

## Análise do processo de determinação do ângulo de contato para gotas esféricas

## Analysis of the process of determining the contact angle for spherical drops

### RESUMO

Henrique Stacheski Schleetz  
[hschleetz@gmail.com](mailto:hschleetz@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Fábio Kenji Sugimoto  
[fsugimoto@utfpr.edu.br](mailto:fsugimoto@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

A molhabilidade representa um parâmetro importante na realização de diversos processos de engenharia. Logo, ferramentas para mensurá-la possuem grande relevância. Existem diversos arranjos experimentais desenvolvidos para este propósito, no entanto, devido a sua baixa complexidade, o arranjo da gota séssil destaca-se entre os demais. O esquema consiste em dispor uma gota estática sob uma superfície sólida de maneira em que seja possível a obtenção de imagens do perfil do conjunto. A partir do processamento das imagens pode-se realizar a determinação dos valores dos ângulos de contato formados entre a gota e o sólido. Nesse âmbito, o trabalho em questão propõe a análise do processo de medição dos ângulos de contato de gotas esféricas. Para tal, um algoritmo foi elaborado através do *software* MATLAB versão 2012 e perfis do conjunto gota-superfície sólida foram desenvolvidos artificialmente através do *software* LibreCAD. Por fim, foram avaliados diversos métodos de ajuste de curva e tais resultados foram comparados com os resultados obtidos através da utilização do algoritmo do meio ângulo. Notou-se que o algoritmo do meio ângulo além de apresentar menor erro, apresenta maior simplicidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Molhabilidade. Algoritmo. Ângulo de contato.

### ABSTRACT

Wettability represents an important parameter in carrying out various engineering processes. Therefore, tools to measure it have great relevance. There are several experimental arrangements developed for this purpose, however, due to its low complexity, the sessile drop arrangement stands out among the rest. The scheme consists of placing a static drop under a solid surface so that it is possible to obtain images of the set profile. From the processing of the images, it is possible to determine the values of the contact angles formed between the drop and the solid. In this context, the work in question proposes the analysis of the process of measuring the contact angles of spherical drops. To this end, an algorithm was developed using MATLAB 2012 version software and profiles of the drop and solid surface set were artificially developed using LibreCAD software. Finally, several curve fitting methods were evaluated and these results were compared with the results obtained using the half-angle algorithm. It was noted that the half-angle algorithm, in addition to presenting a smaller error, presents greater simplicity.

**KEYWORDS:** Wettability. Algorithm. Contact angle.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

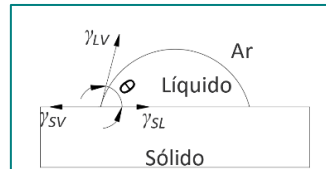
**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

O conceito de molhabilidade representa a tendência de um líquido em manter contato com um sólido e uma das maneiras de avaliá-la quantitativamente se dá por meio da medição do ângulo de contato  $\theta$ , mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Tensões interfaciais e ângulo  $\theta$



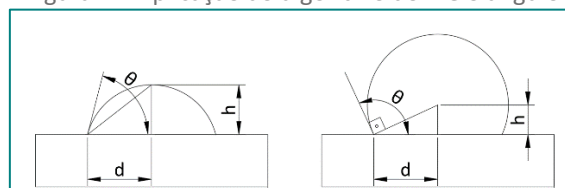
Fonte: Autoria própria (2020).

Um dos arranjos mais utilizados para a determinação de  $\theta$  é o da gota séssil. A configuração consiste na disposição de uma gota sob uma superfície sólida plana. Imagens do perfil do conjunto são obtidas, e então o valor do ângulo de contato pode ser determinado através de métodos de processamento de imagem.

