CAPÍTULO 7: CAPILARIDADE

Ao colocarmos uma das extremidades de um tubo capilar de vidro dentro de um recipiente com água, observa-se que a água sobe no tubo e entra em repouso a uma determinada altura **acima** da superfície da água no recipiente. Se ao invés de água utilizarmos mercúrio, observa-se que o nível de mercúrio dentro do tubo capilar se estabiliza a uma distância **abaixo** do seu nível no recipiente. No primeiro caso, diz-se ter ocorrido uma **ascensão capilar** e no segundo uma **depressão capilar**. A explicação destes fenômenos capilares é feita com base numa propriedade associada com a superfície livre de qualquer líquido, denominada **tensão superficial.**

7.1 TENSÃO SUPERFICIAL

Imaginemos um determinado líquido (água, por exemplo) em repouso dentro de um recipiente. Cada molécula do líquido é atraída pelas moléculas que a rodeiam por forças de coesão. Esta atração diminui rapidamente com a distância e se torna nula a uma distância *r*, que recebe o nome de raio da esfera de ação molecular. Este raio, portanto, é a distância limite para a qual a molécula consegue exercer forças de atração sobre as outras. Este raio é aproximadamente igual para todos os líquidos, em torno de 0,05 μm.

Nestas condições, moléculas como M_1 ou M_2 (figura 7.1), cujas esferas de ação molecular ou de influência se encontram totalmente dentro do líquido, atraem e são atraídas simetricamente por todas as moléculas vizinhas, isto é, as forças de coesão são equilibradas e sua resultante é nula.

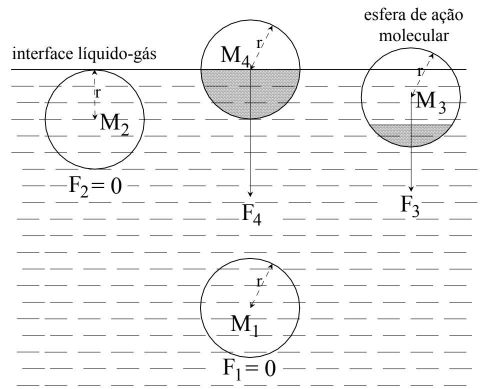

Figura 7.1 - Forças nas moléculas de um líquido.

Entretanto, para qualquer molécula, cuja esfera de ação não esteja inteiramente no interior do líquido, como M_3 e M_4, por exemplo (figura 7.1), as forças sobre ela não se equilibram porque a calota inferior da sua esfera de ação (área hachurada na figura) está cheia de moléculas que a atraem, mas a calota correspondente superior cai fora do líquido e não está cheia de moléculas como a inferior. Devido a isso, a força de coesão resultante do hemisfério superior da esfera de ação molecular se torna menor do que a resultante do hemisfério inferior. Como conseqüência, tal molécula é atraída para o interior do líquido pela resultante dessas forças de coesão não equilibradas. Evidentemente esta resultante é nula quando a distância entre a molécula e a superfície do líquido for maior ou igual a *r* (molécula M_2) e vai aumentando à medida que a molécula se aproxima da superfície do líquido até um máximo, quando se encontra na interface (molécula M_4).

Portanto, em todas as moléculas situadas na camada superficial de espessura *r* ou "camada ativa" de um líquido, atuam forças que tendem a puxá-las para o interior do líquido causando no interior do líquido uma pressão chamada **pressão interna** P'**.** Assim, todo o líquido, além da pressão atmosférica que atua externamente sobre sua superfície, está sujeito também à pressão interna P' oriunda das forças moleculares de coesão não equilibradas da camada ativa. Para a água, $P' \approx 1700$ MPa. Pela ação dessas forças, a superfície do líquido se contrai minimizando sua área, e adquire uma energia potencial extra que se opõe a qualquer tentativa de distendê-la, ou seja, ocorrendo uma distensão, a tendência da superfície é sempre voltar a posição original. Em outras palavras, devido a essas forças, a superfície do líquido se torna **contrátil**. A essa energia potencial extra adquirida pela superfície do líquidodá-se o nome de **energia potencial superficial.** Dessa forma, para aumentar a área de um líquido, isto é, aumentar a quantidade de moléculas na camada ativa, haverá gasto de energia. A quantidade de energia que se gasta para aumentar a área superficial de um líquido é chamada de *tensão superficial*, e ela é representada pela letra grega sigma (σ). A unidade de tensão superficial, conseqüentemente, é a de energia por área: J m^{-2}. Como um Joule equivale a Newton multiplicado por metro, o J m^{-2} equivale ao N m^{-1}, que é a unidade de σ mais comumente encontrada. Como vimos para viscosidade, a tensão superficial de um líquido também depende de sua natureza e da temperatura. A tabela a seguir mostra alguns valores de tensão superficial para líquidos comuns à temperatura de 293 K.

