de adesão (ZHANG, Y. L. et al., 2012).

O comprimento de cada escama é de $150 \mu\text{m}$, e a largura de $70 \mu\text{m}$ (ZHENG et al., 2007). Sua rugosidade superficial fornece uma superhidrofobicidade em torno

de 152° (NISHIMOTO; BHUSHAN, 2012). A figura 20 mostra a orientação da estrutura da asa, uma sobreposta a outra.

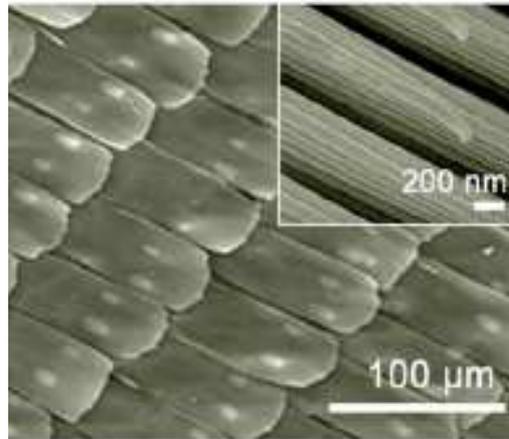


Figura 8 - Imagem do MEV da micro e nanoestrutura da superfície da asa da borboleta Morpho aega

Fonte: ZHANG, Y. L. et al., 2012.

Além de sua superhidrofobicidade e adesão direcional, as borboletas do tipo Morpho aega possuem uma coloração azul que muda de tonalidade conforme a mudança do ângulo de visão (LIU; JIANG, 2011). A estrutura do “corpo” de cada escama, figura 21, passa a ser responsável pela cor, enquanto a superfície de cada uma delas se torna responsável pela sua superhidrofobia, adesão e autolimpeza.

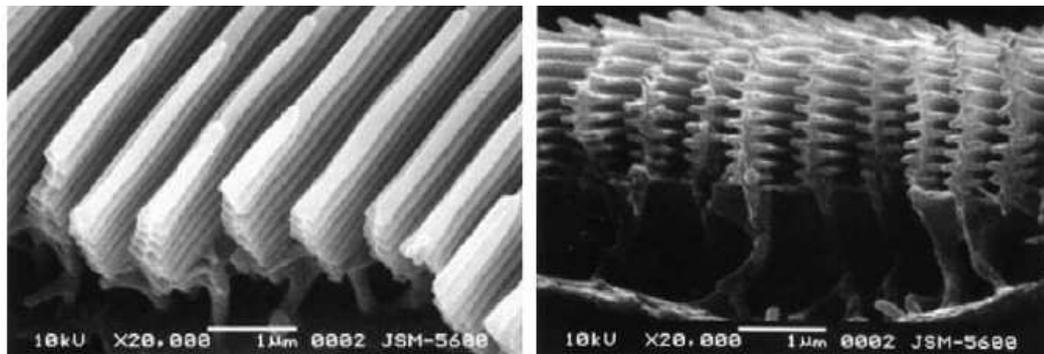


Figura 9 - Imagem direita mostra a vista oblíqua da superfície da escama e a esquerda mostra a escama com um corte transversal

Fonte: LIU; JIANG, 2011.

Engenheiros e cientistas procuram maneiras de replicar essas estruturas por conta das suas multi-propriedades que as asas deste tipo de borboleta apresentam.

3.1.6 Pata da Lagartixa

A lagartixa possui um eficiente sistema de fixação formado por centenas de projeções nas suas patas, cerca de 500.000 setas. A orientação e terminação de cada seta originam forças de ligação, responsáveis para que ocorra o que se chama de adesão seca, ou seja, ausência de secreção de líquido para que a adesão aconteça (HANCOCK et al., 2012).

Na pata da lagartixa temos um caso de superhidrofobia com um ângulo de contato de 161° e alta adesão (ZHU et al., 2014).

Na figura 22 e 23, pode-se analisar as terminações das patas da lagartixa. As setas são pequenos pelos curvos entre 30-130 μm de comprimento e 5-10 μm de diâmetro. No fim de cada seta existem de 100-1000 espátulas de 2-5 μm de comprimento e 0.1-0.2 μm de diâmetro e, por fim, têm-se terminações nas espátulas de 0.2-0.3 μm de largura (BHUSHAN, 2012).

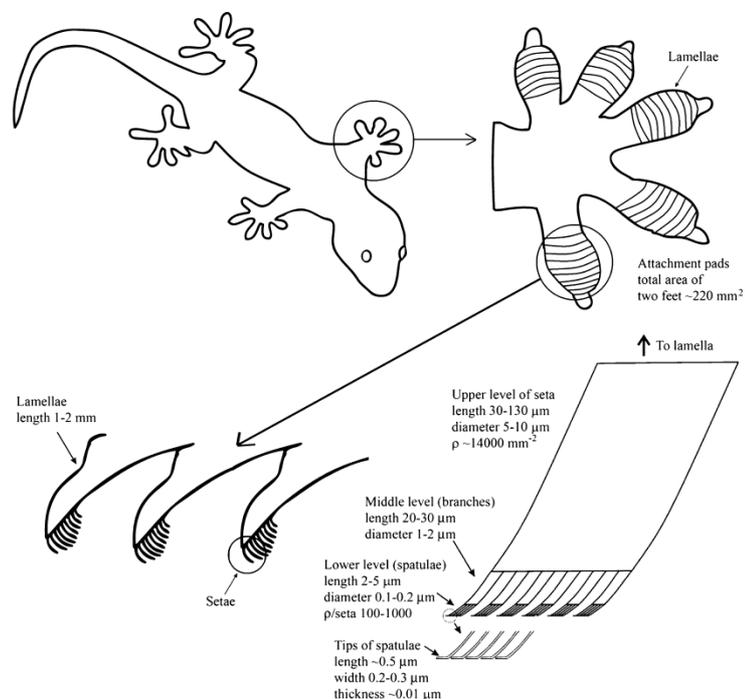


Figura 10 - Terminações das setas da lagartixa do tipo *Gekko gecko*
Fonte: BHUSHAN, 2012.