O formato assumido por uma gota depende da interação entre as tensões superficiais ( $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{LV}$  e  $\gamma_{SV}$ ) e a ação da força gravitacional. Uma análise realizada por Extrand e Moon (2010) demonstrou que para que a premissa da gota esférica seja válida, o volume desta deve ser inferior a  $10 \mu\text{L}$  para gotas com ângulos de contato entre  $10^\circ$  e  $140^\circ$ .

O algoritmo do meio ângulo, também conhecido como método  $\theta/2$  fundamenta-se na premissa da gota esférica. Logo, o ângulo  $\theta$  pode ser obtido através da Eq. (1) para gotas cujos ângulos de contato possuem valores menores do que  $90^\circ$ , e através da Eq. (2) para as demais, como ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Aplicação do algoritmo do meio ângulo



Fonte: Autoria própria (2020).

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left( \frac{h}{d} \right) \quad (1)$$

$$\theta = \left[ \tan^{-1} \left( \frac{h}{d} \right) \right] + 90 \quad (2)$$

Rotenberg *et al* (1983) foram os responsáveis pelo desenvolvimento da *Axisymmetric Drop Shape Analysis* (ADSA). De maneira básica, o método consiste em realizar a análise do perfil da gota através da combinação entre o perfil experimental e um perfil teórico encontrado. Valores de tensão superficial são necessários para a concepção do perfil teórico.

Bateni *et al* (2003) apresentaram um esquema de ajuste polinomial automatizado para determinar os ângulos de contato. As coordenadas do perfil da gota são extraídas através de técnicas de processamento de imagem, e então um ajuste polinomial é realizado. Por fim, o ângulo de contato é calculado através da inclinação da curva do polinômio no ponto de interface entre sólido, líquido e ar.

Para tanto, o presente trabalho consiste na análise de uma série de imagens elaboradas artificialmente, levando em conta a variação de parâmetros como o ângulo de contato e o método de ajuste de curvas utilizado.

## ELABORAÇÃO DO ALGORITMO

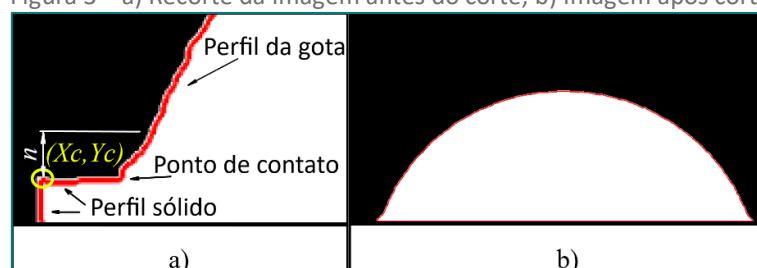
Com o intuito da determinação dos ângulos de contato, um algoritmo de processamento de imagens foi elaborado através do *software* MATLAB® versão 2012 e se fundamenta na realização de três grandes etapas, sendo elas: detecção inicial dos limites, rotação, corte, classificação, seleção dos pontos utilizáveis e ajuste.

A etapa inicial tem a função de localizar as coordenadas dos pixels que representam o perfil externo do conjunto gota-superfície sólida. Para tanto, o valor do limiar de luminância é calculado por meio do método de Otsu (1979), e então é realizado o processo de binarização. As cores da imagem são invertidas, para que a região interna dos limites apresente a cor branca. É possível que, devido à reflexos, haja heterogeneidades na porção referente à gota, que por sua vez, são mantidas mesmo após o processo de binarização. Portanto, o preenchimento interno é realizado seguido do rastreamento dos limites do conjunto gota-superfície sólida.

O processo de rotação tem como função corrigir possíveis desnivelamentos. Através do conjunto de coordenadas obtidas são localizadas as coordenadas dos valores máximo ( $X_{max}$ ) e mínimo ( $X_{min}$ ) da parcela superior do substrato, medidos ao longo do eixo  $x$ . Por meio de tais pontos uma reta é elaborada, e através de seu coeficiente angular o ângulo de rotação é determinado. A imagem, então, é rotacionada. Após a rotação um novo rastreamento de limites é realizado.