Líquido	**Tensão superficial ($N\ m^{-1} = J\ m^{-2}$)**
água	0,073
álcool etílico	0,022
mercúrio	0,500
azeite de oliva	0,033
glicerina	0,062

Uma conseqüência importante da tensão superficial dos líquidos e que é básica para o entendimento dos fenômenos capilares, é o fato de que se a superfície de um líquido deixar de ser plana, surge uma nova pressão p que pode atuar no mesmo sentido que a pressão P' que é o que ocorre numa superfície convexa, ou opostamente a P' como numa superfície côncava (Figura 7.2). Para uma superfície esférica com raio de curvatura R, essa pressão é dada pela fórmula de Laplace:

$$p = \frac{2\sigma}{R} \qquad (7.1)$$

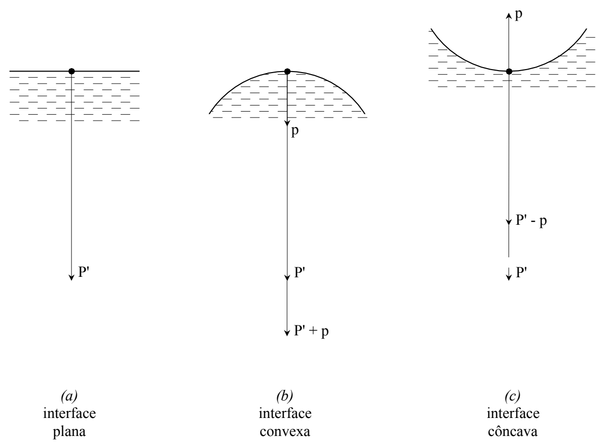

Figura 7.2 - Pressão interna sob uma superfície plana (a), convexa (b) e côncava (c)

7.2 ÂNGULO DE CONTATO

Quando colocamos água pura num copo de vidro limpo, notamos que, próximo da sua parede, a superfície da água se encurva para cima. Se, ao invés de água, colocarmos mercúrio no copo, observa-se que a curvatura da superfície é voltada para baixo (figura 7.3). Observa-se também que, no caso da água, a superfície se adere ao vidro, ao passo que no caso do mercúrio, existe uma tendência para a superfície se afastar do vidro.

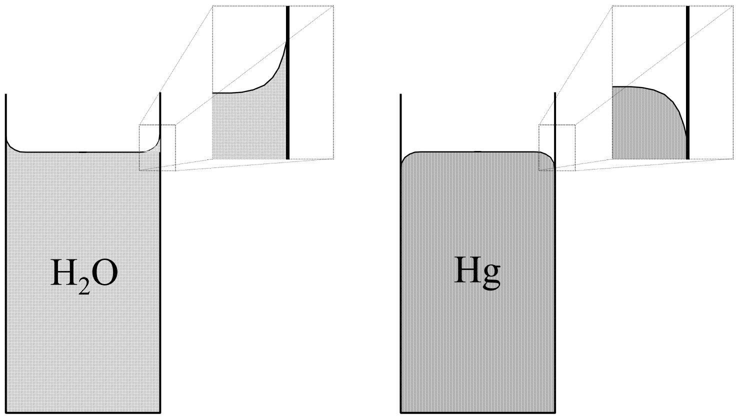

Figura 7.3- curvatura da superfície de um líquido próximo a uma parede sólida.

Esses fenômenos se devem às forças de coesão entre as moléculas do líquido e as de adesão entre as moléculas do líquido e as da parede (vidro, plástico, metal etc.). No caso da água num copo de vidro, as forças de adesão entre as moléculas da água e a parede são maiores que as de coesão na própria água. Daí a tendência da água aderir no copo, curvando-se para cima na proximidade da parede, formando um menisco côncavo. No caso de mercúrio, as forças de coesão entre suas moléculas são maiores que as de adesão entre mercúrio e vidro. Assim, a tendência do mercúrio é se afastar da parede, formando um menisco convexo.

Podemos quantificar essa tendência de um líquido aderir ou não numa parede sólida pelo *ângulo de contato* (α), como mostra a figura 7.4. Esse ângulo é medido entre a parede e a tangente à superfície do líquido no ponto de contato com a parede. Para meniscos côncavos, α se encontra entre 0° e 90° (figura 7.4a). Para meniscos convexos, α fica entre 90° e 180° (figura 7.4b). Conseqüentemente, quanto maiores as forças de adesão entre parede e líquido em relação às de coesão do próprio líquido, menor será α. No caso de água e vidro considera-se, normalmente, α = 0°. No caso de mercúrio e vidro, α é da ordem de 140°.

