



Uma abordagem experimental e interdisciplinar para o ensino de física: determinação da concentração micelar crítica por espalhamento de luz

An experimental and interdisciplinary approach to physics teaching: determination of critical micellar concentration by light scattering

Elizete J. Patel¹, Luiz A.A. Pereira¹, Sergio L. Gómez^{*1}, Rozane F. Turchiello²

¹Universidade Estadual de Ponta Grossa, Departamento de Física, Ponta Grossa, PR, Brasil.

²Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Física, Ponta Grossa, PR, Brasil.

Recebido em 26 de junho de 2025. Revisado em 22 de outubro de 2025. Aceito em 22 de outubro de 2025.

No campo dos fluidos supramoleculares, um dos conceitos fundamentais é o da concentração micelar crítica (CMC), definida como o limiar de concentração a partir do qual moléculas tensoativas passam a se auto-organizar em agregados supramoleculares com distintas geometrias. A morfologia dessas estruturas depende de diversos fatores, incluindo a natureza e a quantidade dos tensoativos presentes, bem como variáveis termodinâmicas, como a temperatura. Dentre essas estruturas, as micelas destacam-se por sua simplicidade e relevância. Sistemas micelares desempenham um papel crucial na solubilização de compostos hidrofóbicos, sendo amplamente utilizados, por exemplo, na liberação de fármacos. Neste trabalho, propõe-se uma atividade introdutória para um curso de Físico-Química, cuja finalidade é a determinação experimental da CMC do dodecil sulfato de sódio (SDS) por meio de medidas de espalhamento de luz.

Palavras-chave: Concentração micelar crítica, espalhamento de luz, dodecil sulfato de sódio.

In the field of supramolecular fluids, one of the fundamental concepts is the critical micelle concentration (CMC), defined as the concentration threshold above which surfactant molecules begin to self-assemble into supramolecular aggregates with distinct geometries. The morphology of these structures depends on various factors, including the nature and amount of the surfactants present, as well as thermodynamic variables such as temperature. Among these structures, micelles stand out for their simplicity and relevance. Micellar systems play a crucial role in the solubilization of hydrophobic compounds and are widely used, for instance, in drug delivery. In this work, we propose an introductory activity for a Physical Chemistry course aimed at the experimental determination of the CMC of sodium dodecyl sulfate (SDS) through light scattering measurements.

Keywords: Critical micelle concentration, light scattering, sodium dodecyl sulfate.

1. Introdução

A concentração micelar crítica (CMC) corresponde ao valor de concentração a partir do qual moléculas surfactantes – caracterizadas por apresentarem simultaneamente regiões hidrofílica e hidrofóbica – passam a se auto-agregar espontaneamente em estruturas organizadas denominadas micelas [1]. Sistemas micelares desempenham papel importante em diversos campos como a medicina e a farmacêutica, servindo como meios para transporte e solubilização de compostos e moléculas num meio no qual estes não são solúveis [2–5]. Devido às características das moléculas tensoativas, elas podem ser dispersas tanto em meios polares quanto apolares. Em meios aquosos, as micelas são formadas de maneira que a região apolar ou hidrofóbica esteja confinada dentro da micela, sem contato com a água, estando

os grupos polares situados na superfície das micelas. O oposto acontece quando dispersamos as moléculas tensoativas em meios apolares. A forma e tamanho dos agregados micelares dependem do tipo e concentração de moléculas anfífilas, sendo possível desde agregados com simetria esférica ou esferoides a cilindros e lamelas (Figura 1), sendo que nas geometrias mais simples, o seu tamanho é da ordem de 5 nm [6]. As propriedades físico-químicas das soluções de moléculas anfífilas sofrem alterações significativas na região da CMC, as quais podem ser utilizadas para a sua determinação como, por exemplo, variações na condutividade elétrica [7], tensão superficial [8] e viscosidade [9].