O corte tem a função de eliminar o perfil do sólido e parte da premissa de que sua superfície é perfeitamente plana, de modo que a parcela superior de seu perfil possa ser representada pela reta construída anteriormente. São localizadas as coordenadas ( $X_c, Y_c$ ) do valor mínimo da parcela superior do sólido, ao longo do eixo  $x$  e o corte é realizado de maneira a eliminar toda a parcela da imagem que esteja abaixo de  $Y_c$ . No entanto, em alguns casos nos quais a superfície possui irregularidades, o corte realizado na altura de  $Y_c$  pode preservar algumas parcelas do sólido, comprometendo as análises seguintes. E então, com o intuito de realizar eventuais correções, o programa permite ao usuário a entrada do valor de um índice de corte  $n$ , que indica a quantidade de pixels ao longo do eixo  $y$  acima do nível de  $Y_c$  na qual o corte deve ocorrer. O valor de  $n$  deve ser o menor possível, para que não haja imprecisões significativas nas etapas posteriores. A etapa de corte é ilustrada pela Figura 3.

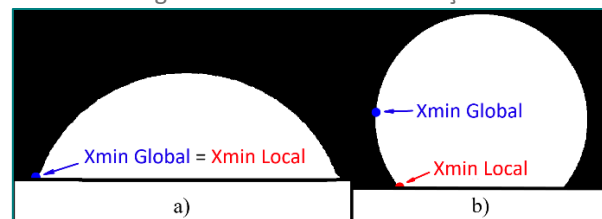
Figura 3 – a) Recorte da imagem antes do corte; b) Imagem após corte



Fonte: Autoria própria (2020).

Ainda é necessário classificar o perfil da gota entre aquelas que possuem ângulos de contato menores do que  $90^\circ$  e aquelas que possuem ângulos de contato maiores do que  $90^\circ$ . Para tanto, são localizadas as coordenadas do mínimo valor do perfil da gota medido ao longo do eixo  $x$  ( $X_{min Global}$ ), além do mínimo valor do perfil da gota analisado apenas na região em que há contato com a superfície sólida ( $X_{min Local}$ ). Caso os valores de  $X_{min Global}$  e  $X_{min Local}$  coincidam, a gota é classificada entre aquelas que possuem ângulos de contato menores do que  $90^\circ$ . Caso contrário, a gota é classificada entre aquelas que possuem ângulos de contato maiores do que  $90^\circ$ , como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Análise e classificação.



Fonte: Autoria própria (2020).

Para as gotas cujos ângulos de contato possuem valores menores do que  $90^\circ$ , o único procedimento necessário consiste na retirada dos pontos que caracterizam a zona de contato entre líquido e sólido. Fazendo uso do mesmo raciocínio da etapa anterior, as coordenadas do ponto  $X_{max Local}$  são localizadas e todos os pontos da região intermediária de  $X_{min Local}$  e  $X_{max Local}$  que possuírem a mesma coordenada  $Y_c$  medida ao longo do eixo  $y$ , são eliminados. Já para as gotas que possuem seus ângulos de contato maiores do que  $90^\circ$ , além da retirada dos pontos que representam a região de contato entre líquido e sólido, ainda é necessária a eliminação dos pontos que caracterizam a parcela superior da gota. Tal fato é realizado para que o ajuste de curvas seja possível sem a utilização de um sistema de coordenadas polares. Para tanto, apenas os pontos localizados entre  $X_{min Local}$  e  $X_{max Local}$  são aproveitados na etapa de ajuste.

