

# Bolas de Sabão: preparação, estrutura e propriedades

MÁRIO NUNO BERBERAN E SANTOS<sup>a</sup>, CLEMENTINA TEIXEIRA<sup>b</sup>



*Bola de sabão, memória  
indelével da infância.  
Efémera esfera furta-cores  
feita de coisa nenhuma.*

*Soprada para o ar,  
abandona-se à brisa e às  
correntes. Ao menor toque,  
ou por puro capricho,  
desfaz-se silenciosa em  
ínfimos salpicos.*

## I.Preparação: no rescaldo do Euro 2004, receitas para as claques<sup>1</sup>

*"I would remind you then that when we want to find out anything that we do not know, there are two ways of proceeding. We may either ask somebody else who does know, or read what the most learned men have written about it, which is a very good plan if anybody happens to be able to answer our question; or else we may adopt the other plan, and by arranging an experiment, try for ourselves."*

C. V. Boys, Soap Bubbles: Their Colors and Forces Which Mould Them.

### 1. Breve historial a.E. (antes do Euro)

A primeira vez que me deparei com bolas de sabão gigantes, a sério!, foi aqui há uns anos largos, após a queda do muro de Berlim: a televisão transmitia um programa de variedades, onde a estrela, creio que um malabarista vindo de um dos países de Leste, dominava de forma impressionante a técnica de as produzir. Metia bolas dentro de bolas, saía e entrava paulatinamente de dentro e para dentro delas, enchia-as de fumo de cigarro e dava-lhes todas as formas possíveis e imaginárias. E ele não era nenhum anão, até era avantajado. Também não creio que se tratassem de efeitos especiais – por cá os tugas ainda não eram especialistas nisso.

Da segunda vez, deparei-me com outras bolas no Encontro da SPQ em Guimarães/Braga, dedicado ao tema "A Cor": à laia de recepção dos participantes e de forma muito bem humorada, mostrando uma das facetas do Professor Hernâni Maia, seu promotor, os estudantes produziam-nas, ao mesmo tempo que distribuíam um papelinho verde com a cobijada receita. Este papelinho guardei-o religiosamente em parte incerta, para reler em altura mais oportuna.

Da terceira vez as bolas perseguiam-me de novo, vindas do Norte, atrás do Excelentíssimo Ministro Mariano Gago, durante um Forum Ciência Viva no Parque da Nações.

Decididamente as bolas andavam atrás de mim.

Na altura do Carnaval, resolvi animar o pagode tristonho que sofria pelas garras da recessão. Viviam-se então tempos de triste calma, sem vento para soprar as velas, ou seja, sem massa para os projectos. De facto, uma curta visita à contabilidade do IST, confirmou as piores suspeitas: as pessoas pareciam mais calmas, tinham menos olheiras pois o ritmo das noitadas necessárias à entrega de relatórios de contas e novas propostas tinha indiscutivelmente abrandado... Além do mais, o Técnico começou então a cobrar dívidas antigas, o que me levou a pensar que finalmente tinha conseguido pôr as contas em dia. Por detrás deste panorama de organização burocrática falsamente positivo, escondiam-se

<sup>a</sup> Centro de Química-Física Molecular, Instituto Superior Técnico, 1049-001 Lisboa

<sup>b</sup> Centro de Química Estrutural, Instituto Superior Técnico, 1049-001 Lisboa

<sup>1</sup> por Clementina Teixeira

diam-se os sinais da crise e a quebra no financiamento externo (e interno!)

