



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE MATERIAIS



ENG 02298 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM REVESTIMENTO
BIOMIMÉTICO SUPERHIDROFÓBICO BASEADO NA PLANTA
AQUÁTICA *SALVINIA CUCULLATA***

Ariane Oliveira de Araujo
160916

Orientador: Carlos Pérez Bergmann
Coorientador: Antonio Shigueaki Takimi

PORTO ALEGRE
2014

ARIANNE OLIVEIRA DE ARAUJO

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM REVESTIMENTO
BIOMIMÉTICO SUPERHIDROFÓBICO BASEADO NA PLANTA
AQUÁTICA *SALVINIA CUCULLATA***

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Carlos Pérez Bergmann
Coorientador: Antonio Shigueaki Takimi

PORTO ALEGRE

2014

AGRADECIMENTOS

À Lulu, Ju, Adams, Bruninha, Antonio, Ramau e Lauren por transformarem o LACER em um dos melhores lugares do mundo aos fins de semana e fazer do Cavanhas as e Cotiporã nossa segunda casa. À Lulu, minha irmã de coração. Ao Paulo por estar sempre disposto a me ajudar no laboratório. Aos amigos que conquistei e que me conquistaram.

À Fernanda, pelo apoio e carinho imensuráveis dedicados nesta fase tão difícil e complicada de minha vida. Por estar sempre presente e sempre compreensiva. Todo meu amor.

Ao professor/orientador/conselheiro, mas acima de tudo um grande amigo, Antonio Takimi, pela paciência, ajudar a sempre seguir em frente e por nunca se importar por ser incomodado por mim. Obrigada por acreditar em mim. Com certeza sua dedicação ao trabalho na pesquisa e na educação são inspiradores.

Agradeço também aos meus pais Jair e Joseane. Que desde que me conheço por gente têm sido os meus maiores incentivadores. Obrigada pela fé, investimento e preces. Se consegui esta vitória foi pela luta de vocês. Continuarei levando comigo o que tive de melhor: os ensinamentos de vocês.

Agradecimento especial aos meus irmãos Ana Julia, Andréa, Daniel e Gabrielle pelo amor, incentivo e paciência.

Ao Ramau, por toda a ajuda durante todo o projeto, que foi indispensável. E à Lauren, pelo grande apoio, atenção, sensibilidade e figuras bonitas para ilustrar minha tese. A ajuda e atenção de vocês foram cruciais para a conclusão deste trabalho. E ainda não agradei suficiente.

Ao professor Bergmann, por ter me acolhido no seu laboratório e acreditado em mim. Sem esta oportunidade, este trabalho não existiria.

Agradeço também ao Programa de Recursos Humanos da ANP (PRH) e à Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo apoio financeiro.

Finalmente, mas não menos importante, agradeço aos amigos e colegas da Gerdau pelo apoio, incentivo e compreensão para que eu tivesse tempo para concluir este trabalho.

RESUMO

O biomimetismo vem sendo muito utilizado para a evolução da ciência. Atualmente, existem muitos exemplos de estruturas e funções biológicas que têm servido, com sucesso, a outros campos da ciência e seus fins, no que se destaca a descoberta do denominado – e objeto do presente trabalho – Efeito Salvinia. A salvinia consiste numa samambaia aquática, cuja folha contém pelos recobertos com cristais de cera, que os torna hidrofóbicos, sendo que apenas a ponta desses pelos, por não possuírem esses cristais, são hidrofílicas. Por conta disso, a salvinia, quando está dentro d'água, tem a capacidade de reter uma camada de ar sobre sua superfície. Esta capacidade é de extremo interesse na área naval, pois com ela é possível reduzir o arraste hidrodinâmico e, conseqüentemente, o consumo de combustíveis, podendo até mesmo diminuir os gastos com a manutenção do navio, na medida em que obsta a corrosão, a bioincrustação e até mesmo o congelamento do casco. Através deste trabalho, buscou-se desenvolver uma superfície superhidrofóbica capaz de formar a referida camada de ar. Esse revestimento constitui-se de duas partes: uma base – formada por flocos – que lhe fornece rugosidade, a qual foi aplicada através do método de flocagem, e uma cobertura (hidrofóbica), composta por silano e aplicada via *spray*. Então, foram caracterizadas as propriedades do revestimento, para verificar sua eficácia na redução da força de atrito hidrodinâmico. Os revestimentos biomiméticos superhidrofóbicos desenvolvidos neste trabalho possibilitaram uma redução na força de atrito hidrodinâmico de até 20%.

Palavras-chaves: Efeito Salvinia. Superhidrofobicidade. Biomimetismo. Atrito Hidrodinâmico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático de uma gota com ângulo de contato θ_0	13
Figura 2 - Ângulo de contato com uma superfície lisa, modelo de Young.	14
Figura 3 - Ângulo de contato com uma superfície rugosa, modelo de Wenzel.....	15
Figura 4 - Ângulo de contato com uma superfície rugosa, modelo Cassie-Baxter. ...	16
Figura 5 - Pequena gota séssil em uma superfície sólida.	17
Figura 6 - As duas formas de medir a histerese (Deng, 2013).	18
Figura 7 - Esquema de gotas em superfícies com diferentes comportamentos de molhabilidade:	19
Figura 8 – Gotículas de água na folha de Lótus.	20
Figura 9 - Estrutura rugosa da folha de Lótus, recoberta por cera. (KOCH et al,2009)	21
Figura 10 - Esquema do Efeito-Salvinia: pressão normal à esquerda; já quando baixa a pressão (amarelo), as pontas hidrofílicas dos cabelos (vermelho) fixam nestes a interface ar-água e previnem a extração de bolhas de ar, conforme demonstrado à direita.....	21
Figura 11 - As três espécies de Salvinia que mantêm a camada de ar mesmo sobre pressão – à esquerda, habitat; à direita, as imagens MEV: (a) Salvinia cucullata; (b) Salvinia mínima; (c) Salvinia molesta. (Fonte: foto adaptada de MAYSER, 2014)...	22
Figura 12 – Fluxograma da metodologia desenvolvida (Fonte: Autor)	26

Figura 13 - Produto utilizado como referência no presente trabalho (Neverwet).....	27
Figura 14 - Desenho esquemático processo de flocagem.....	27
Figura 15 - Equipamento Goniômetro Digidrop (Fonte: Autor)	30
Figura 16 - Fotos do canal desenvolvido no laboratório para medir a força de atrito hidrodinâmico.....	31
Figura 17 - Comprimento médio dos flocos utilizados: Floco 1 e Floco 2, respectivamente (aumento 6.7x).....	32
Figura 18 – Imagens com aumento de 6.7x da altura dos revestimentos utilizados:	32
Figura 19 - Imagem de topo das amostras com revestimento: a) amostra F1 b) amostra F2, aumento 6.7x.....	33
Figura 20 - Ângulo de contato dos componentes do revestimento.....	34
Figura 21 - Gota sobre superfície rugosa exemplo Floco1.....	34
Figura 22 - Ângulo de contato médio dos revestimentos caracterizados.	35
Figura 23 - Gota sobre o revestimento SNW+F2.	36
Figura 24 - Substrato com o revestimento SNW+F1 e SHD+F1, respectivamente, ambos com camada de ar retida sobre sua superfície quando imerso em água.	36
Figura 25 - Ângulo de rolamento das amostras testadas.	37
Figura 26 - Valores do atrito hidrodinâmico empregados nos revestimentos testados.	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVO	11
2.1 OBJETIVOS GERAIS.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1 TENSÃO SUPERFICIAL.....	12
3.2 ÂNGULO DE CONTATO.....	13
3.2.1 Ângulo de Young	13
3.2.2 Wenzel	14
3.2.3 Cassie-Baxter	16
3.3 HISTERESE.....	16
3.4 MOLHABILIDADE	18
3.5 SUPERFÍCIES SUPERHIDROFÓBICAS E O EFEITO LÓTUS.....	19
3.5.1 Efeito Salvinia	21
3.6 REGULAMENTAÇÃO PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAVAL	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1 FLUXOGRAMA	25
4.2 PREPARO DOS SUBSTRATOS.....	26
4.3 DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO SUPERHIDROFÓBICO.....	26
4.3.1 Silano	28
4.3.2 Deposição do produto comercial	28
4.3.3 Desenvolvimento das amostras	28
4.4 MICROSCOPIA ÓTICA.....	29

4.5	ÂNGULO DE CONTATO.....	30
4.6	ÂNGULO DE ROLAMENTO	
4.7	MEDIÇÃO DA FORÇA DE ATRITO HIDRODINÂMICO.....	30
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1	ANÁLISE DOS FLOCOS POR MICROSCOPIA ÓTICA.....	31
5.1.1	Caracterização dos flocos depositados	31
5.2	ÂNGULO DE CONTATO.....	33
5.2.1	Componentes do revestimento	33
5.2.2	Revestimentos	34
5.3	ÂNGULO DE ROLAMENTO	37
5.4	AVALIAÇÃO DO ATRITO HIDRODINÂMICO	37
6.	CONCLUSÃO	39
7.	TRABALHOS FUTUROS.....	40
8.	BIBLIOGRAFIA	41

1. INTRODUÇÃO

A biomimética – do grego *bios* (vida) e *mímesis* (imitação) – consiste na ciência que visa estudar a natureza e buscar o que se pode aprender e desenvolver a partir dela para uso e aplicação em diversos fins de outras áreas da ciência.

Na história, existem muitos exemplos de modelos biomiméticos já desenvolvidos. Os mais conhecidos são o velcro (1948) – desenvolvido por um engenheiro a partir da observação de sementes de *Arctium*, dotadas de espinhos e ganchos que se prendiam nos pelos de seu cão – e o Efeito Lótus, que se constitui num processo de auto-limpeza, resultado da existência de estruturas nanométricas na superfície das folhas da flor de Lótus. Ademais, outro exemplo – esse mais recente – de inspiração a partir da natureza é o Efeito Salvinia (ou *Salvinia Effect*).

A Salvinia molesta – um dos quatro tipos de salvinia – é uma samambaia de água flutuante que desperta extremo interesse tecnológico (KOCH, 2009), tendo em vista que suas folhas, quando dentro d'água, são capazes de prender e manter uma camada estável de ar por longos períodos de tempo, a qual evita que elas fiquem úmidas e acabem afundando.

