

EFEITO DE DIFERENTES RUGOSIDADES DO SUBSTRATO DE ALUMÍNIO NA HIDROFOBICIDADE DE REVESTIMENTOS A BASE DE NANOSÍLICA FUNCIONALIZADA

Laura Damaro Bittencourt Pereira ¹; Susana Marraccini Giampietri Lebrão ²

¹ Aluna de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

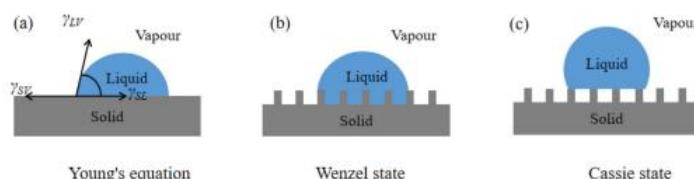
Resumo. *Superfícies superhidrofóbicas têm sido amplamente estudadas nas últimas décadas devido ao seu potencial em aplicações anticorrosivas, de autolimpeza e de proteção em diferentes setores industriais. Entre os materiais empregados na obtenção dessas superfícies, as nanopartículas de sílica destacam-se pela versatilidade, baixo custo e facilidade de modificação química, além de permitirem a criação de rugosidades em escala nanométrica, fundamentais para alcançar altos ângulos de contato. Por outro lado, o alumínio é um dos metais mais utilizados em aplicações estruturais, mas sua baixa energia superficial e susceptibilidade à corrosão demandam tratamentos adequados para melhorar a adesão e a durabilidade dos revestimentos. Neste estudo, investigou-se como diferentes condições de rugosidade superficial do alumínio influenciam a hidrofobicidade de filmes de nanosílica funcionalizada com 1H,1H,2H,2H-perfluoro-octil-trietoxisilano (POTS). Foram aplicados distintos métodos de preparação mecânica e química antes da deposição do revestimento, e a eficiência hidrofóbica foi avaliada por meio de medições de ângulos de contato. Os resultados mostram que a interação entre topografia e funcionalização química é decisiva para intensificar a hidrofobicidade.*

Introdução

O estudo de superfícies superhidrofóbicas tem ganhado crescente destaque nas últimas décadas, impulsionado por suas propriedades funcionais e pelo vasto leque de aplicações em diferentes setores, como indústria aeroespacial, automotiva, biomédica, naval e de energia. O fenômeno é inspirado em sistemas naturais, como as folhas de lótus (*Nelumbo nucifera*) e as asas de insetos, que apresentam características de autolimpeza, repelência à água e resistência ao acúmulo de contaminantes. Este comportamento é explicado pela combinação de rugosidade hierárquica (micro e nanoestruturas) com baixa energia superficial, que permite a formação de ângulos de contato superiores a 150°, condição conhecida como superhidrofobicidade. (Darmanin, T. et al., 2015).

A obtenção de superfícies superhidrofóbicas requer a combinação de duas condições fundamentais: (i) a presença de rugosidade micro/nanométrica, que intensifica o aprisionamento de ar sob a gota de líquido, e (ii) a modificação química da superfície para redução da energia superficial (Sharma, K. et al., 2022; Nosonovsky, M, 2009). Os modelos clássicos de molhamento, como Wenzel (1936, apud Picolo, 2019) e Cassie-Baxter (1944, apud Picolo, 2019), oferecem suporte teórico para compreender a transição entre hidrofobicidade convencional de superhidrofobicidade (**Figura 1**).

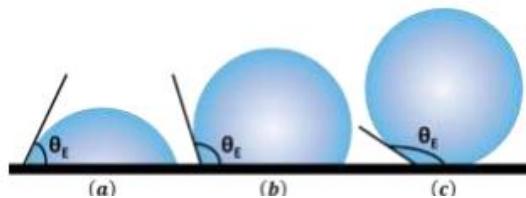
Figura 1: Esquema comparativo dos modelos de Young (a), que descreve o equilíbrio do ângulo de contato em uma superfície lisa; Wenzel (b), que o líquido penetra nos espaços entre as asperezas da superfície, aumentando a área de contato; e Cassie-Baxter (c), que o líquido toca a superfície apenas no topo das estruturas, formando uma interface composta por sólido-ar-líquido. (Deng, Y. et al., 2020)



Diversos métodos têm sido propostos para a obtenção de superfícies superhidrofóbicas, incluindo gravação a laser, deposição por sol-gel, plasma, jateamento e funcionalização química com agentes hidrofóbicos. Contudo, ainda não existe um processo único considerado ideal, pois a performance depende fortemente da aplicação desejada, do substrato utilizado e das condições ambientais. Em linhas gerais, a estratégia mais consolidada consiste na produção de multiestruturas: um primeiro revestimento que cria rugosidade na superfície, seguido da aplicação de uma camada de baixo ângulo de energia superficial, normalmente à base de fluorossilanos (Xu, P. et al., 2023).