Temporariamente livre da burocracia inerente a quem se arma em free lancer no campo de projectos da ciência e quejandos, parei para reflectir e imaginar como poderia combater experimentalmente esse marasmo. Contagiada pelas festas Carnavalescas da tão menosprezada zona do interior do País (Penamacor) andei à procura do papel verde e achei:

#### Paper verde

*Autores incógnitos, Universidade do Minho, Guimarães/Braga*

*Receita para fazer bolas de sabão gigantes:*

*10 partes de água, de preferência destilada*

*1 parte de detergente concentrado Fairy (não temos comissão nas vendas)*

*0,25 partes de glicerina*

Comprovei que funcionava, rodeada por familiares que rapidamente se integraram na brincadeira e fizemos furor. Aprimorei então a mistura e bisbilhotei nos livros. **Afinal existem muitas mais receitas o que comprova a impossibilidade de controlar de forma sistemática todos os factores que afectam a formação destes curiosos fenómenos, nomeadamente:**

1. A qualidade da água, em especial a sua dureza.
2. O tipo de detergente, sabão ou champô. Dado o grande número de aditivos presentes, deve ser sempre indicada a sua marca.
3. As condições atmosféricas: temperatura, humidade e existência de vento.
4. O tipo de dispositivo usado para fazer as bolas e as formações tubulares.
5. A destreza do operador.

Passemos a analisar cada um destes factores:

–Verifiquei que a água destilada da drogaria pode ser perfeitamente substituída por água da torneira, a não ser que esta seja especialmente dura, o que se mani-

festa pela dificuldade em fazer espuma nas nossas utilizações diárias.

– **O detergente para louça foi imediatamente chumbado e substituído por champô, gel de banho ou sabão líquido não irritante** e este, preferencialmente, de glicerina. De facto, os rótulos do Fairy e detergentes similares são bem específicos quanto ao facto de serem irritantes para a pele, com recomendações de que sejam mantidos fora do alcance das crianças. São também conhecidas as dermatoses e alergias provocadas por estes produtos de limpeza. Ora, ao re-bentarem, as bolas projectam a mistura para a cara, olhos e esta pode até ser aspirada pelas crianças que acabam sempre soprando e tornando a soprar (ginástica respiratória recomendada pelos pediatras?). Nesses casos o champô de bebé, mais inócuo, impõe-se. Além disso a glicerina também não é inócua e para brincadeiras de soprar com palhinhas basta fazê-lo apenas com mistura de champô e água. Como alguns autores aconselham a substituição de glicerina por açúcar, ou xaropes de açúcar, testei também algumas receitas com essa composição e acabei, para tornar a mistura ainda mais inócua por utilizar uma mistura de água, champô de bebé e mel!

As receitas são mais eficazes no exterior com o tempo húmido e pouco ventoso, o que é óbvio, dado que a evaporação da água é a morte da bolha. Convém também ter em conta a sujeira que a actividade provoca caso seja feita dentro de casa: piso muito escorregadio, manchas de glicerina difíceis de tirar (da

roupa dos estendais dos vizinhos) dos revestimentos de granito da cozinha que ficam manchados... **Proibida também é a utilização de lixívia para a limpeza do local do crime, dada a sua incompatibilidade com os detergentes e a redutora glicerina** (ver Tabela 1).

Quanto ao material para fazer as bolhas e graças à minha tendência para aproveitar e reciclar tudo, penso que são úteis os seguintes objectos, muitas vezes deitados ao lixo:

#### Para soprar e fazer bolas pequenas e médias:

- palhinhas de refresco
- carrinhos de linhas
- argolas metálicas ou plásticas para fazer queijos frescos
- rolos de cartão das embalagens de papel aderente e de alumínio da cozinha
- batedor de claras de arame enrolado
- anéis de plástico de utensílios diversos
- chaminés de vidro de candeeiros (cuidado)

#### Para fazer tubos e bolas gigantes:

- argolas de ferro com pega vertical para segurar,
- suspensores de vasos de jardim
- formas de tartes com buraco circular
- Até jantes de pneus!

Além da forma também interessa a qualidade do material usado para suporte

**Tabela 1** Propriedades da glicerina

Nome/fórmula/Observações	Densidade	T <sub>eb</sub> / ° C	Tensão Superficial / mJ m <sup>-2</sup>	Viscosidade / mPa s
Glicerol; glicerina (nome comum), CH <sub>2</sub> OHCHOHCH <sub>2</sub> OH	1.26	290	63.4 (água: 73.0)	945 (água: 1.0)

Higroscópica, pode explodir com oxidantes fortes tais como clorato de potássio, permanganato de potássio, trióxido de crómio, ácido nítrico, etc.. Nociva para o aparelho respiratório por inalação. Pode irritar a pele e os olhos (ver por exemplo <http://msds.chs.cornell.edu>).