Por fim, torna-se necessário o ajuste de uma função matemática que represente os pontos selecionados. Nessa etapa, uma curva de ajuste é calculada, e através da derivada da função aplicada no ponto de contato, a inclinação da curva é calculada, determinando assim, o ângulo de contato. No presente trabalho, dois métodos de ajuste são analisados sendo eles: o ajuste polinomial e o ajuste através das séries de Fourier. Os ângulos de contato também foram determinados através do método  $\theta/2$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

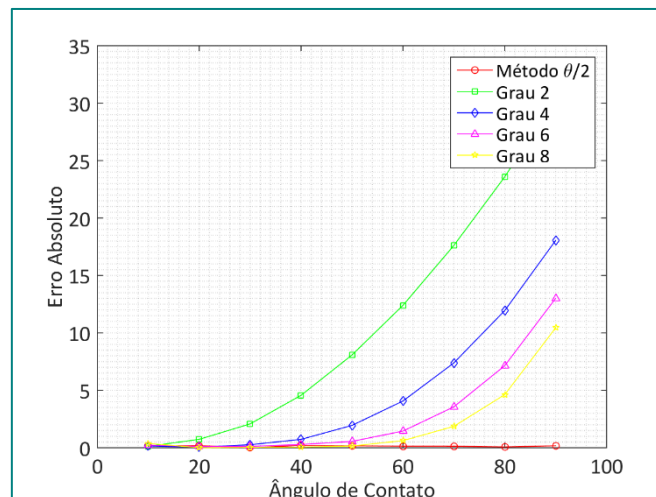
Foram elaborados artificialmente, através do *software* LibreCAD, imagens do conjunto gota-superfície sólida, para gotas perfeitamente esféricas. A utilização dos perfis artificiais se deve ao fato de que, além da possibilidade de comparação do resultado obtido com o valor real predeterminado, torna-se possível a avaliação de uma ampla gama de gotas com diferentes valores de ângulos de contato. Para tanto, foram elaborados perfis cujos valores do ângulo  $\theta$  partem de  $10^\circ$  a  $170^\circ$ , intercalados igualmente entre si pelo intervalo de  $10^\circ$ . Cada perfil teve seus ângulos determinados através de múltiplos métodos de ajuste de curvas, sendo

eles: o ajuste polinomial (de 2°, 4°, 6° e 8° graus) e o ajuste através de Séries de Fourier (de 1, 3, 5 e 7 termos). Os ângulos de contato também foram determinados através da utilização do método  $\theta/2$ . Por fim, o erro absoluto de cada medida foi calculado, sendo definido pela Eq. (3). As análises foram realizadas com  $n = 2$ .

$$E_{abs} = |\theta - \text{valor real}| \quad (3)$$

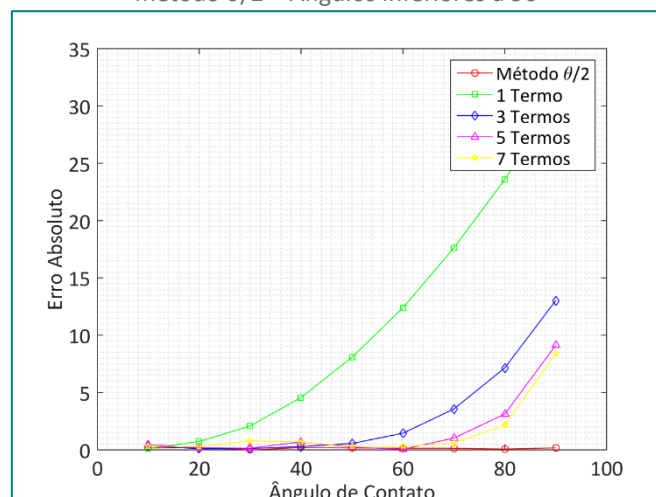
Encontram-se na Figura 5 e na Figura 6 os resultados obtidos para as gotas com ângulos de contato menores do que 90°.

Figura 5 – Comparação entre método de ajuste polinomial e o método  $\theta/2$  – Ângulos inferiores à 90°



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 6 – Comparação entre o método de ajuste através das séries de Fourier e o método  $\theta/2$  – Ângulos inferiores à 90°



Fonte: Autoria própria (2020).