Entre os materiais explorados, as nanopartículas de sílica (SiO_2) têm se destacado como candidatas promissoras para superfícies superhidrofóbicas. A sílica é abundante, de baixo custo, transparente e apresenta ampla versatilidade para modificação química com agentes funcionais. Além disso, permite o controle preciso do tamanho e da distribuição das partículas, seja por rotas de síntese como o método de Stöber, seja por variações do processo sol-gel (Sharma, A. et al., 2022). Essas nanopartículas criam rugosidades em escala nanométrica, que, quando combinadas à funcionalização química com compostos como o 1H,1H,2H,2H-perfluoro-octiltrietoxisilano (POTS), favorecem a obtenção de ângulos de contato superiores a 150°, situando o revestimento na faixa superhidrofóbica (Picolo, N. et al., 2019).

Figura 1: Demonstração do ângulo de contato entre a gota de água e a superfície do sólido. (a) superfície hidrofílica, para $\theta_E < 90^\circ$; (b) superfície hidrofóbica, para $90^\circ < \theta_E < 150^\circ$; (c) superfície superhidrofóbica, para $\theta_E > 150^\circ$.



Nesse contexto, destaca-se o trabalho de Picolo et al., 2019 desenvolvido no Instituto Mauá de Tecnologia, no qual foram estudados revestimentos superhidrofóbicos aplicados a substratos poliméricos (PMMA) a partir de nanosílica funcionalizada. Inspirando-se nessa abordagem, o presente estudo busca avançar na investigação ao aplicar metodologia semelhante em substratos metálicos, especificamente em alumínio AA7075, avaliando como diferentes condições de rugosidade superficial influenciam a hidrofobicidade obtida.

Paralelamente, a utilização do alumínio e suas ligas em aplicações estruturais tem se expandido significativamente devido à sua alta relação resistência/peso, facilidade de conformação e reciclagem. Essas características justificam sua ampla aplicação na indústria aeronáutica, automotiva e em componentes de transporte. No entanto, o alumínio apresenta baixa energia superficial e elevada susceptibilidade à corrosão em ambientes contendo cloreto, o que limita a eficiência de revestimentos convencionais. Assim, métodos de preparação superficial, como lixamento, jateamento, decapagem química, oxidação anódica e tratamentos a laser, vêm sendo estudados para aumentar a rugosidade, melhorar a adesão de revestimentos e prolongar a durabilidade em condições severas (Van Dam, J. P. B. et al., 2024; Gateneh, et al., 2023; Tiringer, U, 2018).

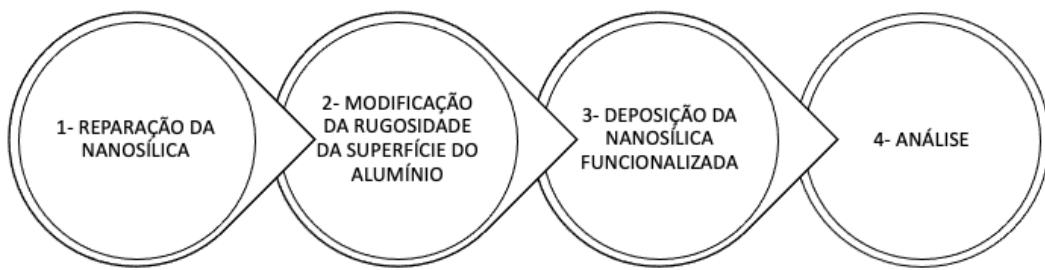
Estudos recentes demonstram que a rugosidade superficial exerce papel decisivo na adesão de revestimentos poliméricos e híbridos sobre alumínio. Por exemplo, tratamentos mecânicos combinados a primers químicos podem elevar em até 250% a resistência ao cisalhamento em juntas adesivas. Essa correlação entre rugosidade, energia superficial e desempenho adesivo sugere que a preparação adequada do alumínio também pode ser determinante para o desempenho hidrofóbico e superhidrofóbico de revestimentos à base de nanosílica funcionalizada. (Tajti, F, et al., 2025).

Diante desse cenário, o presente trabalho busca avaliar o efeito de diferentes rugosidades superficiais do alumínio na hidrofobicidade de revestimentos de nanosílica funcionalizada. O objetivo central é compreender como modificações topográficas e químicas interagem para

influenciar a formação de superfícies superhidrofóbicas em substratos metálicos. Para isso, foram aplicados distintos tratamentos superficiais no alumínio, seguidos da deposição de nanosílica funcionalizada com POTS. Com isso, este trabalho pretende contribuir para o avanço no desenvolvimento de revestimentos superhidrofóbicos mais eficientes e duráveis em substratos metálicos, oferecendo subsídios para aplicações como nas indústrias aeronáutica, naval e automotiva.

Material e Métodos

Figura 3: Fluxograma simplificado da metodologia



1. Preparação da Nanosílica:

A nanosílica, da empresa Yuanzhou District, utilizada neste estudo foi previamente dissolvida em álcool etílico e submetida a tratamento em banho ultrassônico por aproximadamente 2 horas e 30 minutos, com o objetivo de promover a adequada dispersão e separação das partículas. De acordo com as especificações do fabricante, o diâmetro médio das partículas é de aproximadamente 30 nm conforme indicado pelo fabricante.