**Caixa 1***Receitas Finais recomendadas*

I)

*Champô ou sabão líquido, de glicerina ou não: 5 medidas (cerca de 200 g)**Glicerina: 2 medidas (100 g)**Água (destilada se necessário): 40 medidas (1400 g)**Argolas metálicas de preferência em ferro.**Misturar bem e armazenar. Mantém-se por longos períodos (meses).*

II)

*Champô de bebé, mel em substituição da glicerina, em tudo o mais igual a I).**A mistura não é tão eficaz e não foi testada para longos períodos de armazenamento.*III) *Receita adaptada do J.Chem. Educ. [1]**Solução A:**200 ml de sabonete líquido em vez do detergente**40 ml de glicerina**1260 ml de água**Solução B**40 g de açúcar branco**460 ml de água**Misturar bem cada solução em separado e só no fim misturar as duas.*

do filme. O vidro e o ferro são mais eficazes do que o plástico. No entanto, o vidro pode partir e tornar-se perigoso se levado à boca e o ferro, se apresentar ferrugem, acaba por contaminar as soluções.

Garrações de plástico, frascos de compota e outras embalagens de produtos caseiros são óptimos para o armazenamento das saponárias por longos períodos (meses). Se forem utilizados materiais plásticos de cozinha para armazenamento **não podem ser usados de novo para preparar alimentos** pois alguns componentes da mistura ficam adsorvidos. A saponária resulta melhor no dia seguinte, após um período de repouso.

Quanto à minha destreza, estimulada pela euforia do rock e do EURO, foi suficiente para contagiar a Zé Afonso (FCUL), o Mário Nuno, e também os meninos do infantário da APIST, com quem passei uma tarde bem divertida.

*Deitar a saponária numa tina grande. Mergulhar a argola na mistura e retirá-la com cuidado, de forma a que nela se forme um filme aderente. Deixar escor-*

*rer o excesso de saponária, mas sempre mantendo o filme. Executar movimentos lentos erguendo a argola e deslocando-a contra o vento. Com um movimento rápido da argola, como quem faz efeitos de bola com a raquete do ténis, soltar a bolha gigante que imediatamente sobe no ar mostrando as cores do arco-íris. Para os tubos gigantes mergulha-se a argola e retira-se rapidamente puxando para cima logo após se ter formado o filme aderente.*

## 2. Breve historial d.E. (depois do Euro)

Durante o Euro, o que restava da minha receita I ainda funcionava e foi excelente para acalmar as minhas claques familiares. Teria feito sucesso nos estádios se o suporte de vasos conseguisse furar a barreira dos pistácios. Mas mesmo cá fora, na vizinhança dos estádios, talvez tivesse conquistado novos adeptos para a Química – e que grande audiência então teríamos! Como a temperatura subiu e a humidade desceu, foi preciso fazer alguns pequenos ajustes, mesmo no chutómetro, como diria Scolari. De facto, fazer bolas de sabão comprova a

necessidade que existe em ultrapassar a teoria e experimentar **mesmo**, dada a dificuldade em controlar todos os parâmetros em jogo.

Fiz também com sucesso bolas brancas, cheias de vapor de água, produzidas pelo meu vaporizador *Projet* para a asma. O caudal de vapor é óptimo, as bolas são bem brancas e opacas, alimtam de moléculas de água a fina membrana elástica retardando a sua evaporação e evitam a tradicional utilização do fumo de cigarro, para não ensinar as crianças a fumar! Só que, em vez de subirem, como seria de esperar, devido à menor densidade do vapor de água em relação ao ar, descem: na realidade a nuvem branca a que chamamos vapor é constituída por minúsculas gotículas de água líquida suspensas na mistura ar/vapor. Assim a bolha aumenta de peso e desce mais rapidamente.