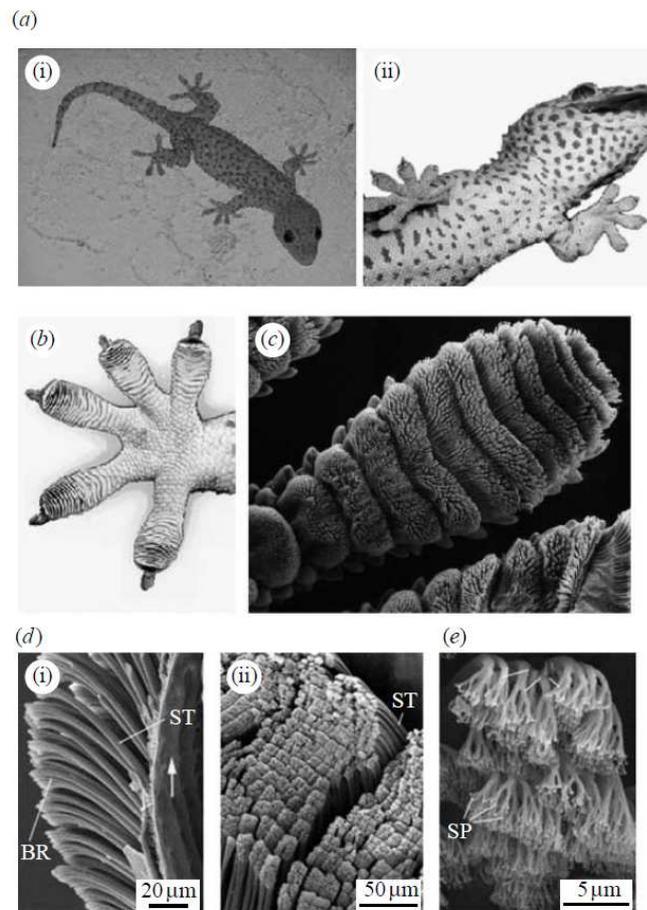


Figura 11 - (a) Imagem da Lagartixa vista de cima e de baixo; (b) pata da lagartixa; (c) imagem de um dedo da pata; (d) seta; (e) espátula
Fonte: BHUSHAN, 2009.

Através de um estudo feito por B. Bhushan (2012) observou-se que, entre os insetos, quanto maior a massa, menor são os terminais das suas estruturas responsáveis pela fixação. A lagartixa é o maior animal que possui adesão seca, sem secreção de líquido para ajudar na fixação.

3.1.7 Olho do Mosquito

Os olhos dos mosquitos são superhidrofóbicos e apresentam um sistema anti embaçante. São formados por unidades hexagonais de 26 micrometros de diâmetro onde cada microesfera, observada em nanoescala, é coberta por pontos com 101 nm de diâmetro distantes uns dos outros 47 nm, mostrado na figura 24 (BHUSHAN, 2009).

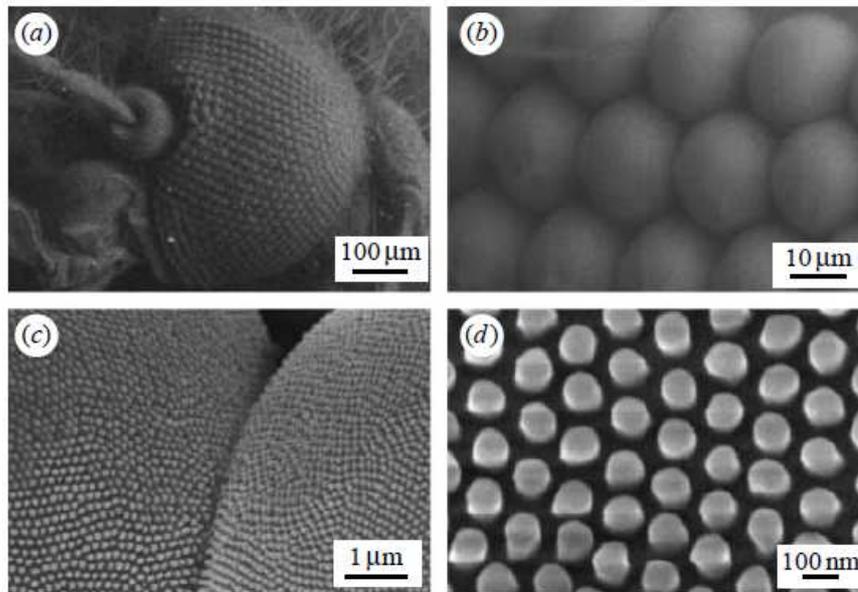


Figura 12 - (a) olho do mosquito; (b) microsferas; (c) duas microsferas próximas; (d) nanoestrutura de cada microsfera
Fonte: BHUSHAN, 2009.

3.2 BIOMIMÉTICA NA INDÚSTRIA

Pode-se encontrar atualmente diversos projetos bem sucedidos e produtos que já são comercializados que usam a natureza como inspiração para a solução de problemas relacionados à hidrofobia.

Na indústria temos produtos que são criados imitando o design encontrado na natureza, e a seguir serão mostrados aqueles feitos para fins comerciais e que estão sendo vendidos ou em fase de desenvolvimento.

Existem muitos estudos que são apresentados pela indústria e pesquisadores a fim de se modernizar as técnicas de replicação de pequenas estruturas. Nos dias atuais, há muitas técnicas para a produção de microcomponentes, com custos diferentes mas com o objetivo final de se obter uma boa precisão na miniaturização (JAVAREZ JUNIOR, 2009).

3.2.1 Vidro Superhidrofóbico

Com a finalidade de melhorar as telas de seus dispositivos, a Samsung Eletronics tem trabalhado no desenvolvimento de uma fina película superhidrofóbica juntamente com o Oak Ridge National Laboratory, nos Estados Unidos (OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2016).

A nanoestrutura superficial forma um fino filme sobre a superfície e traz diversos benefícios. Entre eles estão: a repelência a água, redução da reflexão da luz, anti-manchas e anti-impressões digitais (CARMAN, 2016).