2. Modificação da rugosidade da superfície do Alumínio

De acordo com Yieh Corp. (2025), a liga de alumínio AA7075 é composta majoritariamente por alumínio, contendo elementos de liga selecionados para conferir elevada resistência mecânica. Sua composição química típica inclui zinco entre 5,6 e 6,1%, magnésio entre 2,1 e 2,5% e cobre entre 1,2 e 1,6%, que formam os precipitados responsáveis pelo endurecimento da liga. Também estão presentes pequenas quantidades de cromo (0,18–0,30%), silício (até 0,40%), ferro (até 0,50%), manganês (até 0,30%) e titânio (até 0,20%). O restante da composição é constituído por alumínio. Essa combinação de elementos proporciona à liga AA7075 elevada resistência mecânica, boa usinabilidade e ampla aplicação nas indústrias aeronáutica e automotiva.

As amostras foram confeccionadas a partir de chapas de alumínio AA7075-T6, cortadas em corpos de prova menores 2,5x2,5 cm por meio de corte a jato de água, a fim de garantir precisão dimensional sem alterar a microestrutura do material causada pela temperatura empregada em outros métodos de corte. Após o corte, as superfícies foram submetidas a diferentes tratamentos de preparo, conforme descrito nos itens 2.1 a 2.7:

2.1 AMOSTRA A: Lixamento + água deionizada:

As amostras de alumínio AA7075 foram submetidas a um processo de lixamento manual progressivo, utilizando lixas d'água de diferentes granulometrias: 200, 220, 320, 400, 600 e 2000 mesh. O procedimento foi realizado em sequência crescente de granulometria, de modo a reduzir gradualmente a rugosidade da superfície e eliminar riscos mais profundos.

Após o lixamento, as superfícies foram imersas em água deionizada por 15 segundos, etapa que teve como objetivo a remoção de resíduos particulados e impurezas. Em seguida, as amostras foram submetidas à secagem em fluxo de ar quente por 5 minutos, a fim de evitar oxidação superficial imediata e preparar adequadamente a superfície para etapas posteriores de funcionalização (Van Dam, J. P. B., et al., 2024).

2.2 AMOSTRA B: Jateamento com esferas de vidro:

As amostras de alumínio AA7075 foram submetidas a um processo de jateamento abrasivo realizado na empresa Blastingcenter (cortesia). O procedimento foi conduzido em uma cabine de jateamento equipada com sistema de pressão controlada, utilizando como meio abrasivo esferas de vidro com granulometria específica fornecida pelo fabricante.

O jateamento foi aplicado de maneira uniforme em toda a superfície dos corpos de prova, sob condições padronizadas de pressão e distância do bico de aplicação, com o objetivo de garantir reprodutibilidade entre as amostras. Este tratamento promoveu o aumento da rugosidade superficial por meio da deformação plástica localizada e da formação de microcavidades, características típicas do processo de “shot peening” com partículas vítreas.

2.3 AMOSTRA C: Decapagem com NaOH + água quente:

As amostras foram submetidas a decapagem química alcalina utilizando o produto Alpha Clean Alumat (Alpha Galvano Química Brasileira Ltda.), fornecido como cortesia pela empresa. Este produto, em pó solúvel em água, é desenvolvido especificamente para o nivelamento e limpeza de superfícies de alumínio, atuando na remoção de riscos de trefilação, marcas de lixamento, rebarbas e oxidações superficiais, deixando a superfície com efeito acetinado e adequada para processos subsequentes, como anodização ou aplicação de revestimentos protetores.

O banho foi preparado conforme instruções do fabricante, dissolvendo-se, em um bêquer, a 600 mL do produto em água aquecida (50 ± 5 °C), sob agitação mecânica, até completa homogeneização. As amostras foram imersas e agitadas na solução por 1 minuto, conforme a faixa operacional indicada para ligas de alumínio. Após o tratamento, os corpos de prova foram apenas enxaguados em água corrente, sem a etapa de neutralização ácida em solução de ácido nítrico a 30%, normalmente recomendada pelo boletim técnico, de modo a constituir o grupo experimental sem neutralização.

A solução de NaOH (2 mol/L), promove a remoção parcial da camada de óxidos naturalmente presentes no alumínio. Esse processo ocorre por meio de reações químicas sucessivas, nas quais o Al_2O_3 da superfície reage com NaOH, formando aluminato de sódio (NaAlO_2). Em seguida, o NaAlO_2 é hidrolisado, resultando na formação de hidróxido de alumínio Al(OH)_3 e regenerando NaOH como subproduto. Essas reações formam uma nova camada de Al(OH)_3 sobre o substrato após o tratamento. A presença dessa camada altera tanto a química quanto a morfologia da superfície, influenciando diretamente a ancoragem posterior das nanopartículas de sílica funcionalizada. (da Silva, R. G. C, et al., 2025).

2.4 AMOSTRA D: Lixamento

As amostras de alumínio AA7075 foram submetidas a um processo de lixamento manual progressivo, realizado de forma análoga ao tratamento A. No entanto, neste caso, não foram aplicadas etapas adicionais de lavagem em água deionizada nem de secagem em ar quente.