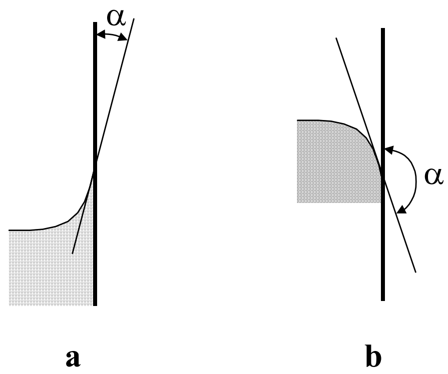

Figura 7.4 – Ângulo de contato α para um menisco côncavo (a) e um convexo (b)

7.3 CAPILARIDADE

Sabemos da hidrostática que, quando se preenchem vários vasos comunicantes com um determinado líquido, este sempre atinge a mesma altura em todos os ramos. Entretanto, para tubos de pequeno diâmetro (= *tubos capilares*) esta afirmação não é verdadeira, devido aos fenômenos relacionados com a tensão superficial do líquido em contato com uma parede sólida.

Assim, se tomarmos um tubo em *U*, no qual um dos ramos é capilar (diâmetro interno de, por exemplo, 0,2 mm) e outro não (diâmetro interno de, por exemplo, 20 mm) e o preenchermos com água, verifica-se um desnível *h* entre as duas superfícies livres, sendo o nível mais alto no tubo capilar (figura 7.5a). Preenchendo o tubo com mercúrio, observamos que o nível no tubo capilar é mais baixo (figura 7.5b).

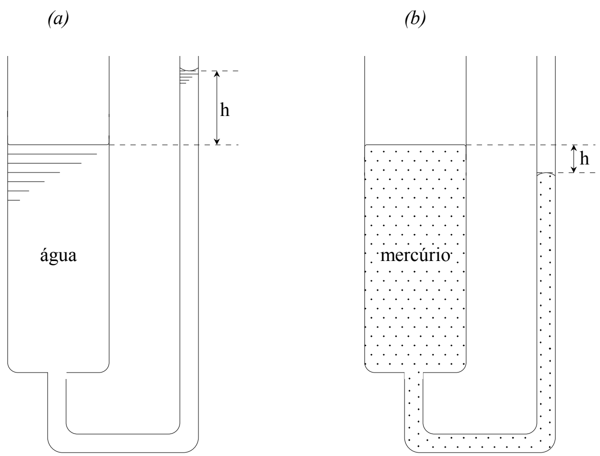

Figura 7.5 - Ascensão capilar (a) e depressão capilar (b).

Esse fenômeno se deve à presença da Pressão de Laplace que atua na superfície curva do líquido no capilar. Geometricamente verifica-se a seguinte relação entre o ângulo de contato, o raio do capilar (*r)* e o raio de curvatura do menisco (*R)* (Figura 7.6a):

$$R = \frac{r}{\cos\alpha} \tag{7.2}$$

Substituindo a equação 7.2 na 7.1 obtém-se

$$p = \frac{2\sigma\cos\alpha}{r} \tag{7.3}$$

Portanto, temos na superfície de um líquido num capilar uma força f que atua para cima, devido à pressão de Laplace, e outra, gravitacional (F_g), para baixo, devido ao peso da coluna do líquido no capilar (Figura 7.6b). Como força é pressão multiplicada por área, a força f equivale à pressão de Laplace multiplicada pela área transversal do capilar:

$$f = p.\pi r^2 = 2\sigma\pi r\cos\alpha \tag{7.4}$$

e a força gravitacional equivale a

$$F_g = mg = \rho Vg = \rho\pi r^2 hg \tag{7.5}$$

Em equilíbrio as duas forças serão iguais, portanto:

$$2\sigma\pi r\cos\alpha = \rho\pi r^2 hg \Rightarrow h = \frac{2\sigma\cos\alpha}{\rho g r} \tag{6}$$

onde σ é a tensão superficial do líquido, α é o ângulo de contato, ρ é a densidade do líquido, g é a aceleração da gravidade e r é o raio do tubo

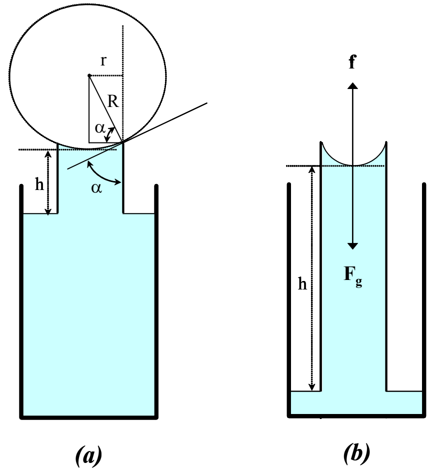

Figura 7.6 - Relação entre ângulo de contato, raio do capilar e raio de curvatura do menisco (a) e forças que atuam na superfície de um líquido num capilar (b).