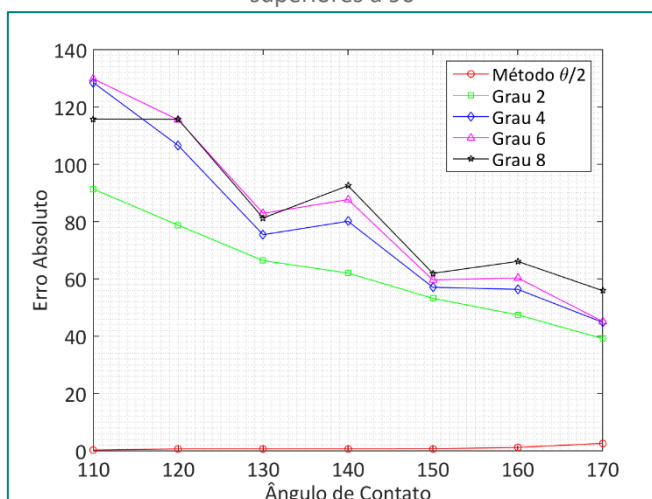
É possível notar que, os resultados obtidos através do método  $\theta/2$  são os que apresentam os menores erros quando comparado aos demais, mantendo-se próximo de zero para toda a gama de ângulos de contato analisada. Em contrapartida, os resultados que apresentam os maiores valores de erro absoluto são aqueles obtidos através do ajuste polinomial de grau 2. Além do mais observa-

se que, na medida em que o grau do polinômio de ajuste aumenta, tornam-se menores os erros, no entanto, nota-se ainda que para um polinômio de grau 8, o erro absoluto assume valores consideráveis à medida em que o ângulo de contato aumenta.

Para o ajuste através das Séries de Fourier, nota-se, em essência, um comportamento muito similar ao apresentado pelo ajuste polinomial. Os ajustes que possuem menor quantidade de termos apresentam valores de erro elevados quando comparados aos demais. Porém, ainda que para um ajuste de 7 termos, os valores de erro assumem valores consideráveis conforme há o aumento de  $\theta$ .

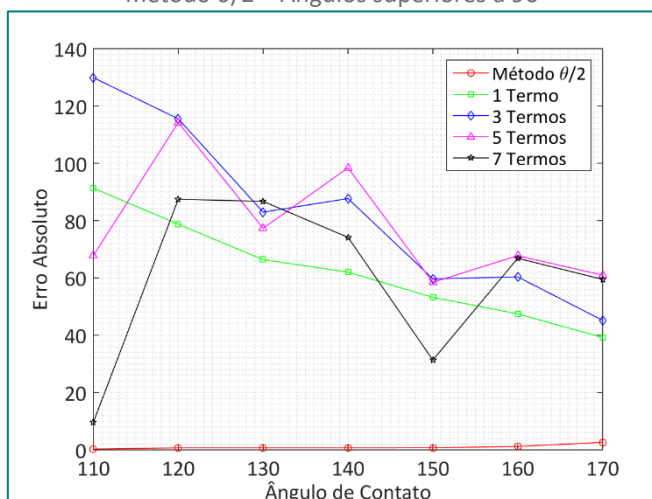
Encontram-se na Figura 7 e na Figura 8 os resultados obtidos para as gotas com ângulos de contato maiores do que  $90^\circ$ .

Figura 7 – Comparação entre o método de ajuste polinomial e o método  $\theta/2$  – Ângulos superiores à  $90^\circ$



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 8 – Comparação entre o método de ajuste através das séries de Fourier e o método  $\theta/2$  – Ângulos superiores à  $90^\circ$



Fonte: Autoria própria (2020).