2.5 AMOSTRA E: Decapagem com NaOH + Fosfatização:

Neste tratamento, as amostras de alumínio AA7075 foram inicialmente submetidas à decapagem química comercial, utilizando o produto Alpha Clean Alumat (Alpha Galvano Química Brasileira Ltda.), assim como na amostra C. Na sequência, as amostras passaram por uma etapa de fosfatização livre de metais pesados, utilizando o produto Alpha Pas Fe 01, também fornecido como cortesia pela empresa. Este produto consiste em uma tecnologia de conversão química de alta performance, isenta de cromo e outros metais pesados, projetada para aumentar a aderência de camadas subsequentes e a resistência à corrosão. A composição química detalhada do produto não foi informada pelo fabricante, sendo disponibilizadas apenas suas especificações de uso e características gerais.

De acordo com o boletim técnico, a solução de trabalho foi preparada por diluição de 1,5–2,5% do produto em água deionizada, com pH ajustado entre 3,8 e 4,2. As amostras foram imersas no banho por 30 a 90 segundos, à temperatura de 25 a 55 °C, sob leve agitação. Em seguida, foram submetidas a secagem com ar quente, conforme recomendação do fabricante.

2.6 AMOSTRA F: Fosfatização:

As amostras de alumínio AA7075 foram submetidas diretamente a um processo de fosfatização livre de metais pesados, utilizando o produto Alpha Pas Fe 01 (Alpha Galvano Química Brasileira Ltda.), o mesmo utilizado na amostra E.

3. Deposição da Nanosílica Funcionalizada

O método experimental adotado foi desenvolvido com base no trabalho de Pícolo et al., (2020) que empregou substratos de PMMA. Neste estudo, o procedimento foi mantido, mas adaptado para placas de alumínio, permitindo avaliar a influência da rugosidade do metal na hidrofobicidade do revestimento.

Inicialmente, as amostras de alumínio foram submetidas a limpeza em banho ultrassônico com álcool isopropílico por 5 minutos, seguida de secagem em ar quente por 3 minutos. Essa etapa é importante para garantir a limpeza e retirada de qualquer impureza que pode ter na superfície do alumínio.

A etapa seguinte consistiu na preparação da suspensão de nanopartículas de sílica. Para isso, 1,0 g de nanopartículas foi pesado em balança analítica e disperso em 50 mL de acetona em bêquer de vidro. A mistura foi submetida a ultrassom durante 40 minutos para promover melhor homogeneização. Em seguida, a suspensão foi depositada sobre o substrato por gotejamento uniforme com auxílio de pipeta de Pasteur, deixando-se secar em temperatura ambiente.

Na sequência, preparou-se a solução funcionalizante de POTS. Em capela de exaustão, 0,226 g de POTS foram dissolvidos em 45 g de etanol dentro de um bêquer de Teflon. A solução foi mantida sob agitação em chapa aquecida por 30 minutos, com controle de temperatura entre 60 e 70 °C, monitorada por termômetro infravermelho ou de haste metálica. Optou-se por recipientes de Teflon em vez de vidro para evitar possíveis reações indesejadas.

A aplicação da solução de POTS sobre os substratos foi feita em três etapas de gotejamento: a primeira imediatamente após a secagem da suspensão de nanosílica, a segunda após 6 horas e a terceira 12 horas após a segunda aplicação.

4. Métodos de Análise

4.1 Medida do Ângulo de Contato

As propriedades de molhabilidade foram determinadas em tensímetro de contato DSA25E, equipamento destinado à determinação do ângulo de contato entre uma gota de líquido e a superfície sólida, utilizando o método da gota séssil (Sessile Drop). Foram empregadas agulhas de aço inoxidável de diâmetros de 0,511 mm e 1,832 mm, com gotas de água destilada de volumes de 9 μ L e 30 μ L, respectivamente. As gotas foram depositadas sobre as amostras a uma taxa de 2,67 μ L/s, e o software do equipamento registrou parâmetros como ângulo de contato, diâmetro e volume da gota. O ângulo de contato foi calculado a partir da inclinação da linha de contorno da gota, descrita pela equação de Young-Laplace. Valores de ângulo de contato inferiores a 90° caracterizam superfícies hidrofílicas, enquanto valores superiores a 150° são tipicamente associados a superfícies superhidrofóbicas.

É importante destacar que o tamanho da gota interfere diretamente na medição. Estudos prévios sobre envelhecimento e rugosidade em substratos de madeira de eucalipto (Santos, W. A., 2019) apontam que gotas de maior volume sofrem maior influência da gravidade, levando à redução artificial do ângulo de contato. Já gotas muito pequenas podem apresentar instabilidade, dificultando a leitura precisa. Dessa forma, adotou-se um volume padrão de gota em todas as medições, garantindo a reproduzibilidade e comparabilidade entre amostras.

4.2 Medida de Rugosidade

Foi empregado o microscópio digital Olympus DSX1000, utilizado para análise tridimensional da rugosidade superficial com aumento de 142 x. Esse equipamento combina princípios de microscopia óptica e varredura de foco, permitindo gerar reconstruções 3D da topografia a partir da captura sequencial de imagens em diferentes planos de foco. Com isso, foi possível calcular parâmetros quantitativos de rugosidade, como Ra (rugosidade média aritmética), Rq (rugosidade quadrática média) e Rz (rugosidade máxima).