As formulações que melhor permitem fazer bolas de sabão gigantes e duráveis não são em geral divulgadas, mantendo-se esotericamente ligadas à empresa ou ao artista que as produz. Por isso mesmo a optimização daquelas que aqui são apresentadas e de outras referenciadas na literatura, ou na Internet, pode constituir um projecto facilmente exequível em casa, com a participação da família. E por que não tentar filmá-las ou fotografá-las à laia de Walter Wick [2]?

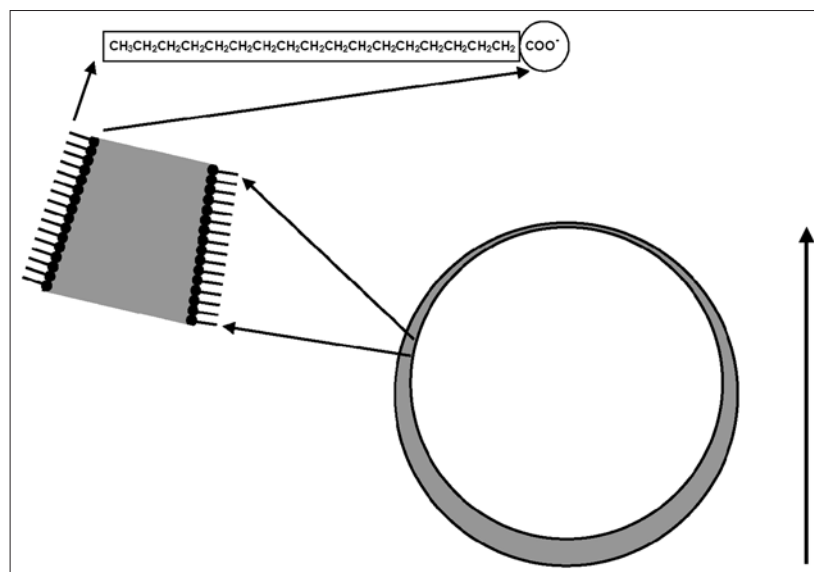
## 3. Interpretação dos fenómenos

Para interpretar convenientemente a formação das bolas de sabão torna-se necessário recordar os seguintes conceitos [3,4]:

– quais as forças intermoleculares existentes na água (forças de van der Waals e pontes de hidrogénio) responsáveis pela sua elevada tensão superficial (Tabela 1).

– o que é a tensão superficial de um líquido e de que forma se manifesta. Saliar algumas das suas consequências: a elasticidade da superfície livre da água líquida; a esfericidade das gotas de água; o rápido colapso das bolhas de água, formando gotas, na ausência de um agente tensoactivo.

**figura 1** Esquema de uma bola de sabão. A espessura está muito exagerada, quando comparada com o raio. A seta (à direita) indica a vertical. A espessura do filme é mínima no topo, e máxima na base. Na ampliação do filme (à esquerda), representam-se as duas monocamadas de tensoactivo, separadas por um meio aquoso. O tensoactivo representado é a base conjugada do ácido esteárico, componente típico de um sabão clássico (mas não de um detergente ou champô).



– caracterizar quimicamente os agentes tensoactivos mais comuns: sabões e detergentes, tipos de detergentes e de que forma baixam a tensão superficial da água.

– explicar a auto-organização destas substâncias na água, dando origem a micelas, bicamadas e outros agregados.

– explicar o que é o efeito hidrofóbico e caracterizá-lo do ponto de vista estrutural e termodinâmico.

– quais as forças intermoleculares da glicerina e de que modo se comparam com as da água, referindo nomeadamente a sua temperatura de ebulição muito superior.

– explicar o que é a viscosidade de um líquido.

– o que é quimicamente um açúcar.

– discutir as propriedades redutoras da glicerina (segurança!) e dos açúcares.