Isso se deve ao fato de que as folhas da Salvinia molesta apresentam uma morfologia bem peculiar, na medida em que seus pelos têm forma de pequenos 'batedores de ovos', os quais vêm recobertos por cristais de cera nanométricos (que os torna hidrofóbicos), sendo que a ponta superior do pelo é hidrofílica, pois não possui esta cera. Devido a isso, a Salvinia molesta consegue fixar a água na ponta dos pelos e manter o ar retida quando submersa.

Vários autores – como Barthlott (2010), Hunt e Bhushan (2011) –, aliás, têm estudado e procurado obter um mecanismo de retenção de ar que dure por longo tempo, visto o interesse tecnológico em descobrir superfícies com capacidade de retenção de ar, especialmente para fins de aplicação no setor naval, pois possuem a capacidade de reduzir o arraste hidrodinâmico quando utilizadas para o revestimento de navios e transporte de fluidos.

Com efeito, tem-se que a aplicação de um revestimento superhidrofóbico em cascos de navios, na medida em que promoveria a redução do atrito hidrodinâmico, poderia contribuir até mesmo com a redução dos custos com combustível, pois diminuiria a quantidade necessária de combustível por viagem, o que também acarretaria, por consequência, a redução na emissão dos gases causadores do efeito estufa, uma das mais significativas causas da degradação ambiental nos tempos atuais.

Nesse sentido, no tocante à questão da prevenção da poluição ocasionada por embarcações e à necessidade de promover maior eficiência energética no transporte marítimo, destaca-se a atuação da Organização Marítima Internacional – OMI (The International Maritime Organization – IMO) e uma de suas mais importantes convenções, a MARPOL (Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios), que trouxe a efeito, em 2013, a obrigatoriedade de realizar-se um cálculo do índice de eficiência energética (EEDI – Energy Efficiency Design Index) no curso do projeto para a construção de novos navios, bem como de elaborar um plano de gestão de eficiência energética (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP).

E, conforme já referido, é também nesse ponto que reside a importância da tecnologia a ser desenvolvida pela obtenção de um revestimento superhidrofóbico capaz de reter uma camada de ar e suas possíveis e potenciais aplicações no setor naval, a fim de que, assim, mais do que se adequar à regulamentação, os projetistas tenham em mãos uma solução eficiente no âmbito do gasto de energia, combustível e emissão de gases – sem falar no fato de que esse revestimento obsta também a corrosão e a bioincrustação (o que igualmente reduz o atrito hidrodinâmico e o custo de manutenção dos cascos dos navios), bem como serve para impedir o acúmulo de gelo nos casos de navios que trafegam em regiões muito frias.

Não restam dúvidas, portanto, acerca dos benefícios que a tecnologia que constitui objeto do presente estudo pode trazer ao setor naval, seja em termos de diminuição nos custos de operação e manutenção dos navios, seja para fins de adequação às normas estipuladas pelas organizações competentes quanto à sustentabilidade e à patente necessidade de proteção e preservação ambiental.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho é estudar e avaliar formas inovadoras de mimetizar a estrutura da planta *Salvinia Cucullata* em substratos de engenharia, na forma de um revestimento superhidrofóbico, e avaliar a sua capacidade de redução do atrito hidrodinâmico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Propor metodologias para a mimetização da estrutura superficial da planta *Salvinia Cucullata*;
- Realizar um tratamento superficial com silanos para promover uma redução na molhabilidade;
- Caracterizar os revestimentos desenvolvidos com respeito ao seu ângulo de contato e ângulo de rolagem com a água;
- Avaliar a capacidade de redução do atrito hidrodinâmico em escala laboratorial.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TENSÃO SUPERFICIAL

A tensão superficial pode ser definida como a força por unidade de comprimento (medida por N/m) e, ainda, como a energia livre por unidade de área da superfície – esta, aliás, que consiste numa importante característica de cada superfície ou interface.

Com efeito, a energia das moléculas que se encontram na superfície difere da energia daquelas moléculas que estão no interior do material, sendo aquela significativamente mais elevada. Ou seja, as superfícies são regiões que sempre apresentam maior energia quando comparadas ao volume total, sendo essa energia adicional chamada de energia livre de superfície ou interface – medida pela relação energia por unidades de área (J/m^2).

No aspecto termodinâmico, os conceitos de tensão superficial, de força de tensão superficial, de densidade de energia de superfície e de energia livre de superfície são diversos; equivalem-se, todavia, na maioria dos casos em que se estudam superfícies hidrofóbicas ou superhidrofílicas, nas quais a temperatura e a pressão são constantes. Não havendo adsorção nas interfaces, é possível pressupor que a tensão superficial equivale à energia livre (YAN, 2011).

A fim de obter uma superfície hidrofóbica, a área seca deve apresentar menor energia de superfície do que a área molhada, de modo que a gota depositada sobre a superfície hidrofóbica espontaneamente assumira uma forma mais esférica para minimizar sua energia, promovendo-se a superfície de líquido - ar.

Além disso, a rugosidade da superfície pode dar à energia de superfície um efeito de amplificador, fazendo com que uma gota de líquido forme elevado ângulo de contato sobre uma superfície áspera de baixa energia e um baixo ângulo de contato sobre uma superfície áspera de alta energia (YAN, 2011).

3.2 ÂNGULO DE CONTATO

O ângulo formado entre a tangente do contorno da superfície da gota e a interface líquido/sólido – como ilustra a Figura 1 – é chamado de ângulo de contato aparente. Localiza-se, portanto, entre as retas que tangenciam as interfaces líquido - gás e sólido-líquido, tratando-se do único ponto em que todos os três meios (líquido, sólido e gás) entram em contato (LUZ *et al*, 2008).

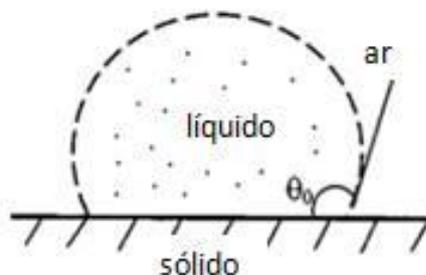


Figura 1 – Desenho esquemático de uma gota com ângulo de contato θ_0 (BHARAT BHUSHAN, 2011).

O ângulo de contato é o critério mais usado para representar o grau de molhabilidade de uma superfície, existindo diversas formas de medir-se seu valor dependendo do tipo de rugosidade da superfície e as tensões superficiais que ela sofre (LUZ *et al*, 2008): nos casos em que a gota estiver em contato com superfícies lisas, mede-se o valor do ângulo a partir da denominada equação de Young; já quando a superfície for rugosa, por Wenzel ou Cassie Baxter.

3.2.1 Ângulo de Young

A gota de água está sujeita a um equilíbrio termodinâmico que abrange as três fases envolvidas (vapor, sólido, líquido) e o valor do ângulo depende das energias envolvidas no sistema. Segue abaixo a equação de Young, que relaciona essas energias:

(Equação 1)

Onde γ_{lv} é a tensão líquido-vapor, γ_{sv} é tensão sólido-vapor e γ_{sl} é a tensão superficial sólido-líquido.

Na Figura 2 está representada uma superfície lisa em contato com uma gota, suas respectivas tensões superficiais e o ângulo de contato.

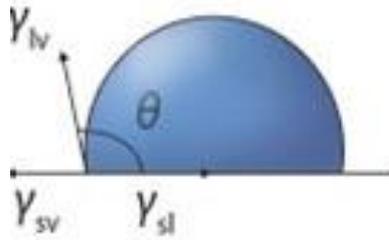


Figura 2 - Ângulo de contato com uma superfície lisa, modelo de Young.

(Fonte: Adaptado do site: <http://www.nature.com>)

Com a equação de Young, podemos determinar de uma forma simples o ângulo de contato de uma superfície lisa, apenas relacionando os valores de tensão superficial.

3.2.2 Wenzel

Wenzel foi o primeiro a propor um modelo que considera a influência da rugosidade na molhabilidade de uma superfície sólida (WENZEL, 1936). Ele estudou o efeito da rugosidade nas superfícies e concluiu que “o efeito da rugosidade é aumentar as propriedades de molhabilidade do sólido” (WENZEL, 1936). O modelo Wenzel é usado para superfícies rugosas nas quais a gota penetra por entre as asperezas que caracterizam a superfície (Figura 3).

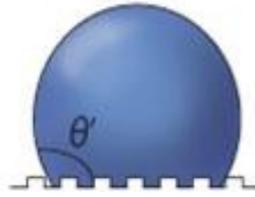


Figura 3 - Ângulo de contato com uma superfície rugosa, modelo de Wenzel.

(Fonte: Adaptado do site: <http://www.nature.com>)

No seu trabalho, Wenzel, caracterizou esse tipo de superfície pelo fator de rugosidade “ r ”, que se calcula a partir da razão entre a área real da superfície dividida pela sua projeção, isto é:

(Equação 2)

Este fator, registre-se, sempre será maior ou igual a 1.

Por área real, supomos a possibilidade de uma superfície ser esticada de forma a não existir nenhuma aspereza, ou seja, tornar-se lisa, enquanto a área projetada é a área da superfície antes de ser esticada (rugosa).

Em superfícies rugosas a área real sempre será maior que a projetada (WENZEL, 1936).

Com o acréscimo da rugosidade na superfície, há uma mudança nas tensões superficiais totais, sendo que, substituindo essas novas tensões na equação de Young, temos:

(Equação 3)

Esta é a equação de Wenzel para medir-se o ângulo de contato neste tipo de superfície.

3.2.3 Cassie-Baxter

Alguns anos mais tarde, Cassie e Baxter (1944), sugeriram um novo modelo para descrever ângulos de contato, o qual se baseia na hipótese de que a gota que está na superfície rugosa não penetre nas cavidades, formando uma camada de ar entre superfície e gota (CASSIE E BAXTER, 1944), como demonstrado na Figura 4.

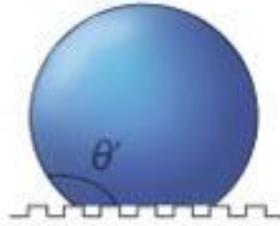


Figura 4 - Ângulo de contato com uma superfície rugosa, modelo Cassie-Baxter.