O efeito dessa tecnologia pode ser observado na figura 25. A superhidrofobia apresentada pela superfície faz com que a gota d'água transporte consigo as impurezas da superfície.



Figura 13 - Fino filme superhidrofóbico na superfície do vidro
Fonte: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2016

Através de um processo de ataque químico, cria-se uma estrutura tridimensional porosa sob o vidro, com alto teor de sílica, se assemelhando a nanoestrutura encontrada pelos nano tubos que dá a forma à cera epicuticular da folha de lótus e na de arroz (RIDGE et al., 2016). Essa estrutura é mostrada na figura 26.

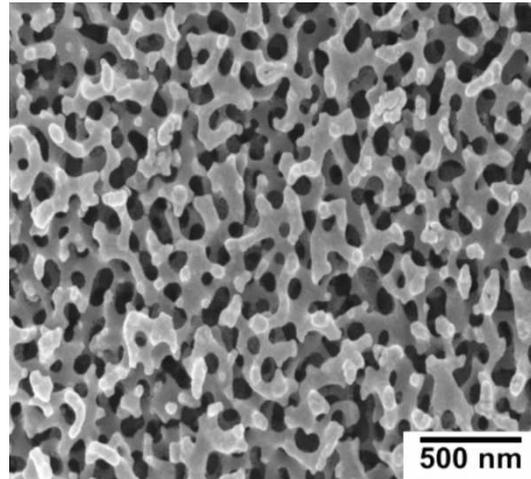


Figura 14 - Nanoestrutura da superfície do vidro após o ataque químico
 Fonte: OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 2016

Além da eletrônica, essa tecnologia tem um grande potencial para aplicações em lentes, painéis solares, detectores, janelas e outros produtos, como ilustrado na figura 27.

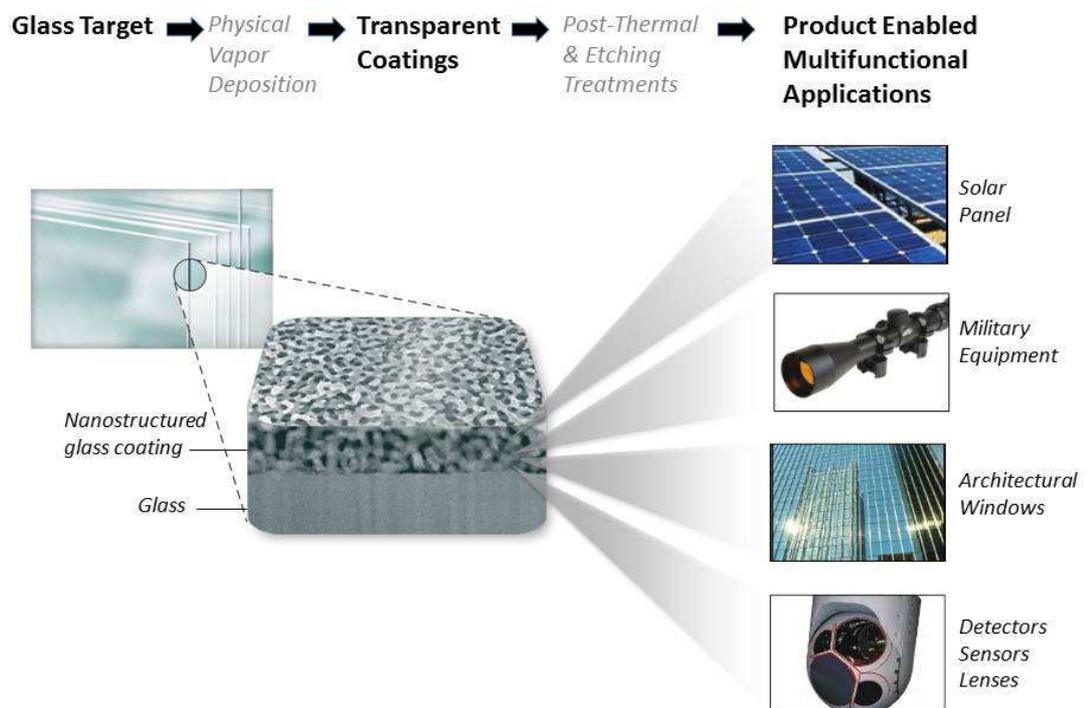


Figura 15 - Aplicações do nano filme
 Fonte: RIDGE et al., 2016

3.2.2 Carro Autolimpante

A Nissan da Europa está desenvolvendo, em conjunto com uma empresa de nanotecnologia chamada Nano Labs, o lançamento de um carro autolimpante. Trata-se de um revestimento de nanopartículas na pintura, onde a ideia é acabar com a limpeza exterior do carro (WAREHOUSE, 2014).

O produto utilizado não é uma pintura, mas sim, um revestimento que promove uma camada de ar na superfície da pintura por conta da sua rugosidade, criando o efeito lótus e assim, a sujeira é repelida de toda a superfície (BILL HOWARD, 2014). Abaixo, na figura 28, percebe-se a diferença da aplicação do revestimento ao dirigir o carro em uma estrada de lama.



Figura 16 - Carro Nissan com o lado direito aplicado a tinta superhidrofóbica
Fonte: BILL HOWARD, 2014

3.2.3 Ultra-Ever-Dry

O spray Ultra-Ever-Dry é um dos produtos superhidrofóbico mais famoso devido a ser comum encontrar muitos vídeos e imagens compartilhadas na internet desde o seu lançamento em 2012. O produto tem a habilidade de repelir óleo e qualquer coisa que tenha água em sua composição (ULTRA-EVER-DRY, 2016).

Existe uma maneira correta de aplicar o produto para se chegar ao resultado de superhidrofobicidade esperado (LOPES, 2013). Ao entrar em contato com a superfície, a tecnologia do produto permite a formação de nanopilares na superfície, produzindo o efeito lótus, como pode ser evidenciado na figura 29.



