

## Desenvolvimento de um goniômetro de baixo custo

### Development of a low-cost goniometer

João Arthur Brautigam de Moraes<sup>1</sup>, Viviane Teleginski Mazur<sup>2</sup>

#### RESUMO

Neste estudo, foi adaptado um equipamento inoperante de difração de raios X, desacoplando seu sistema rotacional e construindo um goniômetro para medição de ângulo de contato de uma gota de água com superfícies de materiais diversos. A partir de impressão 3D e usinagem convencional foram desenvolvidas as peças necessárias para montagem do equipamento. Uma pipeta graduada foi utilizada para permitir o controle de volume da gota de água. Também foram utilizados uma webcam e um software de uso livre para realizar a medição do ângulo de contato em imagens capturadas pela câmera. Testes iniciais de medição do ângulo de contato em uma amostra de aço foram realizados para validação do equipamento, resultando num ângulo de  $59 \pm 4.2$ , também foi considerado o valor do ângulo pela literatura de  $53^\circ$ . Além disso, o custo total do equipamento com todos os componentes manufaturados e comprados e também o custo hora máquina foi de R\$237,21, sendo um sistema de baixo custo, desconsiderando o valor do equipamento de difração doado.

**PALAVRAS-CHAVE:** ângulo de contato; baixo custo; goniômetro.

#### ABSTRACT

In this study, an inoperative X-ray diffraction equipment was adapted, decoupling its rotational system and building a goniometer to measure the contact angle of a water droplet with surfaces of different materials. From 3D printing and conventional machining, parts for easy assembly of the equipment were developed. A graduated pipette was used to control the volume of the water droplet. A webcam and free software were also used to measure the contact angle in images captured by the camera. Initial tests to measure the contact angle on a steel sample were carried out to validate the equipment, resulting in an angle of  $59 \pm 4.2$ , the literature angle value of  $53^\circ$  was also considered. Furthermore, the total cost of the equipment with all components manufactured and purchased, in addition to the machine hour cost was R\$237.21, being a low-cost system, disregarding the value of the donated diffraction equipment.

**KEYWORDS:** contact angle; low-cost; goniometer.

## INTRODUÇÃO

### ÂNGULO DE CONTATO E MOLHABILIDADE

O ângulo de contato é uma medida fundamental usada para avaliar a molhabilidade de uma superfície, influenciando diretamente o comportamento de um líquido ao entrar em contato com ela. Essa propriedade foi inicialmente observada por Thomas Young no início do século XIX, quando ele notou que ao derramar gotas de água e mercúrio sobre uma superfície de vidro, elas formavam ângulos distintos em relação à superfície (YOUNG,1804). A partir dessa observação, Young desenvolveu uma análise algébrica baseada em informações como o raio da gota, o cosseno do ângulo de contato formado entre a gota e a superfície e outros parâmetros relevantes. Essa análise resultou na formulação da equação de Young em 1804, que descreve a relação entre esses

<sup>1</sup> Bolsista do(a) Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Tecnológica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Paraná, Brasil. E-mail: joaoarthur@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 5190889612557853.

<sup>2</sup> Docente no Curso de Tecnologia de Manutenção Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, Paraná, Brasil. E-mail: vivianemazur@utfpr.edu.br. ID Lattes: 5887272314414934.

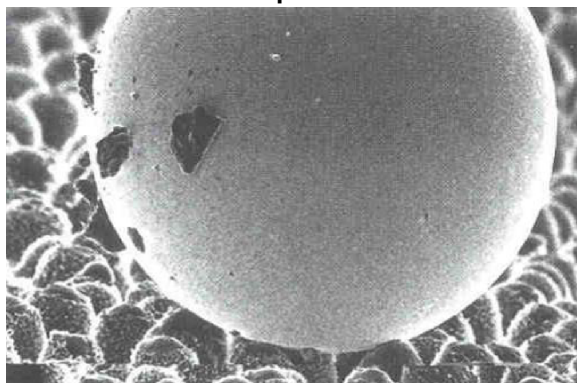
elementos. No entanto, ao longo do tempo, essa equação se mostrou complexa e de aplicação limitada.

A molhabilidade de uma superfície pode ser caracterizada em 4 tipos, de acordo com o ângulo de contato: super-hidrofílica até  $10^\circ$ , hidrofílica entre  $10$  e  $90^\circ$ , hidrofóbica entre  $90$  e  $150^\circ$ , e super-hidrofóbica caso seja maior que  $150^\circ$ .