Objetos com dimensões menores que o comprimento de onda da luz, como as micelas, espalham a luz incidente neles de forma elástica, em um processo chamado espalhamento Rayleigh. A intensidade desse espalhamento é maior para luz com comprimentos de onda menores, seguindo uma relação de λ^{-4} . Assim, luz visível das cores violeta e azul ($\lambda \approx 380 - 495$ nm)

*Endereço de correspondência: sgomez@uepg.br

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

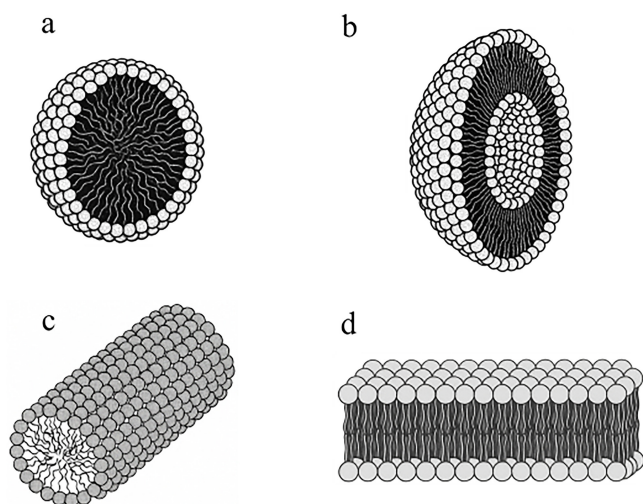


Figura 1: Seções transversais de alguns exemplos de estruturas formadas com moléculas anfifílicas: a) micela esférica, b) lipossomo, c) micela cilíndrica, d) lamela.

sofrem maior espalhamento que a luz das cores laranja e vermelha ($\lambda \approx 620 - 750 \text{ nm}$). Determinações da CMC de moléculas anfifílicas por espalhamento de luz empregando equipamentos sofisticados também têm sido reportado [10–12]. Em trabalho anterior, foi desenvolvido um arranjo experimental para o estudo das propriedades do espalhamento Rayleigh mediante a observação experimental do efeito Tyndall, utilizando nanopartículas plasmônicas [13]. Nesta comunicação é proposta a utilização do mesmo arranjo experimental para a determinação da CMC do dodecil sulfato de sódio (SDS), um surfactante de fácil acesso e que é um ingrediente comum em shampoos, sabonetes líquidos e cremes de barbear. A confiabilidade do arranjo utilizado para a medida da CMC foi confirmada por meio da medida da condutividade elétrica, uma das técnicas utilizadas em laboratórios de pesquisa para o mesmo fim, a medida da CMC. Esta experiência pode ser utilizada nos cursos iniciais de química e física para ilustrar o processo de auto organização de moléculas tensoativas.

2. Moléculas Tensoativas e Micelas

Moléculas tensoativas, também chamadas de anfifílicas, possuem duas regiões com diferentes graus de solubilidade. Elas possuem uma ou mais cadeias carbônicas, as quais são hidrofóbicas mas solúveis em solventes não-polares e uma região hidrofílica, solúvel em água e outros solventes polares. A Figura 2 mostra um esquema da molécula de SDS utilizada neste trabalho. A molécula de SDS possui uma cadeia de hidrocarbonetos (região hidrofóbica) e um grupo polar que na presença da água sofre uma dissociação iônica, liberando o íon sódio (íon positivo), permanecendo ligado à cadeia de hidrocarbonetos o grupo sulfato (íon negativo).



Figura 2: Estrutura molecular do dodecil sulfato de sódio (SDS).

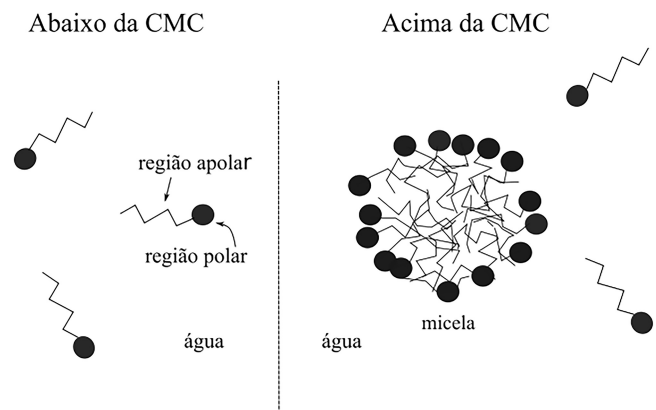


Figura 3: Arranjo das moléculas anfifílicas abaixo e acima da CMC.