(Fonte: Adaptado do site: <http://www.nature.com>)

De acordo com os dados bibliográficos o ângulo de contato difere para cada espécie que constitui uma superfície, ou seja, cada espécie apresenta características próprias, sendo assim seus ângulos são desiguais (BHUSHAN, 1999, 2002, 2011a; NOSONOVSKY E BHUSHAN, 2008a). A partir esta afirmação os teóricos Cassie –Baxter (1944) chegaram a seguinte à equação:

(Equação 4)

Onde f indica a parte da superfície a que a gota entra em contato.

Então, para obtemos superfícies superhidrofóbicas, considerando os modelos de Wenzel e Cassie-Baxter, devemos utilizar um material com rugosidade singular e um ângulo de contato muito elevado.

3.3 HISTERESE

Enquanto uma gota está se acomodando a uma superfície, o ângulo de contato tem um comportamento significativamente ativo e, apesar de ser fácil medi-lo, existe uma gama de fatores que pode influenciar na sua interpretação

(EXTRAND, 2004). Um exemplo é que geralmente existem dois ângulos estáveis na superfície.

Se a uma determinada gota for adicionada mais água, conforme ilustra a Figura 3, o ângulo de contato eleva-se, a partir do que se terá o conhecido ângulo de avanço (). Por outro lado, se retirarmos água da gota, o ângulo retrai – ângulo de recuo ().

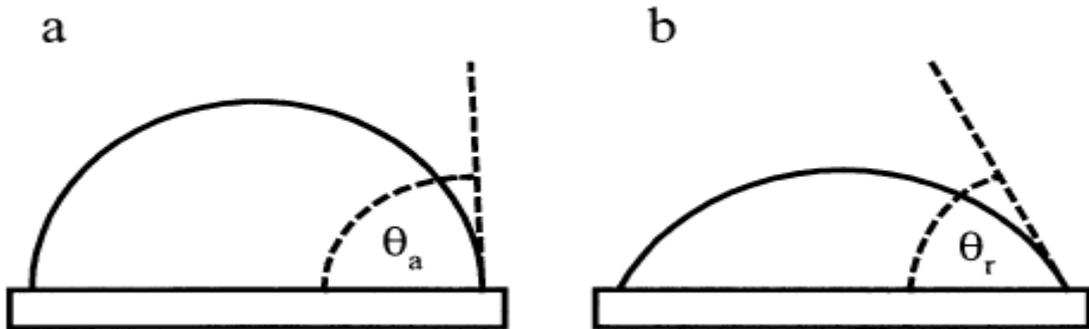


Figura 5 - Pequena gota séssil em uma superfície sólida.

(a) Quando o líquido é adicionado, a linha de contato avança e apresenta um ângulo de avanço (θ_a). (b) Em oposição, caso o líquido seja removido da gota, o ângulo de contato diminui para um valor de recuo ().

(Fonte : EXTRAND, 2002).

A histerese do ângulo de contato (é conhecida como a diferença entre o ângulo de avanço e o ângulo de recuo. Vários estudos demonstram que a histerese ocorre devido à rugosidade superficial e heterogeneidades (BHUSHAN, 2012).

Existem duas formas de medir a histerese. A primeira é aumentando e diminuindo o volume da gota – nos termos do que foi descrito acima. A segunda, por sua vez, é colocando a gota em um plano inclinado – quando, então, se terá um ângulo de deslize. Na Figura 6 vêm demonstradas estas duas formas de medição, respectivamente.

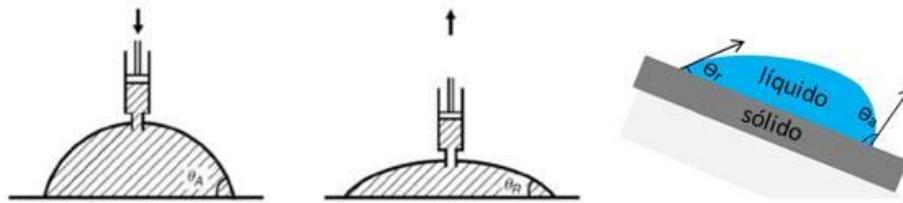


Figura 6 - As duas formas de medir a histerese (Deng, 2013).

Aliás, a estrutura da superfície do plano interfere no ângulo de deslize - assim como no ângulo de contato -, motivo pelo qual a gota d'água sobre uma superfície lisa apresentará comportamento diverso de quando estiver sobre uma superfície rugosa estruturada nos estados Cassie ou Wenzel. A respeito, os resultados dos experimentos demonstram que, entre a superfície lisa e a superfície estruturada no estado Cassie, a gota desliza mais facilmente nesta última, em virtude da menor área de contato da gota com a superfície, decorrente do ar preso entre as cavidades. Por outro lado, na superfície do tipo Wenzel, as gotas não deslizam, na medida em que elas, até mesmo quando se eleva significativamente o valor do ângulo de inclinação, acabam presas nas cavidades da superfície.

A partir disso, conclui-se que o ângulo de deslize relaciona-se também à histerese da gota em face da superfície sobre a qual for depositada. Na superfície estruturada no estado Cassie, sobre a qual, segundo já referido, a gota desliza com maior facilidade, os valores de histerese apresentados são mais baixos.

Assim, conforme explica Patankar (2004), um grande ângulo de contato entre a gota e a superfície rugosa - ou seja, superhidrofóbica -, bem como a facilidade da gota para mover-se sobre essa superfície (baixa histerese), constituem elementos essenciais às aplicações da superhidrofobicidade.

3.4 MOLHABILIDADE

Molhabilidade consiste na propriedade que permite aferir a capacidade que possui um líquido para aderir-se a uma determinada superfície sobre a qual venha a ser depositado, ou seja, sua capacidade para efetivamente molhar a superfície. Com efeito, tem-se que, quanto maior o ângulo de contato () entre o líquido e a superfície, menor é a capacidade daquele para molhá-la.

Conforme ilustrado pela Figura 5, é possível classificar as superfícies, segundo sua propensão à molhabilidade, em quatro categorias: primeiramente, uma superfície superhidrofílica – completamente molhável – é aquela cujo ângulo de contato apresenta valor menor que 10° (a); já a superfície hidrofílica apresenta o referido ângulo de contato em valor maior que 10° e menor que 90° (b); por sua vez, o ângulo de contato do líquido com uma superfície hidrofóbica pode variar entre 90° e 150° (c); finalmente, a superfície superhidrofóbica, sobre a qual o líquido não apresentará molhabilidade, caracteriza-se pelo ângulo de contato maior do que 150° (d) (MAYSER, 2013).

Veja-se a seguir:

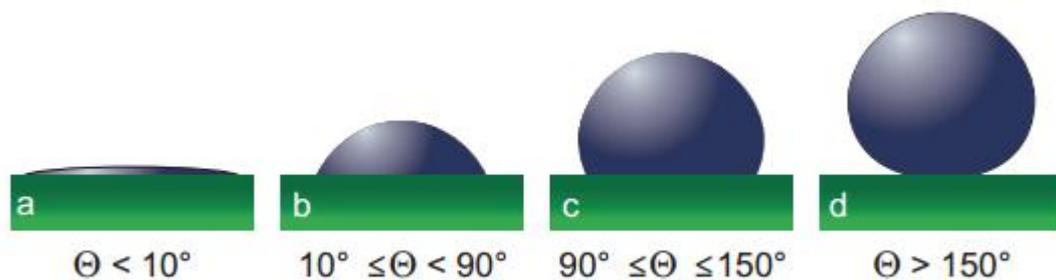


Figura 7 - Esquema de gotas em superfícies com diferentes comportamentos de molhabilidade:

a) superhidrofílica; b) hidrofílica; c) hidrofóbica; d) superhidrofóbica.

(Fonte: MAYSER, 2013).

3.5 SUPERFÍCIES SUPERHIDROFÓBICAS E O EFEITO LÓTUS

As superfícies superhidrofóbicas – que resultam de um melhoramento das propriedades hidrofóbicas por conta da rugosidade da superfície –, cujo ângulo de contato com o líquido, segundo já referido, é superior a 150° , despertam importante interesse nos setores biológico e industriais, na medida em que apresentam propriedades autolimpantes.

Nesse sentido, registra-se que, já na década de 1970, Barthlott estudava o que viria ser posteriormente registrado como Efeito Lótus, que envolve superhidrofobicidade e propriedade auto-limpante e pode ser explicado do seguinte modo: as folhas de Lótus sagrada são capazes de repelir as gotas d'água, fazendo

com que elas deslizem sobre sua superfície e acabem por carregar consigo as sujeiras nela depositadas (Figura 8), promovendo, ao fim e ao cabo, a limpeza dessa superfície.

As folhas de Lótus apresentam essa capacidade por conta da combinação de uma rugosidade micrométrica e a existência de uma camada de cera com escala nanométrica que, atuando em conjunto, reduzem a aderência das gotas d'água em determinada superfície. Ademais, a cera provoca a baixa energia de superfície – tornando-a hidrofóbica – e, somada à retenção de ar entre as cavidades da superfície, dá-se origem à superhidrofobicidade e tornam-na auto-limpante.

Nesse mesmo sentido, segundo Sajadinia e Sharif (2010), é de fato essa rugosidade em estrutura dupla (em micro e nano escala) que origina a capacidade de repelência à água, pois é o que faz aumentar o ângulo de contato entre a gota e a superfície.

À Figura 8, observam-se gotas d'água sobre a superfície de uma folha de Lótus. Já a Figura 9 demonstra a superfície rugosa da folha recoberta por cera.