## APLICAÇÕES DA MOLHABILIDADE EM SUPERFÍCIES

Na natureza, pode-se encontrar exemplos de materiais que exibem características relacionadas à molhabilidade. Um exemplo é a flor de lótus, que foi descrita por Von Bayer como uma planta exótica de potencial para estudo e replicações de características. A singularidade dessa planta está nas suas folhas altamente rugosas e hidrofóbicas, que permitem que a folha tenha uma característica auto-limpante. Esse fenômeno é observado quando uma gota de água entra em contato com a folha, coletando impurezas à medida que rola, efetivamente limpando a superfície e a deixando seca. Este fenômeno, conhecido como "efeito lótus", é demonstrado na Figura 1 (VON BAEYER, 2000).

Figura 1 – Gota de mercúrio depositada sobre folha de uma flor de lótus.



Fonte: Von Baeyer, (2000).

Na indústria, os revestimentos funcionais têm sido extensivamente estudados para diversas aplicações em superfícies variadas. Um estudo conduzido por Li e colaboradores (2014) analisou a molhabilidade em ligas de magnésio, que são conhecidas por suas vantagens, como alta condutividade térmica, facilidade de usinagem, boa resistência e baixo peso específico. No entanto, essas ligas também são suscetíveis à oxidação, inclusive devido à umidade do ar. Utilizando uma abordagem que envolveu ácido esteárico e eletrodeposição de cobalto, os autores destacaram como os tratamentos de superfície aplicados ao material afetaram significativamente o ângulo de contato. O ângulo de contato foi de  $49,2^\circ$  para a liga pura, aproximando-se de  $0^\circ$  para a liga com cobalto depositado e atingindo  $156,2^\circ$  para a liga tratada com ácido esteárico. O estudo revelou que o tratamento com ácido esteárico conferiu à liga maior resistência à corrosão, efeito autolimpante e uma boa estabilidade química e mecânica (LI, 2014).

## MÉTODO DA GOTA SÉSSIL

Entre os métodos de medição do ângulo de contato, um dos mais práticos e utilizados é o método da gota séssil, onde uma gota é depositada sobre a superfície de

uma amostra e a imagem é capturada por uma câmera. Utilizando um software mensura-se o valor do ângulo de contato com a superfície da amostra. Nesse método é usado um volume de gota próximo a  $10 \mu\text{L}$ , e o ângulo de contato é medido logo após a gota ser depositada (DA SILVA et al., 2020).

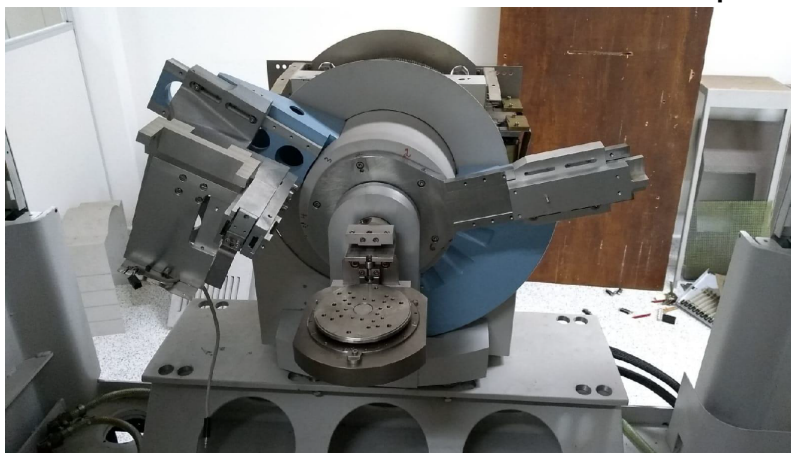
## OBJETIVOS

A molhabilidade desempenha um papel crucial em projetos de engenharia, afetando a aderência, a durabilidade e o desempenho de revestimentos, materiais e superfícies, por isso é fundamental para otimizar processos e garantir a eficácia de sistemas em diversas aplicações. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um goniômetro simples e de baixo custo para determinação do ângulo de contato de superfícies através do método da gota séssil, utilizando peças feitas a partir de impressão 3D, usinagem convencional e à adaptação de um sistema rotacional reciclado de um antigo equipamento inoperante de difração de raios X.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado o sistema rotativo de um antigo equipamento de difração de raios X, conforme mostrado na Figura 2. Antes de se iniciar este projeto, a fonte de raios X do equipamento foi removida pelo instituto que fez a sua doação para a UTFPR-GP.

Figura 2 - Sistema rotacional do difratômetro de raios X ainda acoplado à carcaça.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para verificar as peças que poderiam ser reaproveitadas foi realizado o desmonte da carcaça, a retirada dos cabos e algumas peças sem serventia para o projeto. Nesse processo foi utilizado um kit de ferramentas diversas.