4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura MEV

A análise foi realizada em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Tescan Vega 3. Antes da análise, foi necessário realizar a etapa de metalização em equipamento Quorum, no qual uma fina camada condutora de ouro foi depositada sobre a superfície. Esse processo é essencial para evitar o acúmulo de cargas elétricas no material durante a incidência do feixe de elétrons, garantindo maior qualidade e definição das imagens obtidas. Além disso, foi complementada por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) para identificação elementar.

Para a caracterização morfológica, as nanopartículas em pó foram fixadas em um porta amostra com fita de carbono condutiva e submetidas a jato de ar comprimido, a fim de remover excessos que pudessem contaminar a câmara do microscópio. As análises em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas sob tensão de aceleração de 10 kV, em diferentes magnificações. Para avaliar a distribuição superficial dos revestimentos, as amostras de alumínio foram posicionadas diretamente no suporte do equipamento.

Resultados e Discussão

Os ensaios para verificação do ângulo de contato e da rugosidade foram realizados antes e depois da deposição da funcionalizada como pode-se observar os itens 1 e 2 respectivamente

1. *Ensaios Preliminares:* antes da deposição da camada de nanosílica funcionalizada

1.1 *Rugosidade e Ângulo de Contato:* Além das amostras de A a F, uma amostra de referência, sem tratamento superficial, apenas submetida ao corte a água, teve sua rugosidade medida no microscópio digital e o ângulo de contato avaliado no Tensiômetro. O valor médio de rugosidade (Ra) obtido foi de 0,944 μm . O ângulo de contato médio, para 9 μL foi de $91^\circ \pm 14^\circ$ e para 30 μL foi de $103^\circ \pm 17^\circ$.

Tabela 1: Comparação da rugosidade inicial das amostras com os ângulos de contato medidos antes da deposição da camada de nanosílica + POTS

Amostra	Rugosidade Ra (μm)	Ângulo de Contato -Gota de 9 μL	Ângulo de Contato – Gota de 30 μL	Aumento entre os dois tamanhos de gota
A	0,206	$96^\circ \pm 3^\circ$	$103^\circ \pm 4^\circ$	7°
B	0,649	$93^\circ \pm 3^\circ$	$102^\circ \pm 6^\circ$	9°
C	1,178	$113^\circ \pm 4^\circ$	$120^\circ \pm 1^\circ$	7°
D	0,665	$95^\circ \pm 1^\circ$	$94^\circ \pm 1^\circ$	-1°
E	1,609	$115^\circ \pm 3^\circ$	$109^\circ \pm 3^\circ$	-6°
F	0,774	$111^\circ \pm 9^\circ$	$135^\circ \pm 2^\circ$	24°

A partir da **Tabela 1**, observou-se que a amostra com maior rugosidade (Amostra E – Decapagem + Fosfatização) apresentou também o maior ângulo de contato, indicando que o aumento da rugosidade superficial tende a elevar a hidrofobicidade do revestimento.

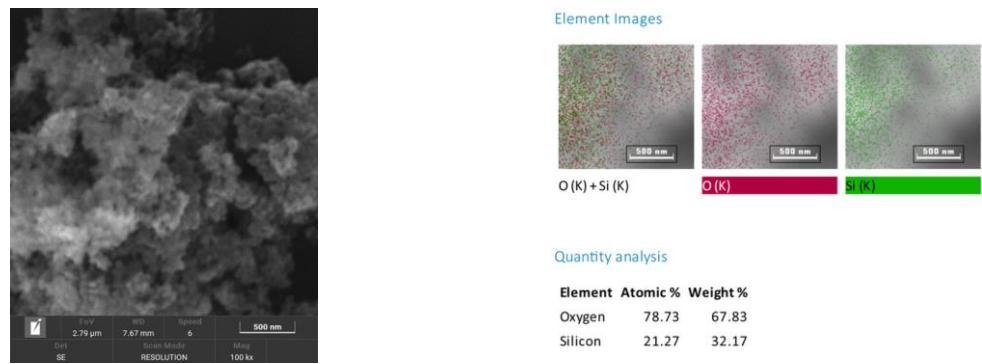
1.2 MEV + EDS:

O MEV é uma técnica de caracterização amplamente utilizada para estudar topografia e morfologia de superfícies em micro e nanometria. No entanto, devido ao limite de resolução do equipamento disponível, não foi possível observar individualmente as partículas de nanosílica de 30 nm. Assim, pode-se observar uma distribuição heterogênea da nanosílica com formação de aglomerados (**Figura 4**).

Complementarmente, foi realizada a análise de Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios X (EDS), acoplada ao MEV, a fim de identificar a composição elementar da amostra de nanosílica. O espectro obtido confirmou a presença majoritária de silício (Si) e oxigênio (O), característicos da nanosílica. (**Figura 5**)

Figura 4: Aglomerados de nanosílica

Figura 5: Elementos mostrados na análise de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)



2. Ensaios pós deposição de nanosílica funcionalizada:

2.1 *Rugosidade e Ângulo de Contato:*

Com as rugosidades superficiais previamente modificadas, foram realizadas medidas iniciais de molhabilidade das amostras de alumínio AA7075.