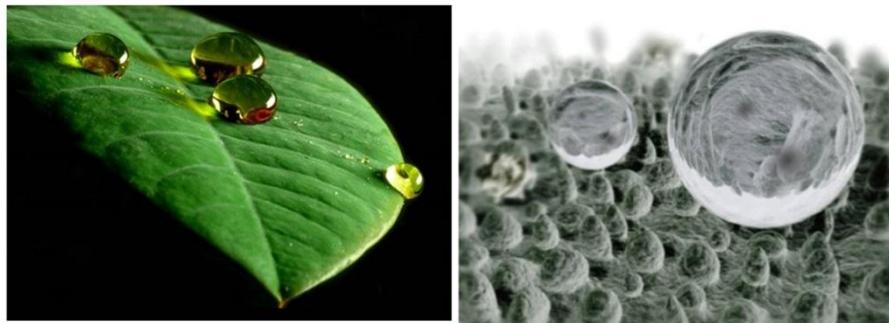


Figura 8 – Gotículas de água na folha de Lótus.
(Fonte: Adaptado do site: <https://cienciasetecnologia.com>)

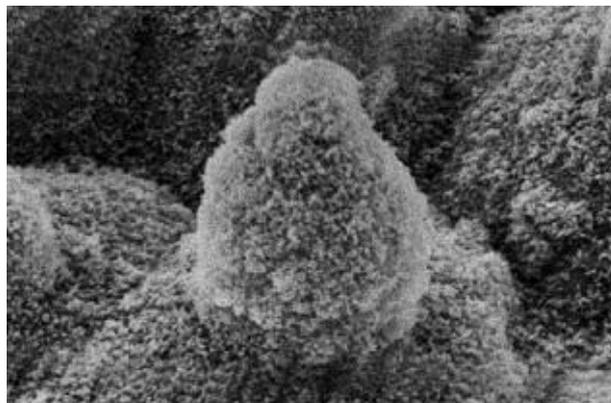


Figura 9 - Estrutura rugosa da folha de Lótus, recoberta por cera. (KOCH et al,2009)

3.5.1 Efeito Salvinia

Em pesquisas de sistemas de microfluidos, transporte de fluidos à longa distância e mesmo para cascos de navios, o uso de superfícies hidrofóbicas que reduzam o arrasto está atualmente em destaque. Com efeito, já foram desenvolvidas muitas superfícies/revestimentos que conseguiram uma alta redução de arraste por meio da superhidrofobicidade, microrugosidade e nanorugosidade. Contudo, no mais das vezes, esses revestimentos não apresentavam grande capacidade de manter-se em regimes turbulentos (BARTHLOTT, 2010).

Então, Barthlott *et. al.*, a partir do estudo quanto às propriedades da samambaia Salvinia molesta, logrou descobrir uma solução para este problema.

A superfície da folha da Salvinia molesta é coberta por estruturas parecidas com pelos multimoleculares. Estes pelos possuem componentes hidrofílicos em suas terminações (BARTHLOTT, 2010), sendo que a combinação de pontos hidrofílicos sobre superfícies hidrofóbicas fornece um conceito promissor para o desenvolvimento de um revestimento com propriedades de retenção de ar em longo prazo (BARTHLOTT, 2010).

Assim, os autores mostraram que as terminações hidrofílicas ajudam a estabilizar as camadas de ar em condições de turbulência e cenários de baixa pressão – Figura 10 (MAYSER, 2013).

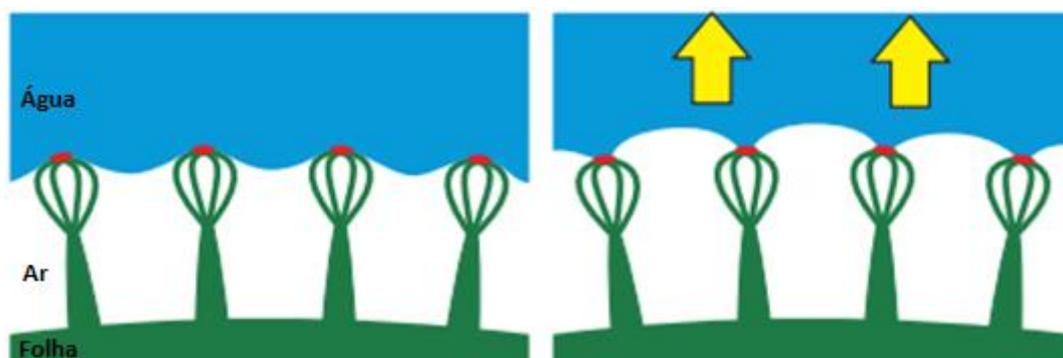


Figura 10 - Esquema do Efeito-Salvinia: pressão normal à esquerda; já quando baixa a pressão (amarelo), as pontas hidrofílicas dos cabelos (vermelho) fixam nestas a interface ar-água e previnem a extração de bolhas de ar, conforme demonstrado à direita.

(Fonte: BARTHLOTT et al., 2010)

Assim, a partir de tudo isso deu-se origem ao denominado Efeito Salvinia (do inglês: *Salvinia effect*), que abre perspectivas interessantes para a concepção de superfícies artificiais que apresentem capacidade de retenção de ar a longo prazo.

Nas espécies de Salvinias, existem quatro tipos diferentes de tricomas descritos (BARTHLOTT *et al.*, 2009), dos quais somente três são capazes de manter uma camada de ar em pressão relevante para cascos de navios: salvinia cucullata, Salvinia mínima e Salvinia molesta, todas elas representadas à Figura 11. (MAYSER, 2014).

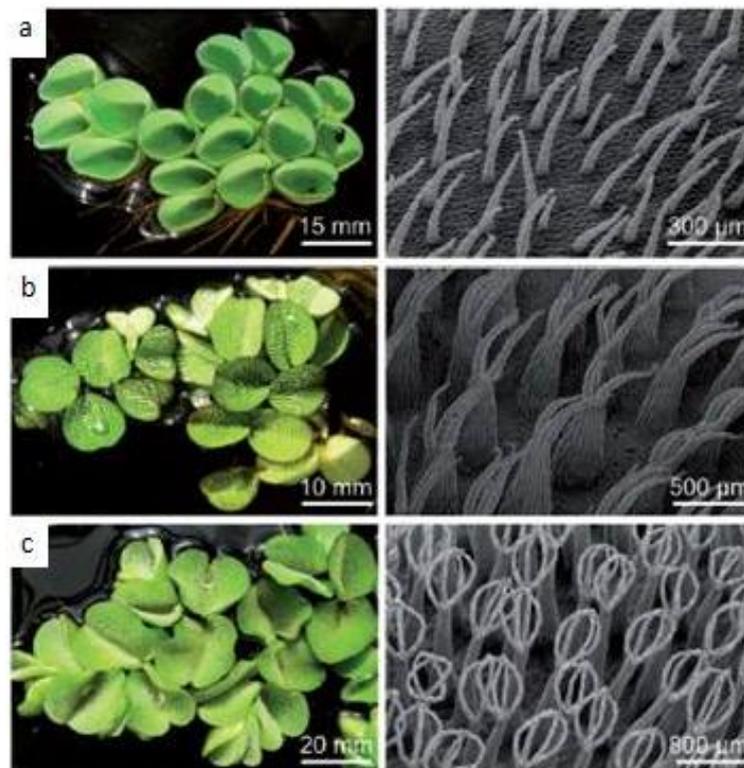


Figura 11 - As três espécies de Salvinia que mantêm a camada de ar mesmo sobre pressão – à esquerda, habitat; à direita, as imagens MEV: (a) *Salvinia cucullata*; (b) *Salvinia mínima*; (c) *Salvinia molesta*. (Fonte: foto adaptada de MAYSER, 2014).

3.6 REGULAMENTAÇÃO PARA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAVAL

É evidente que, conforme passam os anos, a preocupação quanto à necessidade de proteção e preservação do meio ambiente mostra-se cada vez mais presente, sendo constantemente promovidas políticas públicas e ações em diversas esferas governamentais e não-governamentais a fim de tratar de uma das maiores

causas da degradação ambiental nos dias atuais: a emissão dos gases causadores do efeito estufa.

Quanto à prevenção da poluição ocasionada por embarcações, constitui responsabilidade da Organização Marítima Internacional - OMI (The International Maritime Organization - IMO) tratar a respeito, sendo esta uma agência especializada vinculada à Organização das Nações Unidas (ONU), criada em 1948 em Genebra, contando hoje com 167 países membros, incluindo o Brasil desde 1963.

Conforme dados publicados pela OMI em 2009, 2,7% das emissões mundiais de CO₂ são imputados à navegação comercial, especificamente aos transportes internacionais, havendo previsão de que este número aumente significativamente caso o setor continue a evoluir no atual ritmo. Por esse motivo, tem-se elevado cada vez mais a atenção mundial com a preservação ambiental e a promoção de melhorias na eficiência energética do setor, com a consequente redução da emissão dos gases de efeito estufa.

Com efeito, uma das mais importantes convenções promovidas pela OMI é a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição Causada por Navios (MARPOL), concluída em Londres no ano de 1973 e entrando em vigor em 1983, sendo ratificada no Brasil através do Decreto nº 2.508, de 04 de março de 1998.

Tal convenção recebeu algumas emendas e anexos no decorrer dos anos, cumprindo destacar que, por meio de resolução publicada em maio de 2005, entrou em vigor o Anexo VI à referida Convenção, que tem por objeto, conforme consta em seu próprio título, estabelecer *Regras Para A Prevenção Da Poluição Do Ar Por Navios* (IMO - www.ccaimo.mar.mil.br), e foi a partir dela que houve um significativo impulso nos estudos e pesquisas destinados a desenvolver tecnologias capazes de promover melhoras na eficiência energética.

Com efeito, restaram aprovadas, em maio de 2013, emendas a essas regulações do Anexo VI, uma das quais tornou obrigatório o cálculo do índice de eficiência energética – ou *Energy Design Index* (EEDI) – em todos os novos projetos de navios a serem construídos, assim como a elaboração de um plano de gestão de eficiência energética (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP).

Outrossim, recentemente, durante a sessão realizada no Comitê de Proteção ao Meio Ambiente Marinho de nº 67 em outubro de 2014, foram divulgados novos dados obtidos a partir do terceiro estudo promovido pela OMI. Segundo o

estudo, estima-se que, até 2050, considerando o atual cenário que se apresenta, as emissões de CO₂ pelo transporte marítimo internacional aumentem entre 50% a 250% (IMO - www.ccaimo.mar.mil.br).

Assim, complementando as medidas que já haviam sido fixadas na sessão de nº 65, realizada em 2013 pelo mesmo Comitê, foram estabelecidas outras providências a serem adotadas para reduzir as emissões, sendo novamente impulsionada a pesquisa tecnológica no setor.

E foi nesse contexto que cresceu o interesse em estudar e projetar novas maneiras de diminuir o atrito hidrodinâmico, na medida em que o resultado mais imediato dessa redução, no âmbito da eficiência energética no setor naval, é a diminuição do gasto de combustível por viagem – e, conseqüentemente, por óbvio, a menor emissão dos gases.