A hidrofiliicidade e hidrofobicidade estão relacionadas à capacidade de uma determinada molécula ou parte de moléculas de interagir eletrostaticamente com a água, a qual possui um momento de dipolo elétrico associado a uma distribuição assimétrica dos elétrons. Quando duas moléculas possuem dipolo elétrico, elas tendem a se orientar para minimizar a energia potencial de interação. A interação dipolo-dipolo da molécula de água com outras moléculas polares dá-se via o átomo de hidrogênio, sendo chamada de ligação de hidrogênio ou ponte de hidrogênio [14]. Moléculas polares, como a água, não formam ligações de hidrogênio com moléculas apolares. Assim, na presença de uma molécula ou grupo apolar, as moléculas de água tendem a se organizar ao redor da molécula apolar, formando ligações de hidrogênio apenas entre si, porém em conformações menos favoráveis. Acima de uma determinada concentração, o arranjo em micelas reduz a energia livre do sistema pela redução do contato das regiões apolares com a água. A Figura 3 mostra o arranjo das moléculas anfifílicas abaixo e acima da CMC.

3. Espalhamento de Luz

Detalhes sobre o espalhamento de luz podem ser obtidos na ref. [13]. De maneira resumida, a luz é uma onda eletromagnética ou seja, são campos elétricos e magnéticos que se propagam solidariamente. No caso de uma onda plana linearmente polarizada com a sua parte elétrica polarizada ao longo do eixo x, se propagando na direção do semi-eixo z positivo, a onda pode ser representada

pela seguintes expressões:

$$\mathbf{E} = E_0 e^{i(kz - \omega t)} \mathbf{i} \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = H_0 e^{i(kz - \omega t)} \mathbf{j} \quad (2)$$

onde $E_0 \mathbf{i}$ e $H_0 \mathbf{j}$ são os vetores amplitude do campo elétrico e magnético, respectivamente, ϕ é a fase relativa inicial, $k = 2\pi/\lambda$ é o número de onda e $\omega = 2\pi c/\lambda$ é a frequência angular da onda. Quando uma onda incide sobre uma partícula, ela induz a formação de um dipolo elétrico oscilante (na frequência da luz) que irradiará em todas as direções. Como o campo elétrico oscila muito rapidamente, não é possível medir ele diretamente. Entretanto, sim é possível medir o valor médio num intervalo de tempo muito maior que o período associado a ele ($\Delta t \gg 2\pi/\omega$). Define-se a intensidade I da onda eletromagnética como $I = \langle S \rangle$, a média temporal do módulo do vetor $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$, chamado vetor de Poynting. A partir das equações de Maxwell pode-se mostrar que o módulo do campo magnético é proporcional ao do campos elétrico, assim $I \propto E_0^2$.

Devido à distribuição espacial desordenada das partículas, as ondas emitidas por cada centro espalhador, em todas as direções exceto na direção de incidência, não são coerentes entre si. Assim, a intensidade total emitida por N partículas será $NI(r, \theta)$, onde $I(r, \theta)$ representa a intensidade da radiação espalhada por uma única partícula a uma distância r , na direção definida pelo ângulo θ que é formado entre a direção da polarização da luz incidente (isto é, a direção do dipolo induzido) e a direção de propagação da onda espalhada [15]. Essa radiação apresenta simetria cilíndrica em torno da direção do dipolo induzido. A distâncias muito maiores que o comprimento de onda (zona de radiação) e para comprimentos de onda maiores que o tamanho do dipolo induzido, pode-se mostrar que a intensidade emitida por uma partícula é dada por:

$$I(r, \theta) = \frac{\pi^2 c^3 \mu_0 p_0^2}{2\lambda^4} \frac{\sin^2 \theta}{r^2}. \quad (3)$$

onde p_0 é a magnitude do dipolo elétrico induzido, c é a velocidade da luz e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo. Considerando a dependência angular da intensidade de luz espalhada, a Eq. 2 mostra que esta é nula na direção dada pelo ângulo $\theta = 0$, isto é, na direção do eixo do dipolo elétrico induzido, sendo máxima numa direção perpendicular ($\theta = 90^\circ$) ao eixo do dipolo elétrico induzido, a mesma da polarização da luz incidente. A equação mostra ainda a dependência da intensidade espalhada com o inverso da quarta potência do comprimento de onda λ .