Tabela 2: Comparação dos ângulos de contato medidos após a deposição da nanosílica

Amostra	Ângulo de Contato -Gota de 9 μ L	Ângulo de Contato – Gota de 30 μ L	Aumento entre os dois tamanhos de gota
A	$125^\circ \pm 14^\circ$	$147^\circ \pm 9^\circ$	22°
B	$135^\circ \pm 39^\circ$	$162^\circ \pm 6^\circ$	27°
C	$148^\circ \pm 17^\circ$	$160^\circ \pm 3^\circ$	12°
D	$123^\circ \pm 8^\circ$	$142^\circ \pm 6^\circ$	19°
E	$135^\circ \pm 3^\circ$	$147^\circ \pm 15^\circ$	12°
F	$128^\circ \pm 3^\circ$	$150^\circ \pm 12^\circ$	22°

Considerando as **Tabelas 1 e 2**, observou-se que as amostras com maior rugosidade (C e E) foram também aquelas que apresentaram os maiores ângulos de contato. Esse resultado reforça a tendência de que o aumento da rugosidade superficial favorece a formação de superfícies mais hidrofóbicas após a deposição das nanopartículas de sílica funcionalizada. Além disso, verificou-se que a diferença entre os ângulos de contato medidos com gotas de 9 μ L e 30 μ L também aumentou (entre 71% à 214%) após a aplicação da nanosílica funcionalizada, evidenciando uma maior sensibilidade da superfície modificada às variações de volume da gota devido à alteração topográfica e química promovida pelo revestimento.

Tabela 3: Aumento dos Ângulos de Contato, antes X após a deposição da camada de nanosílica + POTS

Amostra	Aumento do Ângulo de Contato - Gota de 9 μ L	Aumento do Ângulo de Contato – Gota de 30 μ L
A	29°	44°
B	42°	60°
C	35°	40°
D	28°	48°
E	20°	38°
F	17°	15°

Considerando a **Tabela 3**, foi possível observar que a amostra B foi a que apresentou o maior incremento no ângulo de contato entre as condições antes e depois da deposição. Para a gota de 9 μ L, o aumento de 42° corresponde a aproximadamente 45%, enquanto para a gota de 30 μ L o incremento de 60° representa cerca de 59% de aumento. Esses resultados indicam que esse tratamento superficial, aliado ao efeito de rugosidade, proporcionou o aumento mais significativo na hidrofobicidade dentre as amostras analisadas.

2.2 *MEV + EDS*

Uma possível explicação para o aumento do ângulo de contato observado após a deposição da nanosílica funcionalizada está relacionada à alteração da rugosidade superficial promovida pelos tratamentos aplicados. A mudança na topografia do alumínio resultou em maior número de micro e nanoirregularidades. Dessa forma, as regiões onde as medições foram realizadas apresentaram maior quantidade de nanosílica retida, o que intensifica a formação de estruturas

hierárquicas responsáveis pelo aprisionamento de ar entre as saliências da superfície (**Figura 6**). Essa estrutura hierárquica intensifica o aprisionamento de ar entre as saliências da superfície, mecanismo descrito pelo modelo de Cassie–Baxter, contribuindo diretamente para o aumento da hidrofobicidade.