Figura 17 - Superfície com o Ultra-Ever-Dry aplicado com o líquido sendo repelido
Fonte: LOPES, 2013

A textura do revestimento é formada por saliências como encontramos na folha de lótus. Os “picos” ficam organizados formando uma nanoestrutura capaz de repelir água, lama, alguns óleos e sujeira. Por força da gravidade e o vento, a substância líquida que entra em contato com a superfície sai dela facilmente (BDTECH, 2013).

Na figura 30, temos um caso da aplicação do produto em luvas, para mantê-las sempre livre da sujeira.



Figura 18 - Comparação do uso de luvas com e sem o Ultra-Ever-Dry aplicado
Fonte: BDTECH, 2013

O revestimento dura de 2-8 meses. Essa variação ocorre porque depende do material em que é aplicado e da temperatura em que o mesmo é exposto. É

necessário aguardar de 20-30 minutos para a secagem completa do produto após sua aplicação na superfície. Outra desvantagem, é que ele não é transparente, mas sim branco translúcido (ULTRA-EVER-DRY, 2016).

3.2.4 Lotusan

A tinta fabricada pela Stocorp chamada de StoCoat Lotusan imita a nanoestrutura da folha de lótus. Ela foi criada para diminuir custos com limpeza, repintura e manter o aspecto sempre novo de prédios e casas que a utilizam como revestimento (STOCORP, 2015).

Uma tinta comum deixa as fachadas de construções sujas conforme o passar do tempo, elas favorecem o crescimento de micro-organismos devido aos depósitos de sujeira que se formam na pintura e da umidade presente na mesma. Com a tecnologia da Lotusan, a fachada sempre está seca e limpa, pois a água e a sujeira escoam de forma imediata quanto entram em contato com a pintura (STOCORP, 2006). A figura 31 mostra a comparação de um prédio após um tempo da aplicação da Lotusan.



Figura 19 - Comparação de um prédio sem a Lotusan aplicada (esquerda) e com a Lotusan (direita)

Fonte: STOCORP, 2006

Sua microtextura pode ser comparada ao da encontrada na superfície da folha de lótus, figura 32.

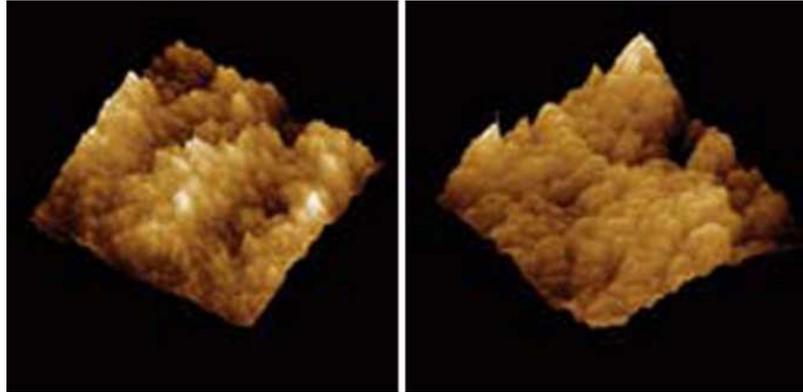


Figura 20 - Vista de um microscópio eletrônico. Direita é a imagem da superfície da Lotusan e à esquerda é a da folha de lótus
Fonte: ASK NATURE, 2015

É importante saber que a limpeza somente ocorre quando a pintura entra em contato com a água, portanto, um banho de chuva, por exemplo, é essencial para que ocorra a higienização da parede com o revestimento. A sujeira é levada como mostra a figura 33, onde as partículas indesejadas são carregadas pela água, remetendo ao comportamento da folha de lótus.

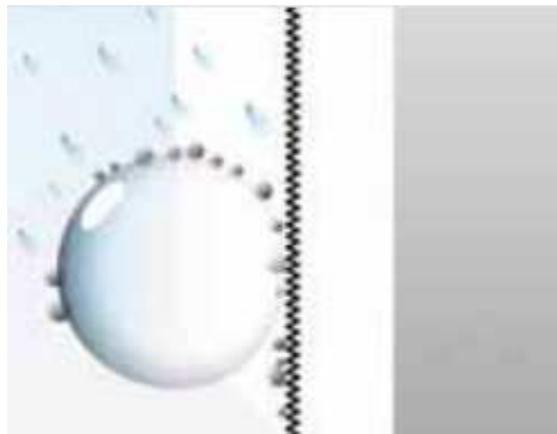


Figura 21 - Ação da água da chuva na parede
Fonte: STOCORP, 2015

3.2.5 Materiais com Iridescência

Apesar da superhidrofobicidade direcional das asas das borboletas do tipo *Morpho*, figura 34, uma das características mais estudadas e tecnologias

desenvolvidas tem se baseado nas suas estruturas devido a sua cor (ASK NATURE, 2016).

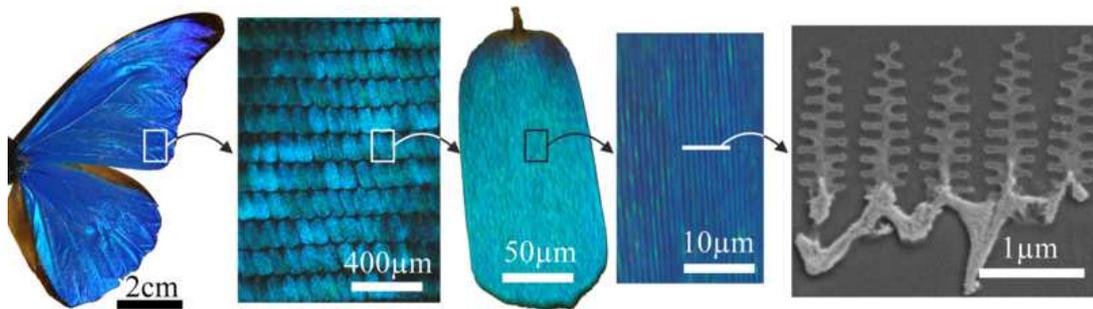


Figura 22 - Borboleta Morpho e suas estruturas
Fonte: ASKNATURE, 2016

O efeito ótico é exatamente causado pelos inúmeros espaços microscópicos entre suas estruturas que cria um jogo de luz quando a mesma incide e é refratada, resultando na cor azul brilhante (MULLER, 2013).

