

MOLHABILIDADE DE SUPERFÍCIES HIERÁRQUICAS

SOLANGE MARIA FOSSA¹; PEDRO LOVATO GOMES JARDIM²;
MARIO LUCIO MOREIRA³; WAGNER TENFEN⁴

¹*Universidade Federal de Pelotas – solange.fossa@ufpel.edu.br*

² *Universidade Federal de Pelotas – pedro.lovato@ufpel.edu.br*

³ *Universidade Federal de Pelotas – mario.moreira@ufpel.edu.br*

⁴ *Universidade Federal de Pelotas – wtenfen@ufpel.edu.br*

1. INTRODUÇÃO

O estudo da molhabilidade tem atraído significativo interesse acadêmico e industrial devido ao potencial tecnológico de suas propriedades de autolimpeza, anticorrosivas e anti-incrustantes SCHIAVON et al. (2025). No entanto, a relação entre as propriedades protetivas da rugosidade da superfície e o regime de molhabilidade observado ainda não é totalmente compreendida. Tal relação é necessária para a construção de um modelo teórico que correlacione adequadamente as micro e nanoestruturas superficiais com os possíveis regimes de molhabilidade NAKAJIMA; HASHIMOTO; WATANABE (2001). Para caracterizar a molhabilidade de uma superfície em seus diversos regimes, é necessário considerar o ângulo de contato estático (CA), definido como o ângulo entre a interface da gota com o sólido e a interface da gota com o ar, no ponto em que essas superfícies se cruzam. Outro parâmetro significativo na análise de molhabilidade é a histerese do ângulo de contato (CAH), também chamada de ângulo de contato dinâmico, definida pela diferença entre o ângulo de avanço (θ_A) e o ângulo de recuo (θ_R) de uma gota prestes a se mover devido à ação da gravidade pela inclinação da superfície em certo ângulo (SCHIAVON, 2023). A molhabilidade pode ser classificada como hidrofílica, para ângulos de contato de 0° a 90°; hidrofóbica, para ângulos de 90° a 150°; super-hidrofílica, regime de extrema afinidade entre o líquido e a superfície, com ângulos geralmente menores que 10° e histerese tendendo a zero; ou super-hidrofóbica, regime de forte repulsão entre líquido e superfície, com ângulos de 150° a 180° e histerese $\leq 10^\circ$, conforme BHUSHAN et al. (2011). Superfícies hierárquicas combinam subestruturas em diferentes escalas dimensionais (micro e nano) em uma única estrutura. Inspirados em estruturas naturais encontradas em sistemas biológicos (TEISALA; BUTT, 2018), buscamos fabricá-las sintética e controladamente para compreender melhor o papel da hierarquia no comportamento da molhabilidade e sua persistência frente a fatores externos, como abrasão.

2. METODOLOGIA

A preparação de filmes finos é dividida em quatro etapas: síntese, deposição, texturização, funcionalização. Primeiramente, os substratos baseados em lâminas de vidro serão lavados de modo a melhorar a adesão da deposição do filme fino. A

lavagem ocorrerá em três etapas, uma lavagem em água corrente, enxágue com água destilada e passagem pelo ultrassom em um bêquer contendo álcool isopropílico. Na terceira etapa, as lâminas serão limpas com papel microfilme embebidos em álcool isopropílico e secas com nitrogênio.

Com as lâminas secas iniciar-se-á o processo de deposição pela deposição eletroforética de uma solução de pH 7 contendo 1% de nanopartículas de sílica dissolvidas em isopropanol, em uma tensão de 5V, durante 8 minutos, seguida da adição de uma camada de sílica *sol-gel*. Na etapa seguinte, deposita-se uma camada de alumina *sol-gel*. Em seguida, os substratos passam por texturização via *etching* em meio aquoso a 100 °C, com tempos de imersão variando exponencialmente de 0 s a 512 s, a fim de obter diferentes níveis de rugosidade. Todos os processos descritos foram seguidos de secagem em mufla a 400 °C por 15 minutos para garantir a fixação de cada camada. A camada final consiste em um agente funcionalizante para reduzir a energia superficial, também seguida de secagem em estufa a 150 °C por 15 minutos. Todas as deposições foram realizadas utilizando a técnica de *dip-coating* em escala de bancada ou com auxílio da técnica de *dip-coating* para retirada no caso da eletroforese. O método de deposição foi escolhido devido a sua precisão, possibilitando a seleção de velocidades e tempos na interface do equipamento, que resultam em filmes uniformes e na escala de grandeza desejados. Finalmente, serão realizadas caracterizações topográficas, estruturais e de molhabilidade das superfícies. Os ângulos de contato serão medidos pelo método da gota séssil; a composição química dos filmes será determinada por espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS); e a estrutura e topografia serão analisadas por microscopia de força atômica (AFM), interferometria de luz branca (WLI) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando equipamentos disponíveis nos laboratórios de Física da UFPel e em instituições colaboradoras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fabricação dos primeiros filmes multicamadas com diferentes níveis de rugosidade está em andamento. A topografia variada das superfícies sugere que a hierarquia de rugosidade exerce um papel fundamental na manutenção da molhabilidade. Ainda serão realizadas a caracterização topográfica e de propriedades de molhabilidade de superfícies hierárquicas destes filmes finos, com a finalidade de correlacionar a molhabilidade com a topografia. Assim como aferir a manutenção da molhabilidade frente ao desbastamento físico, a fim de corroborar o papel protetivo das microestruturas.