## II. Estrutura e propriedades: de Newton à modernidade<sup>2</sup>

As obras científicas que tratam de bolas de sabão, e.g. [5-7], começam geralmente por uma introdução defensiva, em que se declara que o assunto não é (apenas) pueril, e que cientistas eminentes como Newton, Rayleigh, Gibbs, e Langmuir (grupo a que devemos acrescentar Perrin e de Gennes) não desdenharam de o investigar em pro-

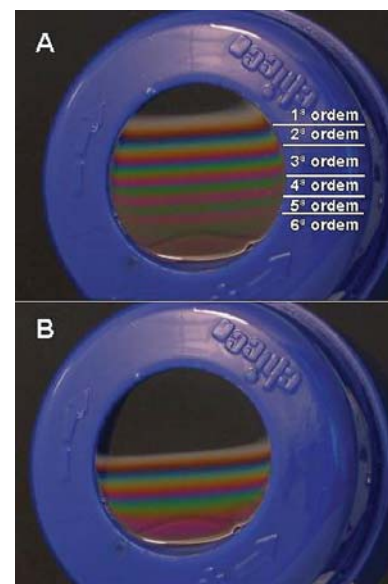
fundidade. Por outro lado, vários grandes pintores foram sensíveis à sua beleza, e dignificaram as bolas de sabão, retratando-as em quadros famosos, de Mignard (1674, Château de Versailles) a Manet (1867, Museu Gulbenkian). É ainda quase desnecessário acrescentar que as bolas de sabão podem e têm sido usadas na motivação dos jovens para a Ciência.

Os filmes transparentes de que são feitas as bolas de sabão observam-se em vários fenómenos do dia-a-dia onde estão presentes espumas aquosas: abluções com detergentes e champôs, libações com cerveja, etc.

Estas espumas e esferas ocas formam-se com soluções aquosas de um tensoactivo, de que é exemplo o sabão clássico, constituído por uma mistura de sais de ácidos gordos, e.g. palmitato e estearato de sódio. Os tensoactivos são moléculas constituídas por duas partes distintas, uma “cabeça” polar (iónica ou não) e uma “cauda” apolar (uma cadeia alifática). A interacção da parte apolar com a água não é favorável termodinamicamente (sobretudo devido à diminuição da entropia da água), pelo que esta tende a ser segregada pela água, quer pela formação de agregados de tensoactivo (e.g. micelas), quer pela formação de uma (mono)camada superficial em que a parte polar fica orientada para o interior da solução, e a parte apolar fica orientada para o ar. Em ambos os

casos, a parte apolar fica isolada do contacto com a água.

É a existência das monocamadas superficiais que explica a relativa estabilidade das bolas de sabão e das espumas. São constituídas por um filme aquoso, essencialmente uma camada fina de água (e algum tensoactivo) delimitada por



**figura 2** Fotografias de um filme de tensoactivo (detergente da louça diluído) colocado verticalmente, intervaladas de alguns segundos. Para suportar o filme usou-se uma tampa de biberão. Observam-se as franjas de interferência resultantes de iluminação com luz branca (lâmpada de incandescência) e o filme negro, que aumenta com o tempo. Na primeira imagem (A), observam-se faixas coloridas até à 6.ª ordem, e na segunda (B) até à 3.ª (ver caixa 2).

<sup>2</sup> por Mário Nuno Berberan e Santos



duas monocamadas superficiais de tensoactivo, figura 1. Inicialmente, o filme tem uma espessura considerável, da ordem de vários  $\mu\text{m}$ . No entanto, essa espessura diminui depressa, quer por evaporação, quer por efeito da gravidade, que faz a água do interior do filme concentrar-se nas partes mais baixas, figura 1. Num filme disposto verticalmente, observa-se ao fim de pouco tempo a formação de bonitas faixas coloridas, figura 2, devidas a fenómenos de interferência construtiva e destrutiva da luz reflectida (ver caixa 2). A espessura é agora de algumas centenas de nm, isto é, da ordem de grandeza do comprimento de onda da luz visível. Pouco tempo depois, a parte superior perde a cor e parece negra por contraste. Na realidade é transparente, mas sem irisado, e ainda reflecte um pouco a luz. Essa zona tem uma espessura de uma centena de nm, ou menos. Na obra clássica *Les Atomes* [8], Jean Perrin discute estes *filmes negros*, aliás já descritos por