A figura 35 mostra como é a estrutura da asa em uma imagem de um microscópio eletrônico e um esquema da incidência e reflexão da luz na asa.

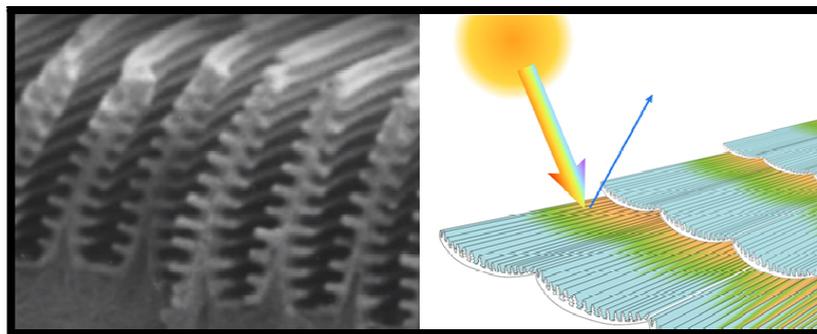


Figura 23 - Buracos que prendem a luz e refletem o azul típico da Morpho aega (à esquerda). Esquema da reflexão da luz que ocorre na asa da borboleta (à direita)
Fonte: MULLER, 2013

Na imagem abaixo, figura 36, tem-se uma peça de plástico com aproximadamente 500 milhões de furos de 100 nm de diâmetro e 100 nm de profundidade em cada um dos desenhos. Esses furos são os responsáveis em causar o efeito de luz de iridescência quando a placa é movimentada (MULLER, 2013).

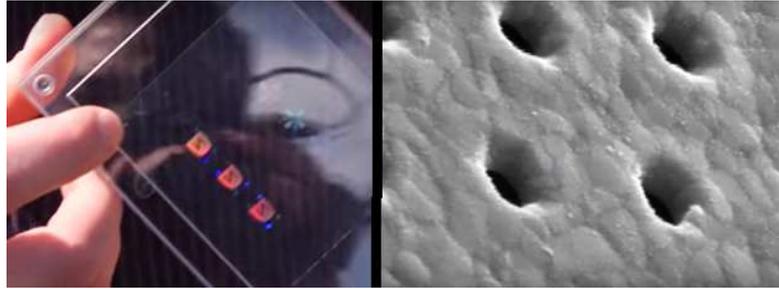


Figura 24 - Desenhos em uma placa de plástico (à esquerda) e imagem dos nano furos em cada um deles (à direita)
Fonte: MULLER, 2013

3.2.6 NanoSphere

NanoSphere® é o nome de uma tecnologia desenvolvida usada em tecidos que usa o princípio da superhidrofobia (SCHOELLER, 2016).

Por meio da nanotecnologia, um processo de limpeza anti-aderente ocorre por conta da rugosidade gerada com o dimetil polissiloxano na fibra de algodão, criando o efeito lótus. Uma camada de proteção invisível a olho nu é formada por esses polímeros, os quais são altamente hidrofóbicos (YOUSEF, 2015). A figura 37 ilustra os tecidos com o efeito gerado pela superhidrofobia.



Figura 25 - Tecidos com a tecnologia NanoSphere
Fonte: YOUSEF, 2015

Com o NanoSphere, qualquer resíduo pode ser lavado de forma muito fácil. Às vezes a sujeira não sai imediatamente da superfície, mas logo quando entra em contato com a água, a mesma consegue agarrar essas impurezas para fora da superfície (SCHOELLER, 2016).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 apresenta um resumo das características principais encontradas nas plantas superhidrofóbicas analisadas, o ângulo de contato, o tipo de estrutura e tamanho, e quanto à presença ou não de direcionalidade das estruturas.

Tabela 2 - Características de plantas superhidrofóbicas

Planta	Características	Ângulo de contato	Estruturas	Tamanho das estruturas	Presença de direcionalidade?
Folha de Lótus	-Superhidrofóbica -Baixa adesividade -Autolimpeza	163°	Papilas	-5-9 μm de diâmetro -Distantes 10-20 μm	Não
Folha de Arroz	-Superhidrofóbica -Baixa adesividade -Autolimpeza	157°	Papilas	-5-8 μm de diâmetro -Distantes de 5-10 μm	Sim
Pétala de Rosa	-Superhidrofóbica -Alta adesividade	153°	Papilas	-16 μm de diâmetro	Não

Fonte: Autoria própria.

As estruturas das plantas com superhidrofobia são facilmente encontradas na forma de papilas, como mostrado na tabela. Existem outros tipos de estruturas em que plantas apresentam certo grau de repelência à água, mas as mais estudadas e as que possuem os maiores ângulos de contato são as que estão citadas na tabela acima.

A folha de arroz e a de lótus possuem o tamanho das papilas iguais, somente a direcionalidade e organização das mesmas na superfície que as diferencia. O alinhamento das micropapilas na folha de arroz faz com que a água escorra com mais facilidade na direção paralela às estrias da folha. Por isso que frequentemente na folha de arroz o líquido escorre em uma direção, por conta dessa direcionalidade das estruturas da sua superfície.

Nas pétalas de rosa ocorre um caso de estado Cassie especial, onde as gotas de água molham por total somente algumas partes da superfície devido as mesmas terem rugosidades diferentes. A estrutura da rugosidade apresentada pelas papilas da folha de lótus e a proximidade entre elas são responsáveis pela baixa

adesão superficial, já na rosa, o diâmetro das micropapilas são maiores e as ranhuras das papilas são diferentes. Nota-se um aumento do diâmetro das micropapilas em relação à folha de lótus e a de arroz.

Abaixo, a tabela 3 mostra um resumo dos principais atributos das superfícies superhidrofóbicas encontradas em animais.