4. Detalhes Experimentais

Trabalhos prévios mostraram que a CMC do SDS encontra-se na faixa da 6 a 8 mM [10, 16, 17]. O valor preciso de concentração dependerá de condições

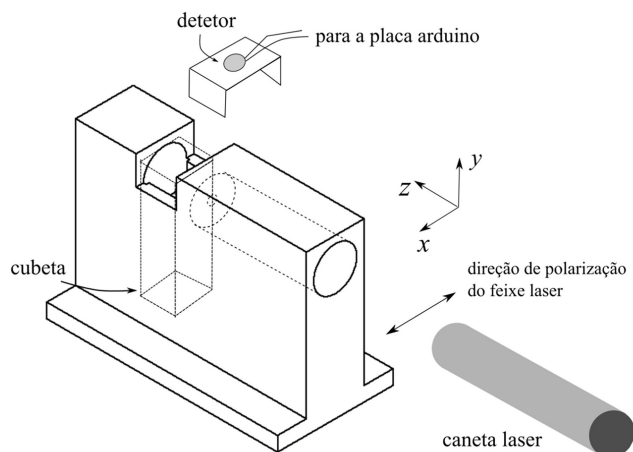
experimentais como a força iônica do meio, temperatura, pureza do SDS, etc. Neste trabalho utilizou-se SDS da empresa Synth e água ultrapura, sendo que as medidas foram realizadas à temperatura ambiente. Água ultrapura (água Milli-Q) é um recurso disponível em laboratórios de química. Também pode ser utilizada água destilada. Não recomenda-se a utilização de água da torneira. A presença de impurezas na água, especialmente íons (saís) pode inviabilizar a formação de micelas ou alterar significativamente as condições sob as quais elas se formam. No caso de não ter acesso ao SDS, qualquer outro surfactante pode ser utilizado. Para este trabalho foram preparadas 12 amostras de soluções aquosas de SDS (massa molar 288,38 g), com concentrações de 1 a 12 mM, com variação de 1 mM. Cada uma delas foi preparada pesando inicialmente uma determinada massa de SDS dentro de um tubo de ensaio. Posteriormente é adicionada a água até atingir o volume para a concentração desejada. Com o tubo de ensaio devidamente fechado, ele é agitado (manualmente ou usando um agitador mecânico) para obter uma solução homogênea. Devido à agitação, bolhas de ar são formadas. Recomenda-se deixar as amostras repousarem por 24 h a fim de possibilitar que as bolhas formadas durante o preparo se desfaçam. Para as medidas de condutividade elétrica foi utilizado o condutivímetro DM-32 da DIGIMED.

O arranjo experimental para a medida de espalhamento de luz é o seguinte:

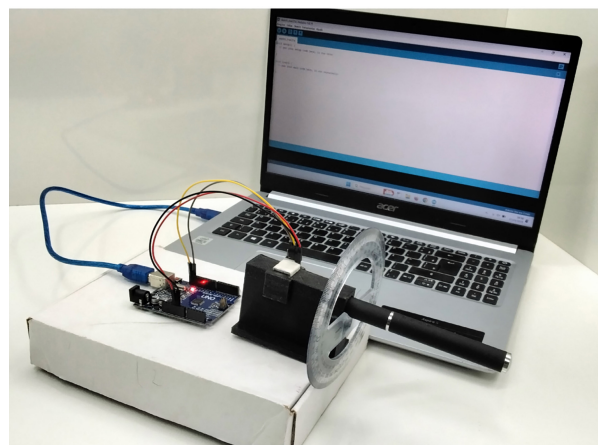
1. caneta laser de luz azul linearmente polarizada,
2. placa Arduino,
3. sensor de luminosidade TSL2561,
4. computador,
5. cubeta de 1 cm de caminho óptico,
6. suporte para laser, cubeta e detetor,

Instruções para a construção do suporte encontram-se na ref. [18]. A Figura 4 mostra o arranjo experimental utilizado.