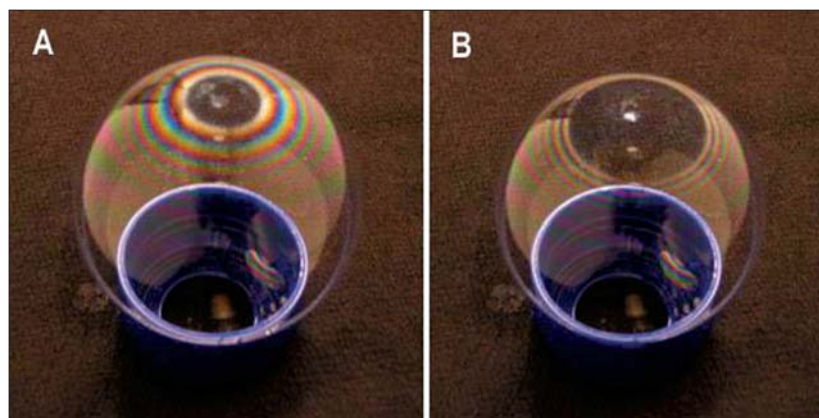
Hooke [6] e por Newton [9]. Citando vários autores, aponta-lhe um valor mínimo de  $60 \text{ \AA}$  (6 nm), isto é, pouco mais que a soma das espessuras das duas monocamadas de tensoactivo (a este filme negro de espessura mínima dá-se por vezes o nome de *filme negro de Newton*, pelo facto de Newton já ter observado que a zona negra não era homogénea, contendo sectores ainda mais negros, isto é, menos espessos). Quando a zona negra ocupa uma parte significativa do filme, o colapso está iminente.

Observa-se exactamente o mesmo fenómeno das faixas coloridas numa bola de sabão imobilizada, figura 3. Ao fim de algum tempo, começam a aparecer faixas circulares horizontais de várias cores, numa sequência idêntica à dos filmes verticais, devido ao progressivo adelgaçamento das paredes do filme, tanto mais fino quanto mais próximo do topo (“Pólo Norte”) da bola, figura 1. É nesta zona polar que se forma o filme

negro. Com o tempo, a área ocupada pelo filme negro vai alastrando, (figura 3), até que a bola acaba por rebentar. O crescimento de um buraco na superfície da bola ocorre com uma velocidade de dezenas de metros por segundo [10, 11], pelo que o rebentamento da bola se dá em milissegundos.

Como foi referido anteriormente, a adição de glicerol (glicerina) à solução de tensoactivo torna as bolas e os filmes mais duradouros, retardando a evaporação e o escoamento de água no filme. Obtém-se um efeito igualmente interessante usando açúcar (sacarose) em vez de glicerol. A água, ao evaporar-se do filme, deixa uma finíssima película de açúcar e tensoactivo, que acaba por abrir um buraco circular cujo crescimento é suficientemente lento para ser facilmente observável.

É possível produzir bolas de sabão e filmes de grande duração. Numa redoma ou recipiente fechado, desde que em



**figura 3** Fotografias da parte superior de uma bola de sabão (detergente da louça) imobilizada num suporte e iluminada com luz branca (lâmpada de incandescência). B é posterior a A em alguns segundos. Observam-se de novo as faixas coloridas horizontais, agora circulares, e também o filme negro, no topo, com a forma de uma calote polar. O filme negro vai aumentando com o tempo. A mancha branca visível no “pólo” é o reflexo da lâmpada no filme negro.

equilíbrio com vapor de água, podem durar meses, ou mesmo anos, no caso de tensoactivos modificados [12].

É também possível fazer bolas e tubos gigantes, estes últimos com mais de 15 metros de comprimento [13]!