Tabela 3 - Características de animais com superhidrofobia

Animal	Características	Ângulo de contato	Estruturas	Tamanho das estruturas	Presença de direcionalidade?
Asa da Cigarra	-Superhidrofóbica -Baixa adesividade -Autolimpeza	160°	Pilares	-110-140 nm de largura -225-250 nm de altura	Sim
Asa da Borboleta	-Superhidrofóbica -Adesividade direcional -Autolimpeza	152°	“Escamas”	-150 µm de comprimento -70 µm de largura	Sim
Pata da Lagartixa	-Superhidrofóbica -Alta adesividade	161°	Cerdas	-Seta: 30-130 µm de comprimento -Spatula: 2-5 µm -Terminações da spatula: 0,5 µm comprimento e 0,2-0,3 µm de largura	Sim
Olhos do Mosquito	-Superhidrofóbica -Baixa adesividade -Autolimpeza	-	Microesferas	-26 µm de diâmetro -Cada microesfera é formado por pontos de 101 nm	Sim

Fonte: Autoria própria.

O ângulo de contato dos olhos do mosquito não está indicado na tabela devido ao desenho esférico dos mesmos tornar difícil a determinação do ângulo de contato. Nas réplicas estudadas, feitas normalmente em dimetil polissiloxano e utilizado processos de litografia, obtêm-se como resultado um ângulo de contato em torno de 155°(GAO et al., 2007).

A presença de organização e alinhamento das estruturas foi constatada em todas as superfícies dos animais analisados.

Nas asas da borboleta percebe-se uma direcionalidade na estrutura, pois ela possui estrias organizadas de forma paralela em toda a sua superfície e, além disso,

a água não consegue rolar na direção do corpo da borboleta devido à organização das “escamas” no esquema de telhas, formando picos que impedem da gota escorrer na direção do corpo da borboleta. Elas apresentam uma rugosidade superficial responsável por duas características importantes, a direcionalidade no escoamento do líquido e a reflexão da sua cor iridescente. Isso leva a concluir que as cores não são criadas por um pigmento, mas sim pela organização de sua estrutura.

Percebe-se que a pata da lagartixa e as pétalas de rosa são exemplos de que a rugosidade dá a característica de alta adesão. Além deles, existe também o girassol que apresenta hidrofobia e alta adesão. Nesses casos de superhidrofobia, por conta da alta adesividade, a água não corre pela superfície carregando consigo partículas de sujeira da mesma, portanto, não ocorre a autolimpeza.

As estruturas das superfícies dos olhos de mosquito e das asas da cigarra podem ser equiparadas as da folha de lótus. As micropapilas se assemelham às microesferas e aos pilares observados nos dois animais e causam o mesmo efeito, formam bolhas de ar que permitem a ‘flutuação’ das gotas líquidas na superfície.

O fluxograma abaixo, figura 38, mostra uma visão geral das superfícies superhidrofóbicas analisadas nesse presente trabalho e pode funcionar como um guia para identificação do animal ou planta que deve ser estudado para se obter as propriedades que foram escolhidas.

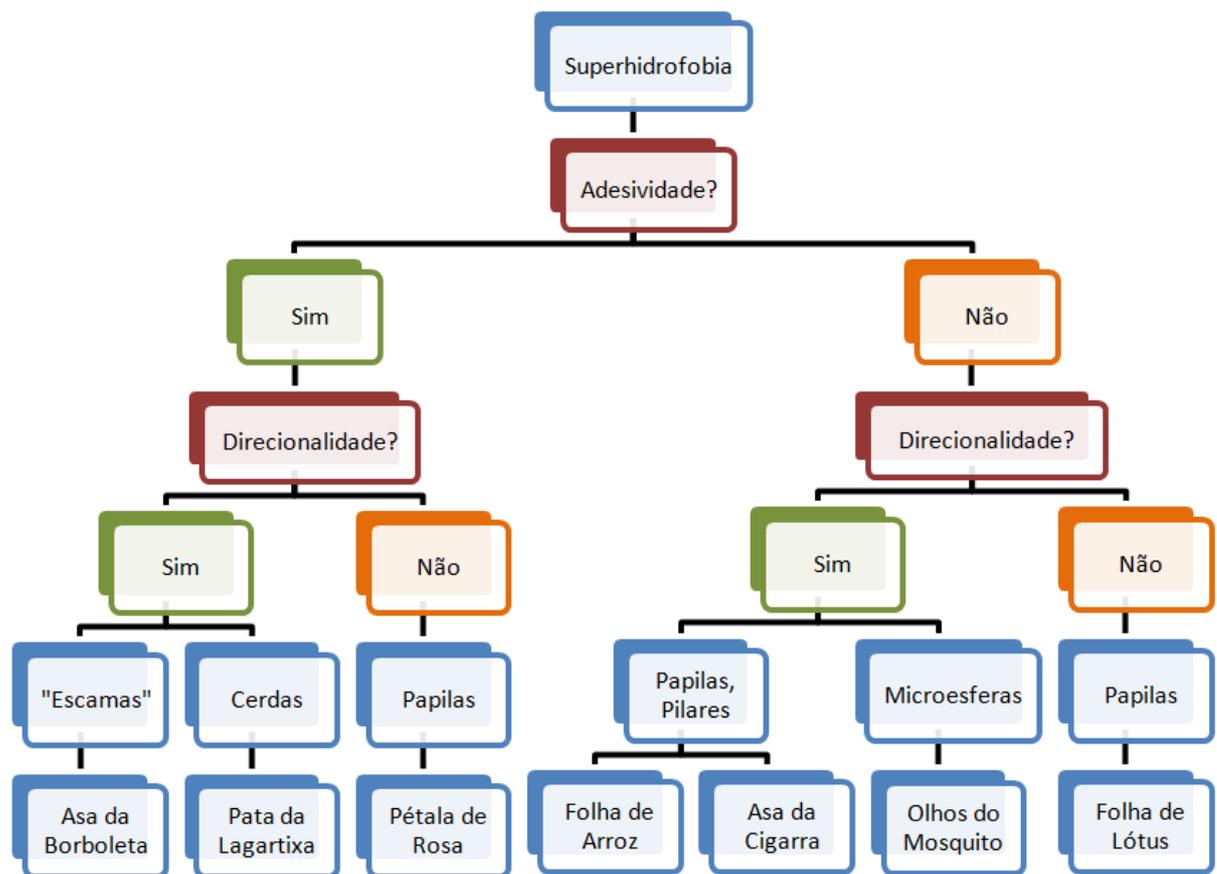


Figura 26 - Fluxograma das características das superfícies superhidrofóbicas estudadas
 Fonte: Autoria própria.