Como fonte de luz, utilizou-se uma caneta laser comercial, emissora de luz azul linearmente polarizada. Se o feixe não for linearmente polarizado, somente metade da potência do laser levaria a um espalhamento a ser detectado. Por conta da dependência com o inverso da quarta potência do comprimento de onda da luz, o espalhamento da luz azul é um pouco maior que no caso da luz verde e muito maior no caso da luz vermelha. Para comprovar isso, pode-se utilizar canetas laser das cores verde e vermelha. Na nossa experiência, não foi possível detectar a CMC usando luz tanto da cor verde quanto da cor vermelha. Isto pode ser devido tanto à dependência do espalhamento com o comprimento de onda da luz, quanto à condição da caneta laser e de sua fonte de energia e à sensibilidade do detector. Para uma maior intensidade de luz espalhada na direção perpendicular (a 90° da direção de incidência), a polarização da luz incidente deve ser perpendicular à direção de observação.



(a) Imagem explodida do arranjo experimental.



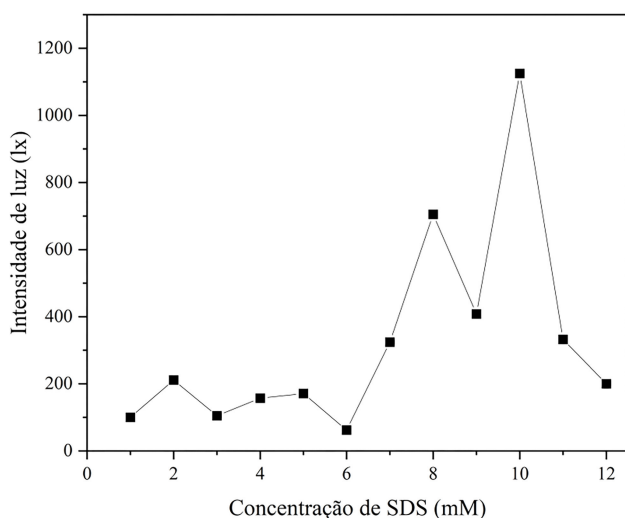
(b) Arranjo experimental utilizado na experiência.

Figura 4: Arranjo experimental. a) imagem explodida mostrando a polarização do feixe incidente em relação à direção de observação. b) Imagem real do arranjo, ligado a um notebook via placa Arduino para a coleta dos dados.

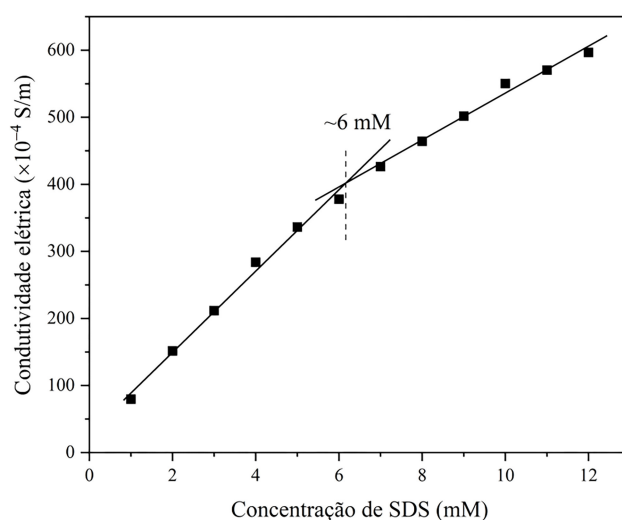
Esta orientação pode ser determinada girando a caneta laser em torno do seu eixo longitudinal até obter um máximo na leitura do detector. A amostra deve preencher a cubeta de tal forma que o feixe da caneta laser passe o mais próximo possível da superfície do líquido. Deve-se tomar cuidado para que as condições experimentais sejam as mesmas para todas as amostras. Principalmente, deve-se ter extremo cuidado para que a distância do feixe à superfície seja constante em todas as amostras, pois variações podem afetar a intensidade medida. Por esse motivo, o ponteiro laser também deve estar firmemente ajustado dentro do suporte.