Inicialmente, cumpre referir já ter sido desenvolvida a chamada lubrificação por ar, que consiste na manutenção de um filme de ar ou uma camada de bolhas junto à superfície do casco do navio, mediante bombeamento de ar comprimido. O problema enfrentado, contudo, correspondia ao fato de que a redução dos custos operacionais decorrentes da diminuição do atrito hidrodinâmico não cobria os altos investimentos necessários para a implantação do sistema de bombeamento, e tampouco os custos para sua devida operação e manutenção (CECCIO & MÄKIHARJU, 2012).

Então, a possibilidade de formar essa camada de ar a partir do estudo e aproveitamento das estruturas e propriedades descobertas em plantas cujas superfícies são superhidrofóbicas – especialmente a *Salvinia molesta*, por conta de sua grande capacidade de reter ar em sua estrutura – surgiu como uma alternativa à lubrificação de ar comprimido cujo custo apresenta-se substancialmente mais acessível.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada foi dividida em etapas conforme apresentado na Figura 12. A primeira trata-se da limpeza dos substratos. As etapas seguintes (segunda e terceira) compreendem as aplicações dos revestimentos de base e silano. Por fim, a última etapa caracteriza as amostras desenvolvidas.

4.1 FLUXOGRAMA

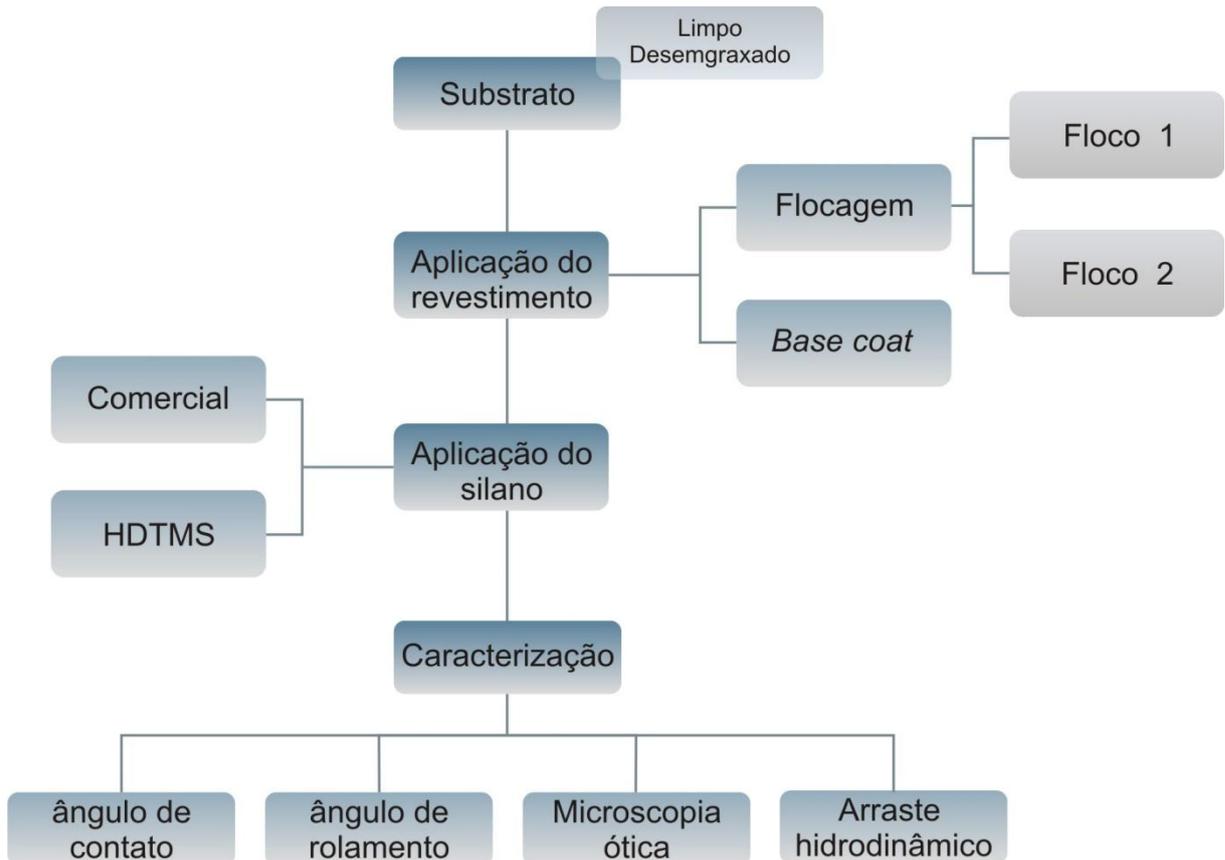


Figura 12 – Fluxograma da metodologia desenvolvida (Fonte: Autor)

4.2 PREPARO DOS SUBSTRATOS

Os substratos utilizados para a confecção das amostras foram placas de vidro sodo-cálcico, com dimensões 3 x 3 x 0,2 cm. Para garantir uma superfície livre de sujidades e óleo, visando evitar prejuízos à adesão do revestimento, as placas foram previamente desengraxadas com detergente e água, sendo posteriormente submetidas a banho de acetona em equipamento de ultrassom durante 10 minutos. Após, foram secas na estufa a 100°C.

4.3 DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO SUPERHIDROFÓBICO

O revestimento desenvolvido para se obter uma superfície superhidrofóbica compõe-se de duas partes: uma base, que fornece a rugosidade necessária, feita com microflocos de nylon; e uma segunda camada hidrofóbica, na qual se utilizou silanos. Como referência, foi utilizado o produto comercial *Neverwet* (Figura 13).



Figura 13 - Produto utilizado como referência no presente trabalho (Neverwet).

Os microflocos foram aplicados no substrato através do processo de flocagem. Esta técnica consiste na aplicação direta de pequenas fibras sobre qualquer substrato no qual antes se tenha aplicado um adesivo ou cola. Estas fibras são fixadas perpendicularmente à superfície do material através da intervenção de um campo eletrostático, como no sistema representado na Figura 14.

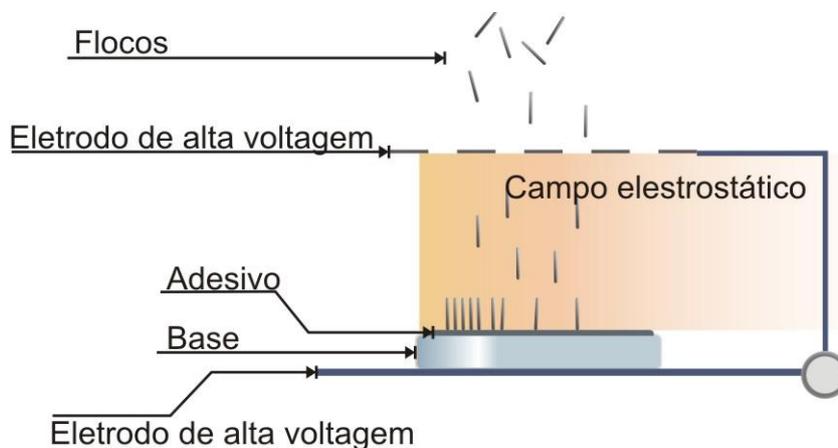


Figura 14 - Desenho esquemático processo de flocagem.
(Fonte: adaptado de www.dynaox.com)

O aparelho de flocagem foi ligado a uma folha de alumínio, a qual foi posta abaixo do substrato para que o campo eletroestático se formasse. Antes de começar a deposição do revestimento, aplicou-se uma cola (marca Acrilex) do tipo verniz sobre o substrato. Após a aplicação dos microflocos, a cola foi deixada secar ao ar livre por 12h antes de serem utilizados nos testes.

Como variante, foram testados dois flocos diversos: o floco da marca Flocar, denominado Floco 1 (F1) e o floco da marca WoodLand Scenics, denominado Floco 2 (F2).

4.3.1 Silano

Foi utilizado o silano Hexadecyltrimethoxysilane (HDTMS) – da marca Aldrich – para fazer a segunda camada do revestimento. Foi necessário hidrolisar o silano antes da sua aplicação.

Para a hidrolise, fez-se uma solução de água e etanol (95%/5% em peso), ajustando o pH em 4,5-5 com ácido acético. Depois, foi adicionado 2% em volume de HDTMS e agitado por 10min (ARKLES, 2011).

Após a hidrolise, o silano foi aplicado nas amostras via spray, mediante a utilização de uma pistola de pintura do tipo aerógrafo. Em seguida, as amostras foram colocadas na estufa por 30 minutos para que o silano terminasse de condensar.

4.3.2 Deposição do produto comercial

A deposição do revestimento de referência foi realizada conforme as instruções do fabricante.

Tanto o *Base Coat* quanto o *Top Coat* foram aplicados com jatos contínuos e longos. O *Base Coat* consiste em uma solução de PP, 5%wt e o *Top Coat* em uma solução de silicones e dimetilsiloxanos (*RUST-OLEUM*, 2014).

4.3.3 Desenvolvimento das amostras

Nesta etapa dois tipos de silanos foram testados (HDTMS e o comercial) e três tipos de base (Floco 1, Floco 2 e o *Base Coat* comercial).

Segue abaixo a tabela com a composição das amostras caracterizadas (Tabela 1), sendo que de todas elas foram feitas triplicatas.

Tabela 1 - Composição das amostras

Amostra	Descrição
SHD	Somente silano HDTMS
SNW	Somente silano comercial
PNW	Somente o <i>Base Coat</i>
F1	Somente Floco 1
F2	Somente Floco 2
PNW+SNW	Produto comercial
PNW+SHD	<i>Base Coat</i> e silano HDTMS
F1+SNW	Floco 1 e silano comercial
F2+SNW	Floco 2 e silano comercial
F1+SHD	Floco 1 e silano HDTMS
F2+SHD	Floco 2 e silano HDTMS

4.4 MICROSCOPIA ÓTICA

Para a caracterização da morfologia, comprimento médio dos flocos, e a altura dos revestimentos, foi utilizado um microscópio estereoscópico Olympus SZ61 equipado com câmera digital. A análise das imagens foi realizada com a utilização do software *ImageJ*.

A determinação da altura dos revestimentos foram feita através da análise de 15 pontos diferentes da seção transversal dos revestimentos depositados, a fim de calcular a altura média.

Além disso, também foi medido o comprimento médio de cada um dos tipos de flocos, a partir da análise de comprimento de 30 flocos de cada tipo (Floco 1 e Floco 2).