O planejamento das peças necessárias para a construção do goniômetro inclui 3 partes principais que foram manufaturadas:

- Impressão 3D de um apoio para a câmera integrada ao software de análise;
- Impressão 3D de um suporte para a pipeta graduada;
- Impressão 3D de um suporte para as amostras analisadas;
- Usinagem em torno mecânico convencional de um apoio ao suporte da pipeta de alumínio.



O custo total das peças manufaturadas foi de aproximadamente R\$ 40,00.

Os componentes foram modelados no software Fusion 360 (Autodesk, EUA) e convertidos em arquivos STL. A preparação para a impressão foi realizada com o software Cura Ultimaker (Ultimaker, Holanda). A impressão dos componentes ocorreu na impressora 3D Ender-3 V2 (Shenzhen Creality 3D Technology Co., Ltd., China), utilizando filamentos PLA e ABS (3D Fila, Brasil) com 1,75 mm de espessura. As temperaturas foram configuradas em 60 °C para a mesa e 190 °C para o bico extrusor (PLA), bem como 110 °C e 230 °C (ABS), recomendadas pelo fabricante. Outras configurações de impressão incluíram 20% de densidade, camadas de 0,16 mm de espessura e 3 paredes laterais, 4 superiores e inferiores. Foi adquirida no mercado local uma câmera webcam Warrior Maeve (Multilaser, Brasil) com resolução HD 1080p, com custo de R\$ 50,00 e uma micropipeta de volume variável de 10 a 100 µL (Peguepet, Brasil), a qual tem um custo de R\$120,00. Além dos componentes impressos, duas presilhas foram empregadas para fixar a haste de alumínio (R\$10,00).

Os testes iniciais envolveram três amostras de aço carbono ABNT 1020, sendo uma esmerilhada, uma contendo um filme fino de nióbio metálico e outra com um filme fino de óxido de nióbio. As deposições foram realizadas durante o desenvolvimento de outro projeto de pesquisa, utilizando um equipamento de Plasma Magnetron Sputtering (LIMA, 2022). Para a aferição do ângulo de contato, utilizou-se água destilada como fluido. A análise das imagens das gotas foi conduzida no software ImageJ com o plugin "contact angle", com base em gravações em vídeo da deposição das gotas nas superfícies.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### CUSTO DO SISTEMA

O custo total das peças equipamento, desconsiderando o sistema rotativo que foi uma reciclagem de componentes inoperantes, foi de R\$220,00. Os softwares utilizados são livres para uso acadêmico. Além disso, o custo hora-máquina da impressora 3D foi de R\$8,40 para 7 horas de impressão, desconsiderando os custos de materiais já somados anteriormente. Já a operação de desbaste em torno durou 30 minutos, também sem levar em conta a haste de alumínio, o valor total hora máquina em torno foi de R\$8,81. O valor total do equipamento foi de R\$237,21, já um equipamento de goniometria à venda no mercado pode custar cerca de R\$16000,00.

### MONTAGEM DO SISTEMA

O sistema foi montado tendo como base o braço rotativo direito visto na Figura 2, que foi utilizado para acoplar o suporte de amostras e o suporte para a webcam. Já para segurar a pipeta, foram impressas 2 peças de suporte além de uma base para a haste de aço. Apenas o suporte de amostras foi impresso em ABS, todas as peças restantes foram manufaturadas com PLA.

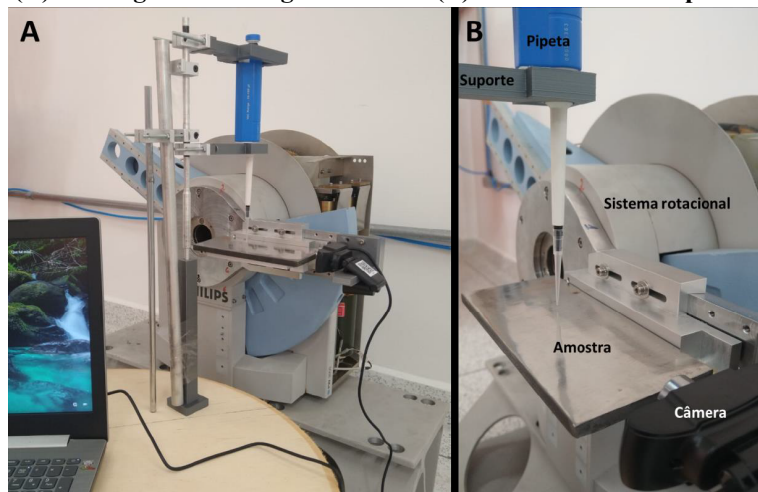
Após juntar todas as peças da haste foi necessário incluir um contrapeso para estabilização do sistema. Para facilitar a montagem inicial para realização de ensaios de molhabilidade, o suporte da webcam ficou ao lado da amostra. O equipamento final ficou

de acordo com a Figura 3-A e o detalhamento das principais partes é mostrado na Figura 3-B.