A equação 7.6, que relaciona a altura *h* com o raio do tubo capilar é chamada a *equação da capilaridade* ou *equação de Jurin*. Por essa equação verifica-se que quando $\alpha < 90°$, $\cos\alpha > 0$ e $h > 0$, ou seja, ascensão capilar. Quando $\alpha > 90°$, $\cos\alpha < 0$ e $h < 0$ (depressão capilar). No caso de água em capilares de vidro podemos usar $\sigma = 0{,}073$ N.m^{-1}, $\alpha = 0°$, $\rho = 1000$ kg.m^{-3} e $g = 9{,}81$ m.s^{-2}, e a equação 7.1 se torna

$$h = \frac{1{,}5.10^{-5}}{r} \tag{7.7}$$

Exemplo 1:

Num experimento de ascensão capilar, a que altura *h* água pura subirá num tubo capilar de vidro de 0,1 mm de diâmetro? Dados: ρ = 1000 kg/m^3; α = 0°; σ = 0,073 N/m.

Solução: Aplicando-se a equação 7.6:

$$h = \frac{2.0{,}073\cos 0°}{1000.9{,}81.0{,}1.10^{-3}} = 0{,}15\text{ m ou }15\text{ cm}$$

Note que nesse exemplo, onde se trata de água e vidro, poderíamos ter aplicado a equação 7.7 para achar o resultado diretamente.

Exemplo 2:

Se, ao invés de um tubo capilar de vidro, utilizássemos um tubo de plástico de 0,1 mm de diâmetro com o qual a água forma um ângulo de contato de 30°, qual seria a ascensão capilar?

Solução: Aplicando-se a equação 7.6:

$$h = \frac{2.0{,}073\cos 30°}{1000.9{,}81.0{,}1.10^{-3}} = 0{,}13\text{ m ou }13\text{ cm}$$

Note que nesse exemplo não poderíamos ter aplicado a equação 7.7 porque o ângulo de contato difere de 0°.

Exemplo 3:

Podemos usar o conhecimento da equação 7.6 para determinar a tensão superficial de um líquido. Por exemplo, se um tubo capilar com 0,88 mm de diâmetro interno é mergulhado numa cuba com glicerina, e a glicerina subir 23,3 mm no tubo, qual é seu coeficiente de tensão superficial? A densidade de glicerina é 1260 kg m^{-3}. Considere α = 0°.

Solução: Rescrevendo a equação 7.6 temos:

$$\sigma = \frac{h\rho g r}{2\cos\alpha}$$

Substituindo os valores obtemos:

$$\sigma = \frac{23{,}3.10^{-3}.1260.9{,}81.0{,}44.10^{-3}}{2\cos 0°} = 0{,}063\text{ N m}^{-1}$$

EXERCÍCIOS

7.1 Calcular a ascensão capilar de água em tubos de vidro com diâmetro de:
- a) 1 cm
- b) 1 mm
- c) 1 μm

7.2 Calcular a depressão capilar de mercúrio (σ = 0,5 N m^{-1}, ρ = 13600 kg m^{-3} e α = 140°) num tubo capilar de diâmetro de 0,05 mm.

7.3 Se ao se colocar um tubo capilar de vidro verticalmente dentro de uma vasilha com determinado líquido formar-se um menisco com ângulo de contato de 90°, o líquido subirá ou descerá no tubo capilar? Qual será a forma da superfície líquida no capilar?

7.4 A que altura *h* água pura (ρ = 1000 kg/m^3; α = 0, σ = 71,97.10^{-3}; N/m) subirá num tubo capilar de vidro de 0,1 mm de diâmetro?

7.5 Se o tubo capilar do problema anterior for quebrado, de tal modo que seu comprimento acima da superfície livre da água se tornar *h/2*, haverá fluxo de água através do capilar? Por que?

7.6 Se, ao invés de água, utilizássemos mercúrio (ρ = 13600 kg.m^{-3}, α = 140 °, σ = 513.10^{-3} N/m) no exercício 4, de quanto seria a depressão capilar?

7.7 Um tubo capilar com 0,88 mm de diâmetro interno é mergulhado numa cuba com glicerina. A glicerina sobe 2,33.10^{-2} m no tubo. Sendo sua densidade igual a 1260 kg/m^3, qual é seu coeficiente de tensão superficial? Assuma α = 0°.

7.8 No mesmo experimento de demonstração da ascensão capilar, o que aconteceria, depois de a água ter estabilizado a uma altura *h,* se uma parte dela fosse, retirada do capilar? A altura *h* diminuiria? Explique. E se o processo fosse o inverso, isto é, depois do equilíbrio ainda existisse capilar acima do menisco e fosse possível colocar água (sem aprisionar ar) através do capilar, a altura *h* aumentaria? Por que?

Respostas: **1.a)** 3 mm **b)** 30 mm **c)** 30 m **2.** 0,23 m