5. Resultados e Discussões

A medida da intensidade de luz espalhada a 90° em função da concentração de SDS é mostrada na Figura 5a. Para concentrações de 1 a 6 mM, a intensidade espalhada é aproximadamente constante, em torno de 100 lx. É precisamente em torno do 6 mM que a intensidade da luz espalhada aumenta devido à formação das micelas. Para concentrações menores que 6 mM, as moléculas de SDS (monômeros) encontram-se dispersas na solução e na superfície do líquido. A partir da CMC, a concentração de monômeros se mantém estável e as novas moléculas



(a) Intensidade de espalhamento da luz em função da concentração de SDS.



(b) Curva de condutividade elétrica em função da concentração de SDS. A linha tracejada indica a interseção dos ajustes lineares nas porções inicial e final do gráfico, identificando o valor da CMC.

Figura 5: Medidas experimentais para a determinação da CMC.

que vão sendo adicionadas se arranjam em micelas, levando ao aumento do espalhamento de luz. As variações na intensidade da luz espalhada com o aumento da concentração de SDS podem ser atribuídas a diversos fatores. O aumento no número de micelas formadas em função da maior concentração do surfactante aumenta a intensidade de luz espalhada. Outra fonte de variabilidade na intensidade espalhada é a reprodutibilidade no preenchimento do porta-amostra. Pequenas diferenças na distância do feixe à superfície do líquido pode levar a mudanças na intensidade de luz medida. Quanto maior a distância, menor a intensidade medida pelo detector (maior número de centros espalhadores, ou seja micelas no caminho do feixe até o detector). A formação de um menisco na parede da cubeta devido à tensão superficial pode ser também fonte de imprecisão na hora do preenchimento, pela dificuldade de determinar a altura no nível do líquido. Um aprimoramento que poderia melhorar a reprodutibilidade é a utilização de um porta-amostra fechado na parte superior por uma tampa transparente. Desta forma o volume poderia ser mantido sempre constante, eliminando essa fonte de incerteza.

Como forma de confirmar o valor da CMC obtido a partir das medidas de espalhamento de luz, realizamos a determinação da CMC via medida da condutividade elétrica [19]. O grupo polar da molécula anfifílica se dissocia, liberando o contraíon, sendo no caso do SDS um íon sódio. O aumento de moléculas anfifílicas na solução, e abaixo da CMC, leva a um aumento da presença de íons e contraíons na solução o que leva a um aumento da condutividade elétrica. Acima da CMC, a taxa de aumento da condutividade elétrica com o aumento de moléculas anfifílicas diminui devido à formação das micelas. A carga superficial negativa das micelas, devida ao grupo sulfato, atrai os íons sódio, deixando menos cargas disponíveis para contribuir à condutividade elétrica. Assim, o coeficiente angular da curva de condutividade elétrica em função da quantidade de moléculas anfifílicas diminui acima da CMC. A Figura 5b mostra o gráfico da condutividade elétrica em função da concentração de SDS. Observa-se que a condutividade elétrica da solução em função da concentração de SDS apresenta comportamento linear, caracterizado por diferentes coeficientes angulares nas regiões inicial e final. O valor da concentração correspondente ao ponto de inflexão é o da CMC. O ponto de inflexão pode ser encontrado pelo método de Williams e col. [20, 21], que consiste na determinação da interseção de duas retas obtidas a partir dos ajustes lineares dos conjuntos de pontos iniciais e finais dos dados de condutividade elétrica em função da concentração. O valor da CMC determinado por este método é de aproximadamente 6,1 mM (linha vertical tracejada na Figura 5b), valor este em concordância excelente com o valor obtido a partir do espalhamento de luz.