As superfícies superhidrofóbicas possuem superfícies peculiares que despertam o interesse de muitos engenheiros e cientistas, os quais buscam os melhores meios para replicá-las e comercializá-las.

Na indústria, os materiais superhidrofóbicos desenvolvidos recentemente, apresentados neste trabalho, apresentam a estrutura muito parecida com a que vemos na folha de Lótus. Observa-se uma quantidade considerável de produtos que utilizam o efeito lótus como inspiração e que modificam suas superfícies através de nanoestruturas, como ocorre com o vidro superhidrofóbico, a tinta Lotusan, o ultra-ever-dry e o carro autolimpante da Nissan.

O que é visto nesses produtos citados são muitas vezes uma nanotextura na superfície responsável em repelir a água e o uso de materiais poliméricos na composição com o intuito de melhorar a fobia a outros tipos de substâncias, tornando-os repelentes a óleo também, como por exemplo. Esses revestimentos poliméricos, como por exemplo, à base de fluorsilano ou dimetil polissiloxano, tem

dado origem a muitos estudos para implantação de melhorias na precisão na produção das microestruturas, como a laminação em PMMA (polimetilmetacrilato) aquecido (JAVAREZ JUNIOR, 2009). Os polímeros apresentam baixa energia livre superficial, e por isso eles têm sido muito utilizados na repelência de líquidos (KEHRWALD et al., 2009).

5 CONCLUSÕES

A nanotecnologia vem trazendo revoluções na indústria. Através deste trabalho percebe-se que a superhidrofobia é um assunto relativamente novo pelo fato de serem encontrados artigos com estudos da área a partir dos anos 2000.

O grande desafio da indústria na produção dos produtos superhidrofóbicos está na transparência do material. Essa é uma característica que muitas vezes é necessária, mas o que acontece é a formação de uma camada levemente opaca nas superfícies por conta dos tipos de materiais usados para ajudar na repelência à água e formar uma rugosidade adequada na superfície.

De nada adianta uma superfície ser somente revestida com um material repelente à água. Para que se alcance a superhidrofobia é indispensável considerar a rugosidade e o design de toda a estrutura superficial. Se o objetivo é que as superfícies se tornem superhidrofóbicas, é preciso que suas nanoestruturas estejam posicionadas de maneira adequada e possuam um formato apropriado para que a repelência seja eficiente.

Quando a superfície superhidrofóbica apresenta alta adesividade por todas as direções não há a característica da autolimpeza nesse caso. Por conta da água não se deslizar facilmente pela superfície, existe uma dificuldade em mantê-la limpa, pois a gota não carrega consigo as impurezas.

A folha de lótus é a mais estudada quando o assunto é superhidrofobia e autolimpeza devido à sua eficácia. Ela possui o melhor ângulo de contato dentre todas as outras superfícies naturais, por isso que o “efeito lótus” é o mais citado, o mais importante e a maior inspiração para produção da grande maioria dos materiais biomiméticos superhidrofóbicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASK NATURE. Inspired By The Lotus Leaf: Lotusan ® Paint. Disponível em: <http://inventorspot.com/articles/inspired_lotus_leaf_lotusan_paint_23083>. Acesso em: 18/10/2016.

ASK NATURE. Wing scales cause light to diffract and interfere. Disponível em: <<https://asknature.org/strategy/wing-scales-cause-light-to-diffract-and-interfere/#.WAbH8fkrJD8>>. Acesso em: 22/10/2016.

BDTECH. Revestimento super hidrofóbico e oleofóbico, ou seja, repele líquidos a base d'água, óleos e outros hidrocarbonetos. Disponível em: <<http://www.bdtech.com.br/teste/produtos/ultra-ever-dry-composto-super-hidrofobico/#!>>. Acesso em: 25/10/2016.

BHUSHAN, B. Biomimetics: lessons from nature--an overview. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 367, n. 1893, p. 1445–1486, 2009.

BHUSHAN, B. Bioinspired structured surfaces. **Langmuir**, v. 28, n. 3, p. 1698–1714, 2012.

BILL HOWARD. Nissan's self-cleaning car could kill off car washing forever. Disponível em: <<http://www.extremetech.com/extreme/181370-nissans-self-cleaning-car-could-kill-off-car-washing-forever>>. Acesso em: 22/10/2016.

BIXLER, G.; BHUSHAN, B. Fluid drag reduction and efficient self-cleaning with rice leaf and butterfly wing bioinspired surfaces. **Royal Society of Chemistry**, v. 5, p. 7685–7710, 2013.

BIXLER, G. D.; BHUSHAN, B. Bioinspired rice leaf and butterfly wing surface structures combining shark skin and lotus effects. **Soft Matter**, v. 8, n. 44, p. 11271, 2012.

CARMAN, A. Samsung is investing in “superhydrophobic” glass coatings to keep water off your phone screen. Disponível em: <<http://www.theverge.com/circuitbreaker/2016/9/29/13104992/samsung-water-resistant-coating-superhydrophobic>>. Acesso em: 18/10/2016.

FENG, L.; ZHANG, Y.; XI, J.; et al. Petal effect: A superhydrophobic state with high adhesive force. **Langmuir**, v. 24, n. 8, p. 4114–4119, 2008.

FERNANDES, M. F. M.; FILGUEIRAS, C. A. L. Um panorama da nanotecnologia no Brasil. **Quim. Nova**, v. 31, n. 8, p. 2205–2213, 2008.

GAO, X.; YAN, X.; YAO, X.; et al. The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography. **Advanced Materials**, v. 19, n. 17, p. 2213–2217, 2007.