A acrescentar aos argumentos apresentados de início, há ainda uma outra razão, muito recente, para não menosprezarmos os filmes e bolas de sabão. Segundo a definição da *National Science Foundation* (EUA), um nanomaterial – expoente máximo da modernidade e das oportunidades de financiamento – é qualquer objecto em que pelo menos

uma das suas três dimensões lineares está entre 1 e 100 nm. Como vimos, nas bolas de sabão atingem-se estas espessuras. Estamos assim também a lidar com um nanomaterial macroscópico, talvez mesmo o mais fácil de produzir, observar e manipular.

#### Bibliografia

- [1] S. Sato, *J. Chem. Educ.* **65** (1988) 616. Nesta referência é dada uma receita com sabão em barra, noutras proporções. Experimentada com sabão azul comum, não funciona.  
[2] W. Wick, *A Drop of water*, Scholastic Press, New York, 1997.

- [3] N. Gettys, E.K. Jacobsen, *J. Chem. Educ.* **78** (2001) 40 A.  
[4] E.J.M. Filipe, *Colóquio/Ciências* **18** (1996) 25.  
[5] C.V. Boys, *Soap bubbles*, Dover, N.Y., 1959 (reimpressão da edição de 1911. A 1.ª edição é de 1890).  
[6] C. Isenberg, *The science of soap films and soap bubbles*, Dover, N.Y., 1992 (reimpressão da edição de 1978).  
[7] D. Lovett, *Demonstrating science with soap films*, IOP, Bristol, 1994.  
[8] J. Perrin, *Les atomes*, Alcan, Paris, 1913.  
[9] I. Newton, *Opticks*, Dover, N.Y., 1979 (reimpressão da 4.ª edição, 1730. A 1.ª edição é de 1704).

[10] P.-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart, D. Queré, *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin, Paris, 2002.

[11] A velocidade é dada aproximadamente por  $v=(2\gamma/\rho\delta)^{1/2}$  em que  $\gamma$  é a tensão superficial,  $\rho$  a massa volúmica do filme e  $\delta$  a sua espessura.

[12] A.V. Grosse, *Science* **164** (1969) 291.

[13] J. Cassidy, *The unbelievable bubble book*, Klutz, Palo Alto, 1987.

### Caixa 2 – As cores das bolas de sabão e dos filmes

As cores dos filmes e das bolas de sabão (figs. 2 e 3) resultam de fenómenos de interferência. Consideremos o caso mais comum, observação da luz reflectida. Para simplificar a análise, suporemos que a radiação incide perpendicularmente ao filme. Num filme existem duas interfaces com o ar. Em cada uma destas interfaces há reflexão parcial (ca. 3%) da onda incidente. Estas duas reflexões não são idênticas, pois numa a onda provém de um meio com menor índice de refração (reflexão na interface ar-filme), e na outra dá-se o oposto (reflexão na interface filme-ar). No primeiro caso, a fase da onda reflectida altera-se de  $180^\circ$ , mas no segundo não há alteração de fase, pelo que existe desde logo uma diferença de percurso óptico efectiva de  $\lambda/2$ , em que  $\lambda$  é o comprimento de onda no filme,  $\lambda=\lambda_0/n$ , sendo  $n$  o índice de refração do filme e  $\lambda_0$  o comprimento de onda da radiação no ar. Assim, quando a espessura do filme é muito inferior ao comprimento de onda, as duas ondas reflectidas, com amplitudes semelhantes, mas de sinal oposto, cancelam-se, e o filme é "negro", isto é, praticamente não reflecte radiação\*. Quando a espessura do filme,  $d$ , não é desprezável, o percurso óptico suplementar da segunda onda em relação à primeira é de  $2d+\lambda/2$ . Assim, as duas ondas estão em fase quando  $2d+\lambda/2$  é um múltiplo do comprimento de onda da radiação,

$$2d + \frac{\lambda}{2} = m\lambda \quad (m = 1, 2, \dots)$$

ou seja,

$$d = \left(m - \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, \dots)$$

ou ainda, explicitamente,

$$d = \frac{\lambda}{4} \quad (1^{\text{a}} \text{ ordem})$$

$$d = 3 \frac{\lambda}{4} \quad (2^{\text{a}} \text{ ordem})$$

$$d = 5 \frac{\lambda}{4} \quad (3^{\text{a}} \text{ ordem})$$

.....