6. Conclusões

Neste trabalho apresentamos a aplicação do espalhamento de luz na determinação da concentração micelar crítica do dodecil sulfato de sódio, uma molécula anfifílica de amplo uso. O arranjo experimental utilizado foi desenvolvido em nosso grupo de pesquisa e apresentado em artigo anterior. O valor obtido da CMC foi comparável ao obtido por meio de uma técnica utilizada para o mesmo fim em laboratórios de pesquisa. Este trabalho é um exemplo de que arranjos experimentais simples mas devidamente fundamentados e cuidadosamente operados permitem obter determinações precisas de parâmetros físico-químicos como, por exemplo, a CMC de moléculas anfifílicas, assim como visualizar um aspecto importante da interação da luz com a matéria, como é o espalhamento de luz. O arranjo proposto neste artigo permite a visualização de um dos processos mais interessantes no campo dos fluidos supramoleculares, servindo como motivação para estudos mais avançados nesta área.

Agradecimentos

Os autores agradecem às seguintes instituições pelo apoio financeiro: CNPq, CAPES, Fundação Araucária, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Universidade Tecnológica Federal do Paraná e Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Fluidos Complexos (INCT-FCx).

Disponibilidade de Dados

Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo foi publicado no próprio artigo.

Referências

- [1] I.H. Bechtold, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **27**, 333 (2005).
- [2] M.L.C. Montanari, C.A. Montanari, D. Piló-Veloso, A.E. Beezer e J.C. Mitchell, *Quim. Nova*, **21**, 470 (1998).
- [3] M.C. Jones, H. Gao e J.C. Leroux, *J. Control. Release* **132**, 208 (2008).
- [4] L.I. Atanase, *Polymers* **13**, 477 (2021).
- [5] Q. Wang, K. Atluri, A.K. Tiwari e R.J. Babu, *Pharmaceuticals* **16**, 433 (2023).
- [6] A.M. Figueiredo Neto, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **43**, e20200300 (2021).
- [7] S.L. Moraes e M.O.O. Rezende, *Quim. Nova* **27**, 701 (2004).
- [8] J.L. Behring, M. Lucas, C. Machado e I.O. Barcellos, *Quim. Nova* **27**, 492 (2004).
- [9] F.E. Stanley, A.M. Warner, E. Schneiderman e A.M. Stalcup, *J. Chromatogr. A* **1216**, 8431 (2009).
- [10] L. Nielinger, K. Alker, W. Hiller e L.H. Urner, *Chem-PlusChem* **90**, e202400645 (2025).

- [11] S. Paillet, B. Grassl e J. Desbrières, *Anal. Chim. Acta* **636**, 236 (2009).
- [12] Ö. Topel, B.A. Çakır, L. Budama e N. Hoda, *J. Mol. Liq.* **177**, 40 (2013).
- [13] L.A.A. Pereira, R.C. Garcia, S.L. Gómez e R.F. Turchiello, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **44**, e20220268 (2022).
- [14] J.N. Israelachvili, *Intermolecular and surface forces* (Academic Press, San Diego, 2011), 3 ed.
- [15] E. Hecht, *Optics*, International edition. (Addison Wesley, San Francisco, 2002), 4 ed.
- [16] H. Li, D. Hu, F. Liang, X. Huang e Q. Zhu, *R. Soc. Open Sci.* **7**, 192092 (2020).
- [17] M.J. Rosen e J.T. Kunjappu, *Surfactants and Interfacial Phenomena* (Wiley-Interscience, Hoboken, 2012), 4 ed.
- [18] CULTS, *Holder for studying light scattering*, disponível em: <https://cults3d.com/en/3d-model/various/holder-for-studying-light-scattering>, acesso em: 17/08/2025.
- [19] I.M. Rizzatti, D.R. Zanette e L.C. Mello, *Quim. Nova* **32**, 518 (2009).
- [20] M. Pérez-Rodríguez, G. Prieto, C. Rega, L.M. Varela, F. Sarmiento e V. Mosquera, *Langmuir* **14**, 4422 (1998).
- [21] R.J. Williams, J.N. Phillips e K.J. Mysels, *Trans. Faraday Soc.* **51**, 728 (1955).