## TESTES INICIAIS DE MOLHABILIDADE

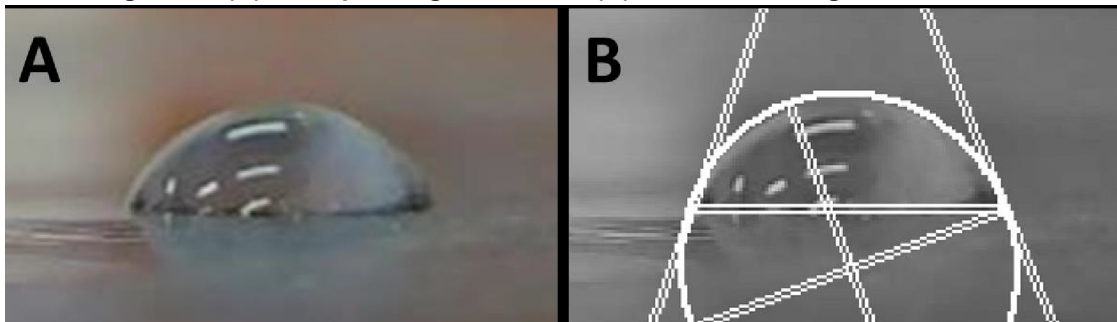
Testes iniciais foram feitos com o objetivo de verificar o funcionamento do equipamento montado. Para isso foram realizadas 5 deposições de gotas e suas respectivas capturas de filmagens. Depois, com a imagem do momento de contato entre a gota e a superfície, foram realizadas as medições do ângulo de contato, conforme mostrado no exemplo da Figura 4 e conforme os dados da Tabela 1.

Figura 3 - (A) Montagem final do goniômetro e (B) detalhamento das partes principais.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 4 - (A) Exemplo de gota séssil e (B) medição do ângulo de contato.



Fonte: Autoria própria (2022).

Tabela 1 - Ângulo de contato para amostra de aço carbono ABNT 1020.

Medida	Esmerilhada
1	59,7°
2	66,9°
3	57,4°
4	59,9°
5	66,0°
<b>Média (D.P.)</b>	<b>59,9 ± 4,2°</b>

Fonte: Autoria própria (2022).

Para validação dos dados foi utilizado um teste t-Student, com um nível de significância de 5% e a hipótese nula do ângulo de contato de 53°, valor médio da literatura (SATISH, 2023). Assim o valor t foi igual a 3,674, que está dentro do valor máximo de 4,604 para o número de amostras, sendo assim, é viável usar o equipamento.

Sua utilização foi de fácil manuseio, sendo possível a regulagem da altura da pipeta graduada de acordo com a espessura da amostra a ser analisada. Os vídeos gravados permitiram verificar a estabilidade da pipeta e conseqüentemente, da formação e deposição da gota na superfície.

## CONCLUSÕES

O desacoplamento completo do sistema rotacional do equipamento inoperante permitiu a construção de um goniômetro operacional e adequado para medição do ângulo de contato de gotas de água com a superfície de amostras. O projeto e fabricação das peças utilizou impressão 3D e usinagem com custo total de R\$237,21, sendo menos de 2% do valor de um goniômetro comercial. Os testes iniciais de medição do ângulo de contato foram bem-sucedidos, permitindo a captura de imagens para medição do ângulo.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa PIBITI e a UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná).

## CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

DA SILVA, V. et al. Construção de um suporte ajustável lab-made impresso em 3d para medição de ângulo de contato. **Química Nova**, v. 43, n. 9, p. 1312-1319, 2020.

LI, W.; KANG, Z. Fabrication of corrosion resistant superhydrophobic surface with self-cleaning property on magnesium alloy and its mechanical stability. **Surface and Coatings Technology**, v. 253, p. 205–213, 2014.

LIMA, A. B. **Efeitos da deposição de revestimentos de nióbio na taxa de corrosão do aço DOMEX 700**. 2022. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Coordenação de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2022.

YOUNG, T. III an essay on the cohesion of fluids. Philosophical transactions of the royal society of London, **The Royal Society London**, n. 95, p. 65–87, 1805.

VON BAEYER, H. C. The lotus effect. **The sciences**, n. 40, p. 12-15, 2000.

SATISH, S. I. Development of hydrophobic AISI 1020 steel surfaces through micro-texturing: A numerical study. **Materials Today: Proceedings**, 2023.