Nota-se que para as gotas cujos ângulos de contato possuem valores maiores do que  $90^\circ$ , nenhuma espécie de ajuste apresentou resultados consistentes. Os

elevados valores de erro absoluto se devem ao fato de que, para o grupo de gotas em análise, a região selecionada para o ajuste representa uma baixa quantidade de pontos, o que compromete a qualidade do ajuste de curvas. Há ainda, uma tendência de diminuição do erro conforme o aumento do ângulo de contato. Tal fato se deve à ocorrência de que, com o aumento dos ângulos de contato, há também o aumento da quantidade de pontos selecionada. Pode se observar também que os resultados obtidos através do método  $\theta/2$  continuam a apresentar valores de erro próximos a zero, no entanto, há uma tendência de aumento do mesmo conforme há o aumento do ângulo de contato, o que pode ser explicado pelos pixels desconsiderados através do índice  $n$ , que passam a ser mais significativos com o aumento do ângulo de contato.

## CONCLUSÃO

Após a observação dos resultados obtidos através da análise de gotas de formato esférico cujos ângulos de contato possuem valores inferiores a  $90^\circ$ , nota-se que o ajuste polinomial é capaz de fornecer baixos valores de erro apenas para os casos em que os valores dos ângulos de contato são relativamente pequenos, e à medida em que há o aumento do grau utilizado no ajuste polinomial, o intervalo cujos valores de erro apresentam valores próximos a zero se expande. Além do mais, para o ajuste realizado através das Séries de Fourier, pode-se observar, de maneira básica, o mesmo comportamento. O método  $\theta/2$  apresenta valores de erro próximos a zero para toda gama de ângulos de contato analisados. Sendo assim, conclui-se que, para gotas cujos os valores de  $\theta$  são inferiores à  $90^\circ$ , os cálculos realizados por meio do ajuste polinomial de  $8^\circ$  grau (ajuste polinomial mais eficaz dentre os analisados) apresentam aplicabilidade para ângulos inferiores a  $60^\circ$ , enquanto que os cálculos realizados por meio do ajuste através das Séries de Fourier de 7 (ajuste através de Séries de Fourier mais eficaz dentre os analisados) termos apresentam aplicabilidade para ângulos inferiores a  $70^\circ$ , devido valores de erro próximos a zero, enquanto que o método  $\theta/2$  é aplicável para todos os valores de ângulo de contato.

Já para a análise dos resultados obtidos através da análise de gotas de formato esférico cujos ângulos de contato possuem valores superiores a  $90^\circ$ , ambos métodos de ajuste apresentam valores de erro consideráveis, não possuindo, portanto, nenhuma aplicabilidade para o tipo de análise descrito no presente trabalho, enquanto que o método  $\theta/2$  apresenta aplicabilidade para todo o intervalo analisado, apresentando relativo aumento nos valores de erro para os ângulos de valor superior à  $160^\circ$ .

Por fim, em uma observação geral conclui-se que, para gotas de formato esférico, a análise mais eficiente consiste no método  $\theta/2$ , devido ao fato de apresentar valores de erro próximos a zero para toda a gama de ângulos de contato analisada, além de exigir menores recursos computacionais, quando comparados com os outros métodos também analisados.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu professor orientador Fábio Kenji Suguimoto por toda dedicação e paciência, e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela oportunidade.

## REFERÊNCIAS

BATENI, A. et al. A high-accuracy polynomial fitting approach to determine contact angles. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, Canada, v. 219, n. 1, p. 215-231, jan./2003.

EXTRAND, C. W.; MOON, S. I. When sessile drops are no longer small: transitions from spherical to fully flattened. **Langmuir**, Minnesota, v. 26, n. 14, p. 11815 - 11822, jun./2010.

OTSU, N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, Tokyo, v. 9, n. 1, p. 62-66, jan./1979.

ROTENBERG, Y.; BORUVKA, L.; NEUMANN, A. A. W. Determination of Surface Tension and Contact Angle from the Shapes of Axisymmetric Fluid Interfaces. **Journal of Colloid and Interface Science**, Toronto, v. 93, n. 1, p. 169-183, mar./1982.