Deste modo, quando a espessura do filme é um múltiplo ímpar de  $\lambda/4$ , a intensidade é máxima para esse comprimento de onda. Como esta condição não se verifica simultaneamente para todos os comprimentos de onda correspondentes ao visível ( $\lambda_0$  de 390 a 770 nm), cada espessura tem uma cor própria, resultante da combinação das diversas intensidades. Com efeito, a cor observada é determinada pela distribuição espectral da radiação reflectida, que por sua vez é função da espessura do filme. A obtenção rigorosa do perfil de cores levar-nos-ia demasiado longe, pelo que se apresenta apenas uma discussão qualitativa. Supondo um índice de refração para o filme de 1.4, independente da espessura e do comprimento de onda, tem-se que  $\lambda$  varia entre 280 e 550 nm. Considerando, para simplificar, que o vermelho corresponde a 680 nm, o verde a 530 nm, e o azul a 470 nm, os correspondentes comprimentos de onda no filme são 490 nm, 380 nm, e 340 nm. Para espessuras muito pequenas (bastante inferiores a  $340/4=85$  nm), a intensidade da luz reflectida é desprezável para todos os comprimentos de onda, e o filme é "negro". A primeira ordem inicia-se aproximadamente aos 20 nm de espessura, mas a intensidade é muito fraca e a cor é cinza. Quando a espessura atinge os 60-90 nm, a intensidade aumenta, e há uma contribuição significativa do azul mas também, embora menor, do verde, o que leva a uma cor cinza-azulado. O filme começa assim por apresentar essa cor (figura 2). Para espessuras maiores, da ordem de

120-150 nm, a contribuição do vermelho é significativa, e a do azul reduzida, e o filme tem uma cor branco-prateado (figura 2). Segue-se uma cor amarela, e depois vermelho-carregado, para ca. de 200 nm. Esta cor corresponde ao fim das primeiras ordens. Segue-se depois a sequência das segundas ordens, que se inicia por um violeta, para uma espessura de 210 nm, passa por azul, verde, amarelo, laranja, e acaba noutra violeta, para uma espessura de ca. 400 nm. A sequência das terceiras ordens é azul (410 nm), verde, amarelo, carmim, e violeta-cinza (600 nm). A partir da quarta ordem, a sequência de cores simplifica-se, tornando-se quase bicolor: verde seguido de rosa apagado. A partir de alguns micrómetros de espessura (ordens muito elevadas), a única cor observada é o branco, isto é, tem-se uma reflexão "normal". Na figura 2A e na figura 3 podem ver-se as primeiras seis ordens descritas, e na figura 2B as primeiras três ordens. A sequência de cores de interferência foi observada e pormenorizadamente descrita por Newton há trezentos anos [9], que também calculou as correspondentes espessuras. Os valores obtidos por Newton, embora da ordem de grandeza correcta, não são exactos, uma vez que resultam da teoria corpuscular da luz (devida ao próprio Newton).

\*Quando o filme está depositado num substrato (e.g. vidro) de índice de refração superior ao do filme, a segunda reflexão também apresenta uma alteração de fase de  $180^\circ$ , e nesse caso a interferência destrutiva dá-se para uma espessura de  $\lambda/4$ . É este o princípio das camadas anti-reflectoras, por exemplo de  $\text{MgF}_2$ . Os revestimentos anti-reflectores reduzem muito mas não eliminam totalmente a reflexão, e têm uma eficiência que depende do comprimento de onda e do ângulo de observação. Dão origem aos reflexos coloridos fracos, por exemplo púrpura, que se observam nas lentes de óculos, binóculos, etc.