GUO, Z.; LIU, W. Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: Binary structure and unitary structure. **Plant Science**, v. 172, n. 6, p. 1103–1112, 2007.

HANCOCK, M. J.; SEKEROGLU, K.; DEMIREL, M. C. Bioinspired directional surfaces for adhesion, wetting, and transport. **Advanced Functional Materials**, v. 22, n. 11, p. 2223–2234, 2012.

JAVAREZ JUNIOR, L. **Estudo do processo de replicação por laminação em polimetilmetacrilato (PMMA) aquecido**, 2009. Universidade de São Paulo.

KEHRWALD, A. M.; PRODÓCIMO, K. E.; BARRA, G. M. O.; FERNANDES, C. P. **Comportamento hidrofóbico e oleofóbico de revestimento polimérico a base de fluorsilano** *Anais do 10o Congresso Brasileiro de Polímeros*, 2009. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

KOCH, K.; BARTHLOTT, W. Superhydrophobic and superhydrophilic plant surfaces: an inspiration for biomimetic materials. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 367, n. 1893, p. 1487–509, 2009. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19324720>>. .

LIU, K.; JIANG, L. Bio-inspired design of multiscale structures for function integration. **Nano Today**, v. 6, n. 2, p. 155–175, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.nantod.2011.02.002>>. .

LOPES, J. Ultra Ever Dry repele mesmo tudo. Disponível em: <<http://www.revolucaodigital.net/2013/02/18/ultra-ever-dry-repele-mesmo-tudo/>>. Acesso em: 25/10/2016.

MALSHE, A.; RAJURKAR, K.; SAMANT, A.; BAPAT, S.; JIANG, W. Bio-inspired functional surfaces for advanced applications. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 62, p. 607–628, 2013.

MULLER, D. A. How To Make Colour With Holes. Disponível em: <<http://veritasium.com/>>. Acesso em: 19/10/2016.

MURAKAMI, D.; JINNAI, H.; TAKAHARA, A. Wetting Transition from the Cassie-Baxter State to the Wenzel State on Textured Polymer Surfaces. **Langmuir**, v. 30, n. 1, p. 2061–2067, 2014.

NISHIMOTO, S.; BHUSHAN, B. Bioinspired self-cleaning surfaces with superhydrophobicity, superoleophobicity, and superhydrophilicity. **RSC Advances**, p. 671–690, 2012.

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. Transparent superhydrophobic glass coatings for electronic devices. Disponível em: <<http://phys.org/news/2016-09-transparent-superhydrophobic-glass-coatings-electronic.html#jCp>>. Acesso em: 16/10/2016.

PETERS, A. M.; PIRAT, C.; SBRAGAGLIA, M.; et al. Cassie-Baxter to Wenzel state wetting transition : Scaling of the. **The European Physical Journal**, v. 397, n. 29, p. 391–397, 2009.

RIDGE, O.; AYTUG, T.; GROUP, M. C. Superhydrophobic glass coating offers clear benefits. Disponível em: <<http://phys.org/news/2014-02-self-cleaning-antireflective-coating-mimicks-moth.html#jCp>>. Acesso em: 22/10/2016.

ROACH, P.; SHIRTCLIFFE, N. J.; NEWTON, M. I.; NEWTON, M. I.; ROACH, P. Progress in superhydrophobic surface development. **Royal Society of Chemistry**, v. 4, p. 224–240, 2008.

SCHOELLER. Protective textiles. Disponível em: <<https://www.schoeller-textiles.com/en/textiles/protective-textiles>>. Acesso em: 20/10/2016.

STEIGLEDER, A. P. **Estudo morfológico da planta savinia molesta: uma contribuição para a biônica e o design de produto**, 2010. UFRGS.

STOCORP. StoLotusan Bionics: Technology inspired by nature. Disponível em: <www.sto.co.nz>. Acesso em: 18/10/2016.

STOCORP. Sto is your partner for advanced building technology solutions. Disponível em: <<http://www.stocorp.com>>. Acesso em: 18/10/2016.

ULTRA-EVER-DRY. Ultra-Ever Dry ®. Disponível em: <<http://www.spillcontainment.com/products/ever-dry>>. Acesso em: 25/10/2016.

WAREHOUSE, T. C. L. Nissan Develops The World's First Self Cleaning Car. Disponível em: <<https://www.thecarloanwarehouse.com/nissan-develops-self-cleaning-car-blog/>>. Acesso em: 22/10/2016.

YOON, Y.; KIM, D.; LEE, J.-B. Hierarchical micro/nano structures for superhydrophobic surfaces and super-lyophobic surface against liquid metal. **Micro and Nano Systems Letters**, v. 2, n. 1, p. 3, 2014. Disponível em: <<http://www.mnsl-journal.com/content/2/1/3>>. .

YOUSEF, I. Self Cleaning Technology : Nanosphere ® from Schoeller Technologies. Disponível em: <<http://www.uttu-textiles.com/self-cleaning-technology-nanosphere-from-schoeller-technologies/>>. Acesso em: 20/10/2016.

ZHANG, Y. L.; XIA, H.; KIM, E.; SUN, H. B. Recent developments in superhydrophobic surfaces with unique structural and functional properties. **Soft Matter**, v. 8, n. 44, p. 11217–11231, 2012. Disponível em: <<Go to ISI>://WOS:000310829600002\http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2012/sm/c2sm26517f>. .

ZHANG, Y.; XIA, H.; SUN, H. Recent developments in superhydrophobic surfaces with unique structural and functional properties. **Royal Society of Chemistry**, v. 8, p. 11217–11231, 2012.

ZHENG, Y.; GAO, X.; JIANG, L. Directional adhesion of superhydrophobic butterfly wings. **Soft Matter**, v. 3, n. 2, p. 178, 2007.

ZHU, H.; GUO, Z.; LIU, W. Adhesion behaviors on superhydrophobic surfaces. **Chemical communications (Cambridge, England)**, v. 50, n. 30, p. 3900–13, 2014. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24575424>>.