As partículas de sílica já foram produzidas, e os primeiros testes de deposição eletroforética foram iniciados, juntamente com a combinação das demais camadas da estrutura. Resultados preliminares indicam que amostras submetidas a maiores tempos de deposição apresentam características super-hidrofóbicas, como mostrado na Figura 1.

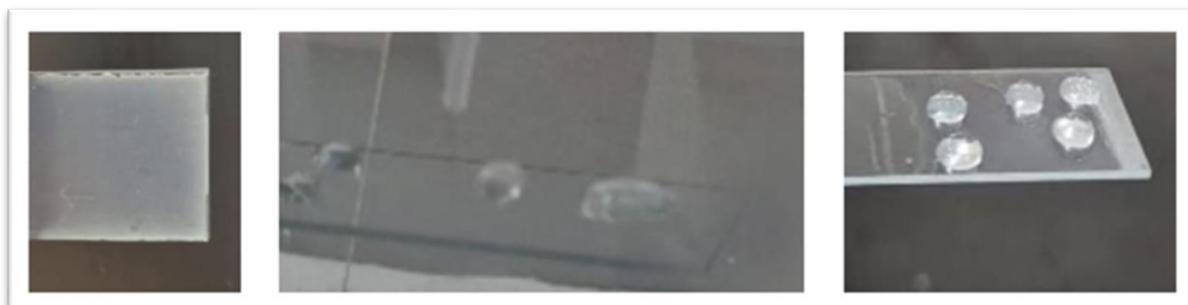


Figura 1: Amostras obtidas. Da esquerda para a direita: filme fino de sílica depositado por eletroforese, amostras mostrando efeitos super-hidrofóbicos e hidrofóbicos.

4. CONCLUSÕES

A busca por condições experimentais ótimas iniciou-se com a produção dos primeiros filmes multicamadas em diferentes níveis de rugosidade, bem como com a síntese de partículas de sílica.

O estudo tem potencial para contribuir para o entendimento dos mecanismos que governam a molhabilidade em superfícies rugosas e em superfícies hierárquicas. Estando ainda em processo de produção do filme micro estruturado.

Resultados preliminares mostram comportamento hidrofóbico e superhidrofóbico dependendo do tempo de deposição e da combinação de camadas. Filmes expostos a maiores tempos de ataque apresentam maior rugosidade e, consequentemente, comportamento super-hidrofóbico. Nas próximas etapas, serão realizadas análises completas de molhabilidade, caracterização topográfica, testes de resistência mecânica sob abrasão e o ajuste de modelos teóricos aos dados experimentais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BHUSHAN, B.; JUNG, Y.C. Natural and biomimetic artificial surfaces for superhydrophobicity, self-cleaning, low adhesion, and drag reduction. *Progress in Materials Science*, Amsterdam, v.56, n.1, p.1–108, 2011.

NAKAJIMA, A.; HASHIMOTO, K.; WATANABE, T. Recent Studies on Super-Hydrophobic Films. *Monatshefte fuer Chemie*, Wien, v.132, n.1, p.31–41, 2001.

SCHIAVON, C.S. **Estudo sobre a influência da topografia na estática e dinâmica da molhabilidade de superfícies hidrofóbicas e superhidrofóbicas.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

SCHIAVON, C.S.; FELDE, N.; SCHRÖDER, S.; MOREIRA, M.L.; JARDIM, P.L.G. Predicting Wetting Properties for Surfaces with Stochastic Topography. *Coatings*, Basel, v.15, n.2, art. 202, 2025.

TEISALA, H.; BUTT, H.-J. Hierarchical Structures for Superhydrophobic and Superoleophobic Surfaces. *Langmuir*, Washington, v.35, n.33, p.10689–10703, 2018.