Figura 6a: Amostra A + camada de nanosílica vista no MEV com 1000x de aumento

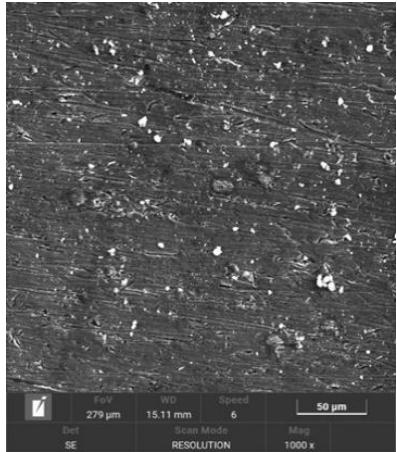


Figura 6b: Amostra B + camada de nanosílica vista no MEV com 1000x de aumento

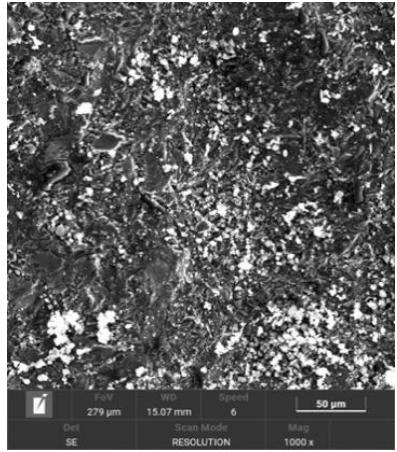


Figura 6c: Amostra C + camada de nanosílica vista no MEV com 1000x de aumento

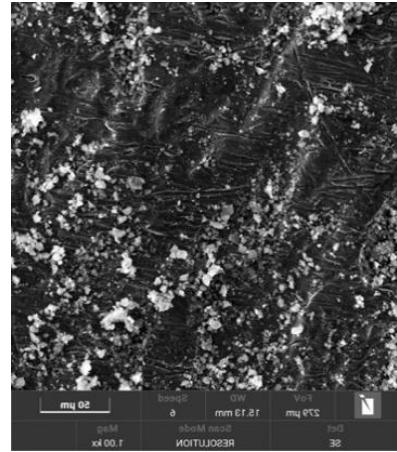


Figura 6d: Amostra D + camada de nanosílica vista no MEV com 1000x de aumento

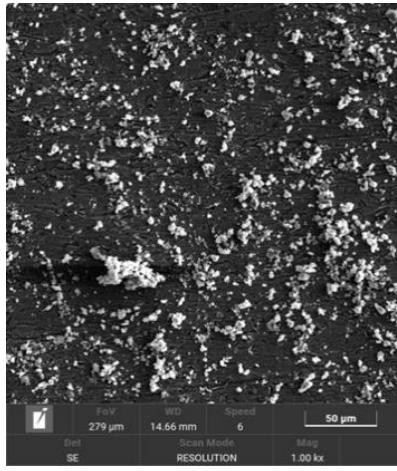


Figura 6e: Amostra E + camada de nanosílica vista no MEV com 1000x de aumento

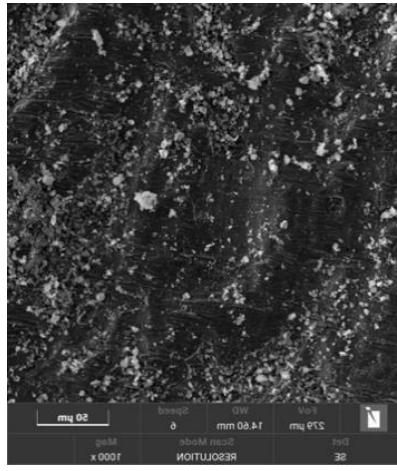
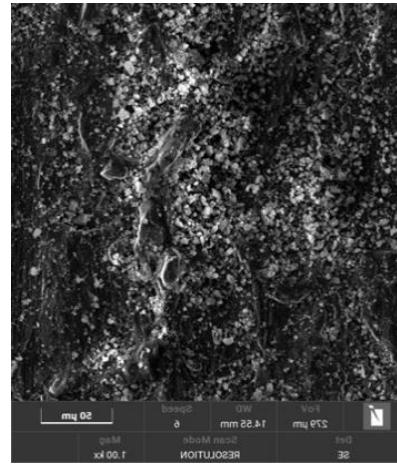


Figura 6f: Amostra F + camada de nanosílica vista no MEV com 1000x de aumento



As amostras C, E e F também passaram por modificações químicas significativas decorrentes dos tratamentos de superfície aplicados. A amostra C foi submetida exclusivamente à decapagem, processo que remove a camada de óxidos e contaminantes superficiais, deixando o alumínio mais reativo e limpo para a ancoragem do revestimento. A amostra E, por sua vez, recebeu decapagem seguida de fosfatização, resultando na formação de uma camada fosfatada que aumenta a estabilidade química e pode favorecer interações adicionais com a nanosílica funcionalizada. Já a amostra F passou apenas pela fosfatização, criando uma camada química distinta, sem a remoção prévia promovida pela decapagem. Essas diferenças de tratamento químico, combinadas ou não com alterações de rugosidade, influenciam diretamente a afinidade entre o substrato e o revestimento aplicado, contribuindo para as variações observadas nos ângulos de contato após a deposição da nanosílica.

Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que a rugosidade superficial do alumínio exerce influência direta na hidrofobicidade dos revestimentos à base de nanosílica funcionalizada. Observou-se que amostras submetidas a tratamentos capazes de gerar topografias mais irregulares, especialmente aquelas que passaram por decapagem e

fosfatização, apresentaram maiores ângulos de contato após a deposição da nanosílica e do POTS. Esse comportamento confirma a importância da criação de micro e nanoestruturas para o aprisionamento de ar e a estabilização do regime de Cassie–Baxter, favorecendo a formação de superfícies mais hidrofóbicas.

Além da contribuição morfológica, os tratamentos químicos aplicados às amostras D, E e F desempenharam papel relevante. A decapagem promoveu a remoção da camada de óxidos e contaminantes, tornando a superfície mais reativa para a ancoragem da nanosílica, enquanto a fosfatização gerou uma camada química estável e compatível com a funcionalização por POTS. A combinação desses processos na amostra E intensificou a interação entre a superfície metálica e o revestimento, resultando em melhoria significativa da hidrofobicidade. Esses resultados evidenciam que a sinergia entre composição química e rugosidade superficial contribui diretamente para o desempenho final dos revestimentos. (Van Dam, J. P. B. et al., 2024).

A análise morfológica evidenciou que as nanopartículas não são individualmente discerníveis no MEV devido ao seu reduzido tamanho (30 nm), mas sua presença foi confirmada pela formação de aglomerados e pela composição elementar identificada via EDS.

De forma abrangente, o estudo reforça o potencial dos revestimentos de nanosílica funcionalizada para modificação funcional de superfícies metálicas e destaca que o controle simultâneo da rugosidade e da modificação química superficial é essencial para otimizar o desempenho hidrofóbico. Esses achados contribuem para o avanço no desenvolvimento de revestimentos aplicáveis nos setores aeronáutico, naval, automotivo e em outras áreas onde a proteção de superfícies metálicas é fundamental.

Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio de instituições e empresas cujas contribuições foram essenciais para a execução das etapas experimentais. A Alpha Galvano forneceu, como cortesia, os produtos utilizados nos tratamentos químicos de decapagem e fosfatização, viabilizando parte fundamental da preparação das amostras. A BlastingCenter também ofereceu suporte técnico, disponibilizando o processo de jateamento com esfera de vidro, indispensável para os estudos comparativos de rugosidade. O suporte de ambas as empresas foi decisivo para o avanço e a qualidade dos resultados obtidos.

Referências Bibliográficas

- DARMANIN, T.; GUITTARD, F. *Superhydrophobic and superoleophobic properties in nature*. Materials Today, v.18, i.5, p. 273-285, 2015
- DENG, Y.; PENG, C.; DAI, M.; LIN, D.; ALI, I.; ALHEWAIRINI, S. S.; ZHENG, X.; CHEN, G.; LI, J.; NAZ, I. *Recent development of super-wettable materials and their applications in oil-water separation*. Journal of Cleaner Production, [S.l.], v. 266, p. 121624, 2020.
- GATENEH, S., A.; TEMAM, A. G.; NWANYA, A. C.; EJIKEME, P. M.; EZEMA, F. I.; *Advances in bioinspired superhydrophobic surface materials: A review on preparation, characterization and applications*. Hybrid Advances, v. 3, p. 10007, 2023
- NOSONOVSKY, M., BHUSHAN, B. *Superhydrophobic surfaces and emerging applications: Non-adhesion, energy, green engineering*. Curr. Opin. Colloid Interface Sci., v. 14, I. 4, p.270–280, 2009.
- PICOLO, L.; MORAES, V. T.; LEBRÃO, G. W.; LEBRÃO, S. M. G. *Sol-gel processed Superhydrophobic Plastic Surfaces Modified with Perfluorooctyltriethoxysilane (POTS)*. Materials Research, v. 22, s.1, 2019

- RAMEZANI, M.; VAEZI, M. R.; KAZEMZADEH, A. *Preparation of silane-functionalized silica films via two-step dip coating sol-gel and evaluation of their superhydrophobic properties*. Applied Surface Science, v. 317, p. 147-153, 2014.
- SANTOS, F. C.; PULCINELLI, S. H.; SANTILLI, C. V.; HAMMER, P. *Protective PMMA-silica coatings for aluminum alloys: Nanostructural control of elevated thermal stability and anticorrosive performance*. Progress in Organic Coatings, v. 152, p. 106129, 2021.
- SANTOS, W. A. *Efeito do envelhecimento e da rugosidade nas propriedades da superfície e na aderência do verniz em madeiras de eucalipto*. 125 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2019.
- SHARMA, A.; HOODA, A.; GOYAT, M. S.; RAI, R.; MITTAL A. *A review on challenges, recent progress and applications of silica nanoparticles based superhydrophobic coatings*. Ceramics International, v. 48, i.5, p.5922-5938, 2022
- DA SILVA, R. G. C.; MALTA, M. I. C.; DA SILVA, J. J.; FILHO, W. L. C. S.; CIRINO, J. A.; OLIVEIRA, S. H.; VINHAS, G. M.; VIEIRA, M. R. S. *Study of a fluorine-free silane-based film on an aluminum alloy via drop-coating method with the purpose of providing hydrophobic and corrosion protection properties*. Materials Chemistry and Physics, v. 329, p. 130099, 2025.
- TAJTI, F.; BERCZELIA, M.; WELTSCHB, Z. *Optimizing adhesion in aluminum alloys: A cross-disciplinary approach to surface treatment and bond strength*. International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 142, p. 104068, 2025
- TIRINGER, U.; DURA, A.; CASTRO, Y.; MILOŠEV, I. *Self-Healing Effect of Hybrid Sol-Gel Coatings Based on GPTMS, TEOS, SiO₂ Nanoparticles and Ce(NO₃)₃ Applied on Aluminum Alloy 7075-T6*. J. Electrochem. Soc., v. 16, n. 5, 2018.
- VAN DAM, J. P. B.; TIRINGER, U.; ABRAHAMI, ST. T.; MILOŠEV, I.; TERRYN, H.; KOVAC, J.; MOL, J. M. C. *Surface engineering of aerospace aluminium alloys: Understanding alloying effects on chemical pre-treatment and sol-gel coating adhesion*. Surface and Coatings Technology, v. 485, p. 130901, 2024.
- XU, J.; WANG, L.; HU, H.; LI, M.; SU, K.; CAO, D. *Achieving the hydrophobic alteration by functionalized nano-silica for improving shale hydration inhibition*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, v. 702, p. 135167, 2024
- XU, P.; SUI, X.; WANG, S.; LIU, G.; GE, A.; COYLE, T. W.; MOSTAGHIMI, J. *Superhydrophobic ceramic coatings with lotus leaf-like hierarchical surface structures deposited via suspension plasma spray process*. Surfaces and Interfaces, v. 38, 2023, p. 102780, 2023.
- YIEH CORP. *Aluminium Alloy 7075 – Technical Data Sheet*. Disponível em: <https://aluminum.yieh.com>. Acesso em: 1 nov. 2025.