4.5 ÂNGULO DE CONTATO

As medidas de ângulo de contato das amostras foram realizadas através do método da gota séssil em temperatura ambiente. O equipamento utilizado para as medidas foi um goniômetro *Digidrop* (*Labometric*), modelo LB-DX (Figura 15).

Outrossim, utilizando o *software ImageJ* e o plugin *drop_analysis*, método LB-ADSA (STALDER, *et al.*, 2010), determinou-se o ângulo de contato das gotas depositadas sobre os diferentes revestimentos avaliados neste trabalho. O volume da gota foi padronizado e definido como 7 μ L.

Foram realizadas três medidas em cada amostra, obtendo-se ao final a respectiva média.

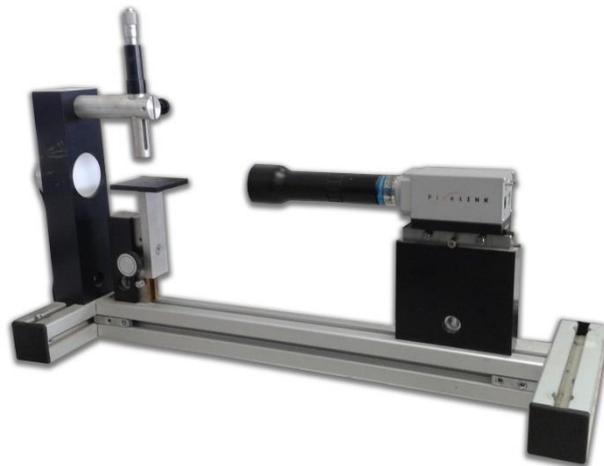


Figura 15 - Equipamento Goniômetro Digidrop (Fonte: Autor)

4.6 ÂNGULO DE ROLAMENTO

O ângulo de rolamento das gotas sobre os revestimentos superhidrofóbicos foi medido através de um goniômetro simples, empregando gotas de 7 μ L de água deionizada. Os valores mostrados representam a média aritmética obtida nos 5 ensaios realizados para cada amostra.

4.7 MEDIÇÃO DA FORÇA DE ATRITO HIDRODINÂMICO

Para se avaliar a capacidade de redução do atrito hidrodinâmico provocado pelo revestimento superhidrofóbico, a força de arrasto foi medida em um pequeno barco medindo 0,3m de comprimento e 0,12m de largura, com fundo plano e feito em resina melamínica.

Este barco foi colocado em um canal de fluxo medindo 2,50 x 0,19 x 0,2 m, cuja água foi mantida em circulação através de um sistema de bombeamento em circuito fechado, com uma vazão de aproximadamente 0.69 L/s. A profundidade do canal foi mantida a 0,025m, resultando em uma velocidade de fluxo de aproximadamente 0,19m/s.

O barco foi mantido estático no interior do canal através de um fio de nylon preso a um sistema de medição de força, composto por uma balança semi-analítica e um sistema de roldana e alavanca, visando transformar o movimento linear horizontal do barco em um movimento linear vertical. Uma representação esquemática deste aparato pode ser vista na Figura 16.



Figura 16 - Fotos do canal desenvolvido no laboratório para medir a força de atrito hidrodinâmico.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DOS FLOCOS POR MICROSCOPIA ÓTICA

5.1.1 Caracterização dos flocos depositados

A Figura 17 (a) e a Figura 17 (b) mostram que os flocos estudados apresentam tamanho na escala milimétrica.

De acordo com os dados obtidos através da análise de imagem pelo *software imageJ* o comprimento médio calculado para o Floco 1 foi 0,831mm, enquanto que para o Floco 2 o comprimento médio foi três vezes maior atingindo o valor de 2,705mm.

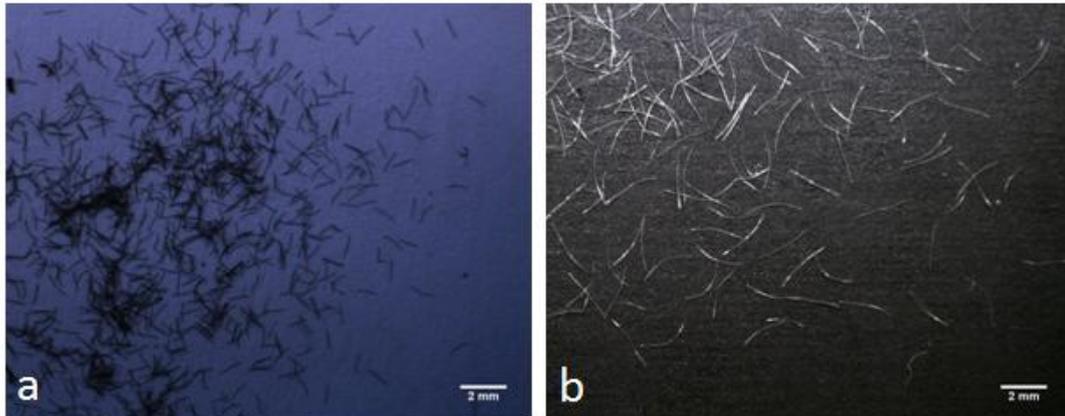


Figura 17 - Comprimento médio dos flocos utilizados: Floco 1 e Floco 2, respectivamente (aumento 6.7x).

Observa-se na Figura 17 (b) que o Floco 2 apresenta formato levemente curvado, enquanto que o Floco 1 apresenta formato mais retilíneo.

A Figura 18 (a) e a Figura 18 (b) mostram a altura dos revestimentos estudados. Infere-se apenas pela observação desta Figura uma disparidade entre as alturas do Floco 1 (Figura 18 a) e do Floco 2 (Figura 18 b). Essa disparidade foi avaliada com o uso do *software ImageJ* apresentando como resultado as alturas médias de 0,751mm para o Floco 1 e 2,393mm para o Floco 2.

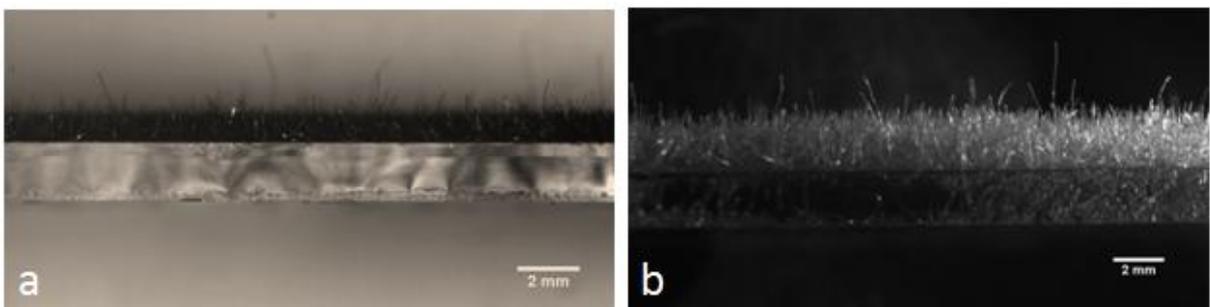


Figura 18 – Imagens com aumento de 6.7x da altura dos revestimentos utilizados: a) floco 1 e b) floco 2.

A Figura 19 (b) mostra que há espaços não preenchidos pelos flocos na superfície do substrato, isto pode estar associado a curvatura do Floco 2 já

observado nos tópicos anteriores. Porém o mesmo não se observou na Figura 19 (a) onde o substrato parece ser todo coberto pelos flocos.

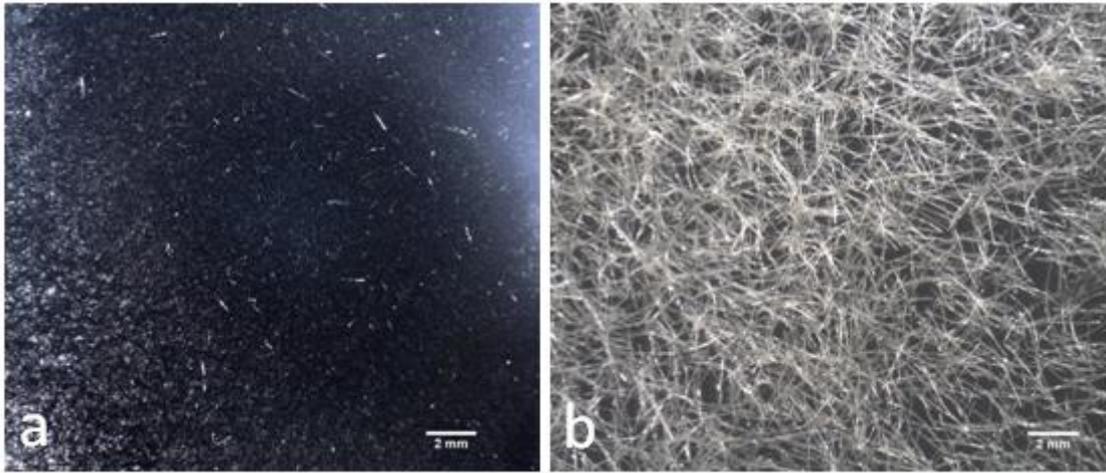


Figura 19 - Imagem de topo das amostras com revestimento: a) amostra F1 b) amostra F2, aumento 6.7x.

5.2 ÂNGULO DE CONTATO

5.2.1 Componentes do revestimento

Os componentes dos revestimentos superhidrofóbicos foram analisados separadamente, e apresentaram os seguintes valores de ângulo de contato, conforme ilustra a Figura 20.

Os resultados de ângulo de contato mostram que o valor medido para a amostra SHD é de 98° e está condizente com os encontrados da literatura (WANKHEDE *et al.*, 2012). Todos os componentes apresentados na Figura 20 são caracterizadas como hidrofóbicas, pois apresentam valores de ângulo de contato acima de 90° (MAYSER, 2013).

Para os Flocos 1 e 2, não foi possível medir o ângulo de contato devido a falta de uma metodologia específica para análise de superfícies rugosas como as desenvolvidas neste trabalho. Conforme se observa na Figura 21, não há a possibilidade de definir a linha base de medida do ângulo.

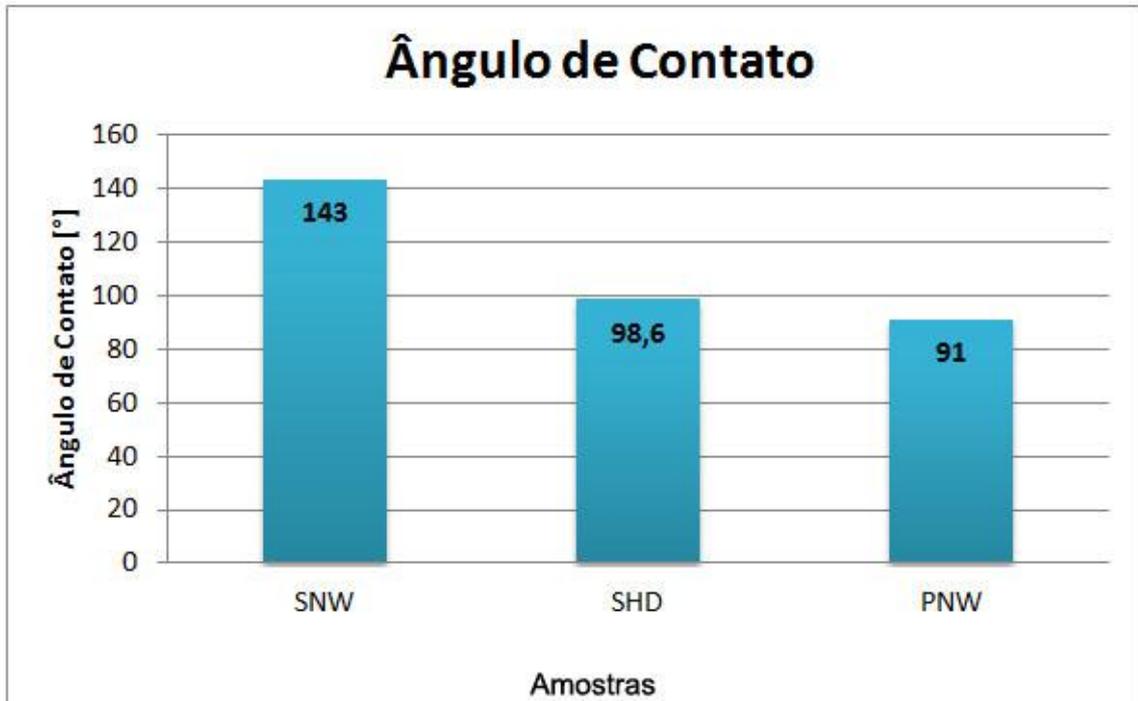


Figura 20 - Ângulo de contato dos componentes do revestimento.



Figura 21 - Gota sobre superfície rugosa exemplo Floco1.

5.2.2 Revestimentos

A Figura 22 ilustra o ângulo de contato para os revestimentos testados. Os dados obtidos mostram que o aumento de rugosidade, gerada pelos flocos, resulta em um aumento de ângulo de contato dos revestimentos. Este fato está de acordo com relatos da literatura (BARTHLOTT, 2010).

Observa-se na Figura 22 que para ambos os silanos testados, SHD e SNW, a base F1 apresentou os melhores resultados. As amostras que utilizam a base PNW também deram origem a revestimentos com ângulo contato superior em comparação com o silano isoladamente.

Em todos os casos se observa que o silano comercial SNW apresentou resultados superiores em relação ao silano SHD.

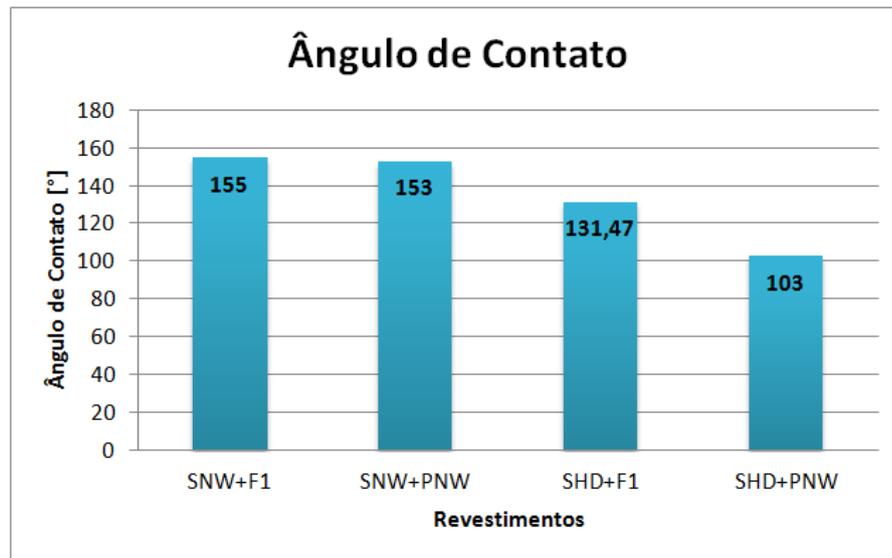


Figura 22 - Ângulo de contato médio dos revestimentos caracterizados.

As amostras que possuem como base os flocos F2, embora mantenham as gotas com formato praticamente esférico (Figura 23), não puderam ter seu ângulo de contato avaliado, pois além de não haver uma metodologia para medição de superfícies rugosas, o espaçamento entre os flocos é grande demais, fazendo com que as gotas fiquem alojadas nos espaços entre eles (Figura 23).

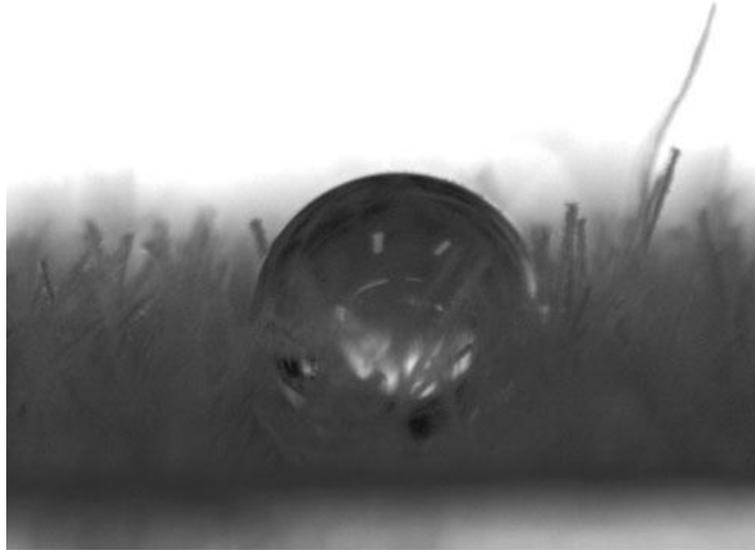


Figura 23 - Gota sobre o revestimento SNW+F2.

Embora os silanos testados apresentem disparidade entre os dados de ângulo de rolamento, foi possível observar para ambos silanos testados a formação de uma camada de ar sobre a superfície dos substratos, conforme se observa na Figura 24.

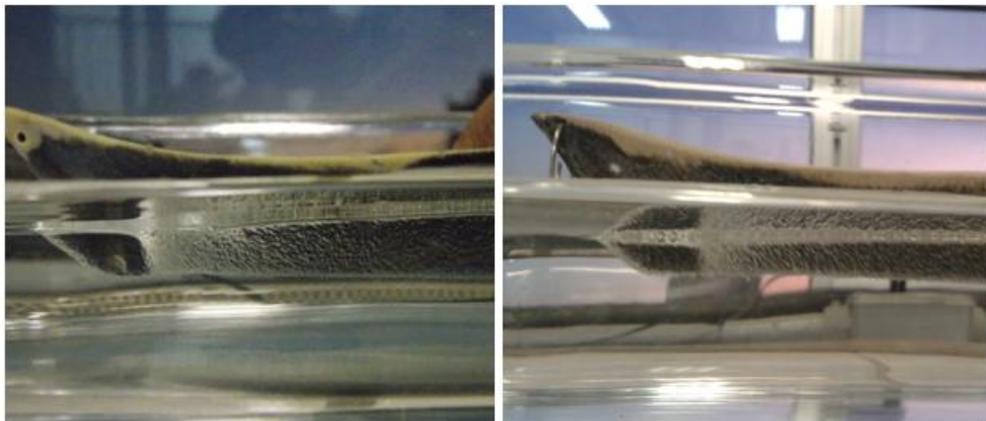


Figura 24 - Substrato com o revestimento SNW+F1 e SHD+F1, respectivamente, ambos com camada de ar retida sobre sua superfície quando imerso em água.

5.3 ÂNGULO DE ROLAMENTO

A Figura 25 apresenta o ângulo de rolamento das amostras testadas. Os dados obtidos para silano comercial (SNW) mostram que o acréscimo de rugosidade gera um aumento no ângulo de rolamento. Isso não afeta a propriedade de histerese destes revestimentos, na medida em que permaneceram com o ângulo de rolamento inferior a 10° , que constitui o valor necessário para superfícies superhidrofóbicas (Extrand, 2002). No entanto, a grande disparidade da amostra SNW + F1 para a amostra SNW+F2 pode ser justificado pelos espaços gerados devido leve curvatura dos Flocos 2. Ainda é possível inferir pela Figura 25 que o silano SHD mostrou um elevado ângulo de rolamento para as amostras desenvolvidas. Este fato pode estar relacionado a falta de homogeneidade das amostras durante o período de aplicação do produto.

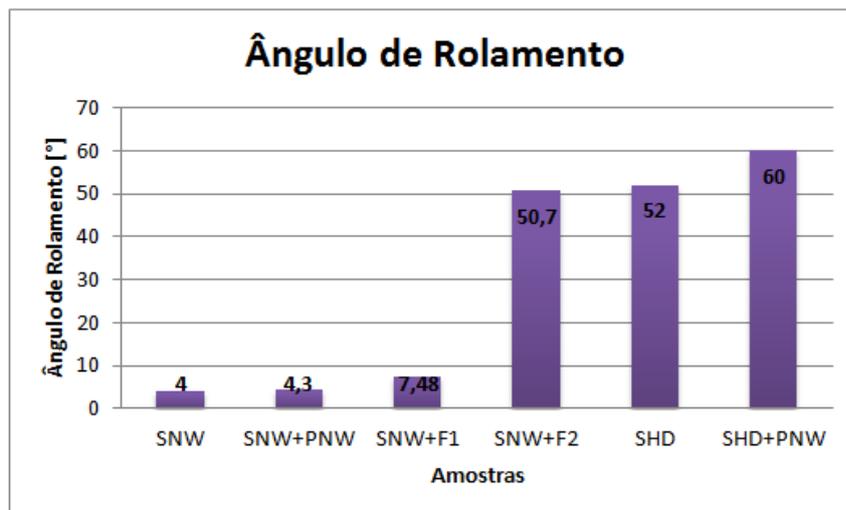


Figura 25 - Ângulo de rolamento das amostras testadas.

5.4 AVALIAÇÃO DO ATRITO HIDRODINÂMICO

A Figura 26 apresenta os percentuais de redução de arraste medidos durante os testes de atrito hidrodinâmico. Os ensaios realizados utilizaram somente a base com F1, isso se deve aos valores obtidos nos ensaios anteriores, onde a base F2 não se mostrou favorável para a realização de novos testes.

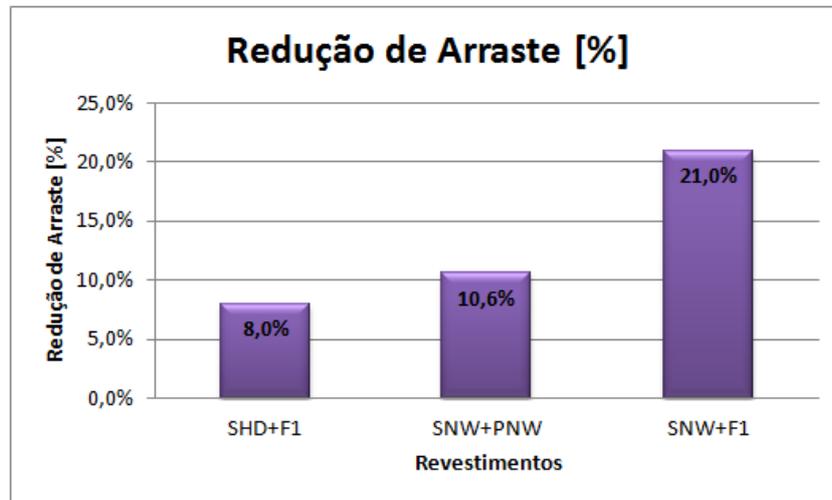


Figura 26 - Valores do atrito hidrodinâmico empregados nos revestimentos testados.

Os resultados obtidos mostram que o barco com o revestimento SNW+F1 obteve uma redução da força de arraste hidrodinâmico de 21%, o dobro de redução quando comparado com o barco com o revestimento SWN+PNW. Esta medida está dentro da faixa de valores encontrados na literatura, onde são relatados valores entre 9 e 50% de redução da força de arraste hidrodinâmico em superfícies superhidrofóbicas (HONGYU DONG, 2013 e BARTHLOTT *et al.*, 2010).

Para o revestimento com o silano SHD, os resultados reportados não se mostraram tão efetivos quanto com o silano comercial. No entanto, apresentou uma redução de 8% em relação à amostra sem revestimento.

A redução da força de arraste hidrodinâmica é atribuída a uma fina camada de ar que fica retida sobre a superfície, como mostrado na Figura 24, atuando como uma camada lubrificante que reduz o contato da água com a superfície tratada (BARTHLOTT, *et al.*, 2010).

6. CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se aferir as seguintes conclusões:

- É possível produzir um revestimento superhidrofóbico através da mimetização da estrutura superficial da planta *salvinia cucullata*.

- Com os silanos utilizados para o tratamento da superfície (silano comercial e o silano HDTMS), foi obtida uma redução na molhabilidade dos revestimentos testados.

- Entre os flocos testados para a base do revestimento, o Floco 1 foi o que obteve melhor resposta nos ensaios de caracterização para ambos os silanos. Isso ocorreu devido ao fato de os flocos da marca Flocar serem retilíneos, fazendo com que seus revestimentos ficassem mais homogêneos.

- Apesar da amostra composta por silano HDTMS e flocos 2 apresentar um ângulo de rolamento elevado, ainda assim foi possível observar o efeito superhidrofóbico.

- No ensaio de atrito hidrodinâmico, as amostras testadas obtiveram redução do arraste hidrodinâmico, sendo que o melhor resultado foi com o revestimento composto pelo silano comercial e os Flocos 1, cuja redução atingiu 21%.

7. TRABALHOS FUTUROS

- Caracterizar o volume da camada de ar sobre as superfícies mimetizadas
- Avaliar o tempo de permanência da camada de ar retida sobre a superfície do revestimento.
- Estudar a aplicação e eficiência do revestimento superhidrofóbicos sobre substratos metálicos.
- Avaliar a redução do atrito aerodinâmico em diferentes condições de velocidade em fluxo laminar e turbulento.
- Desenvolver novos estudos sobre silanos e avalia-los em relação a sua molhabilidade.

8. BIBLIOGRAFIA

ARKLES, B. **Hydrophobicity, hidrophilicity and silane surface modification.** Gelest. Inc., 2011.

BARTHLOTT, W., SCHIMMEL, T., WIERSCH, S., KOCH, K., BREDE, M., BARCZEWSKI, M., WALHEIM, S., WEIS, A., KALTENMAIER, A., LEDER, A. & BOHN, H. F.: ***The Salvinia Paradox: Superhydrophobic Surfaces with Hydrophilic Pins for Air Retention Under Water.*** *Advanced. Materials*, 22, pp. 01-04, 2010.

BARTHLOTT, W., WIERSCH, S., COLIC, Z. & KOCK, K. **Classification of trichome types within species of the water fern *Salvinia*, and ontogeny of the egg-beater trichomes.** *Botany*, 87(9), pp. 830-836, 2009.

BHUSHAN B. **Biomimetics: lessons from nature – an overview.** *Philos Trans R Soc A.*, 367, pp. 1445–1486, 2009.

BHUSHAN, B. & JUNG, Y.C. **Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction.** *Prog. Mater Sci.*, 56, pp. 1-108, 2011.

BHUSHAN, B. **Biomimetics: Bioinspired Hierarchical-Structured Surfaces for Green Science and Technology.** Springer Science & Business Media, 2012.

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology.** Wiley, New York, 2002.

BHUSHAN, B. **Nanotribology and Nanomechanics I–Measurement techniques, II–Nanotribology, biomimetics, and industrial applications,** 3rd edn. Springer, Heidelberg, 2011a.

BHUSHAN, B. **Principles and applications of tribology.** Wiley, New York, 1999.

CASSIE, A. B. D., BAXTER, S. **Wettability of Porous Surfaces**. Trans. Faraday Soc., 40, p. 546, 1944.

CECCIO, S. L. & MÄKIHARJU, S. A. **Air Lubrication Drag reduction on Great Lakes Ships**. Final Report., s.l.: Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan, 2012.

DENG, X. **Fabrication and applications of superhydrophobic and superamphiphobic surface**, 2013.

Design of hydrophobic surfaces for liquid droplet control.

<http://www.nature.com/am/journal/v3/n5/fig_tab/am2011184f1.html>

Acesso em: 25 Nov. 2014.

EXTRAND, C. W. **Contact Angles and Their Hysteresis as a Measure of Liquid-Solid Adhesion**. Langmuir, 2004.

EXTRAND, C.W. **Model for Contact Angles and Hysteresis on Rough and Ultraphobic Surfaces**. Langmuir, 2002.

HONGYU DONG, M. C. Y. Z. H. W. F. S. **Extraordinary drag-reducing effect of a superhydrophobic coating on a macroscopic model ship at high speed**. J. Mater. Chem. A, pp. 5886-5891, 2013.

HUNT, J., BHUSHAN, B. **Nanoscale biomimetics studies of *Salvinia molesta* for micropattern fabrication**. J Colloid Interface, 363, pp. 187-192, 2011.

IMO - The International Maritime Organization, 2014. [Online] Available at: <http://www.imo.org/>

<https://www.ccaimo.mar.mil.br/sites/default/files/MARPOL_Anexo6-13AGO01.pdf>.

Acesso em: 22 nov. 2014.

<<http://www.imo.org/MediaCentre/MeetingSummaries/MEPC/Pages/MEPC-67th-session.aspx>>. Acesso em: 22 Nov. 2014.

KOCH, K., BHUSHAN, B., BARTHLOTT, W. **Multifunctional surface structures of plants: an inspiration for biomimetics**. Prog. Mater., 54, pp. 137-138, 2009.

LUZ, A. P; RIBEIRO, P. e PANDOLFELLI V. C. **Artigo revisão: Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários**. Cerâmica 54, pp. 174-183, 2008.

MAYSER, M. J. & BARTHLOTT, W. **Layers of Air in the Water beneath the Floating Fern *Salvinia* are Exposed to Fluctuations in Pressure**, 2014

MAYSER, M.J. **Air layers under water on the fern *Salvinia* – Stability and biomimetic applications**, 2013.

NOSONOVSKY, M., BHUSHAN, B. **Multiscale dissipative mechanisms and hierarchical surfaces: friction, superhydrophobicity, and biomimetics**. Springer, Heidelberg, 2008a.

PATANKAR, N.A. **Mimicking the Lotus Effect: Influence of Double Roughness Structures and Slender Pillars**, 2004.

Rust-Oleum, 2014. Rust-Oleum. [Online]

<<http://www.rustoleum.com/en/product-catalog/consumer-brands/neverwet/neverwet-kit>> Acesso em: 24 nov. 2014.

SAJADINIA, S. H.; SHARIF, F. **Thermodynamic Analysis of the Wetting Behavior of Dual Scale Patterned Hydrophobic Surfaces**. Journal of Colloid and Interface Science, 344, pp. 575-83, 2010.

STALDER, A. et al. **Low-Bond Axisymmetric Drop Shape Analysis for Surface Tension and Contact Angle Measurements of Sessile Drops**. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 364, pp. 72-81, 2010.

WANKHEDE, R.G., SHANTARAM, THANAWALA, L., KHANNA, A., and BIRBILLIS N. **Development of Hydrophobic Non-Fluorine Sol-Get Coatings on Aluminium**

Using Long Chain Alkyl Silane Precursor. Journal of Materials Science and Engineering A 3 (4), pp. 224-231, 2013.

WENZEL, R. N. *Resistance of Solid Surfaces to Wetting By Water.* Industrial and Engineering Chemistry Research, 28, p. 8, 1936.

YAN, Y.Y., GAO, N. & BARTHLOTT, W. **Mimicking natural superhydrophobic surfaces and grasping the wetting process: A review on recent progress in preparing superhydrophobic surfaces,** 2011.