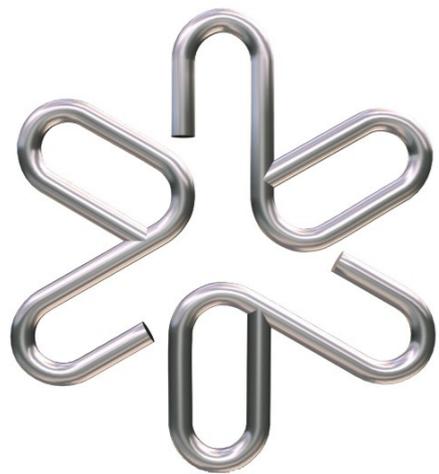


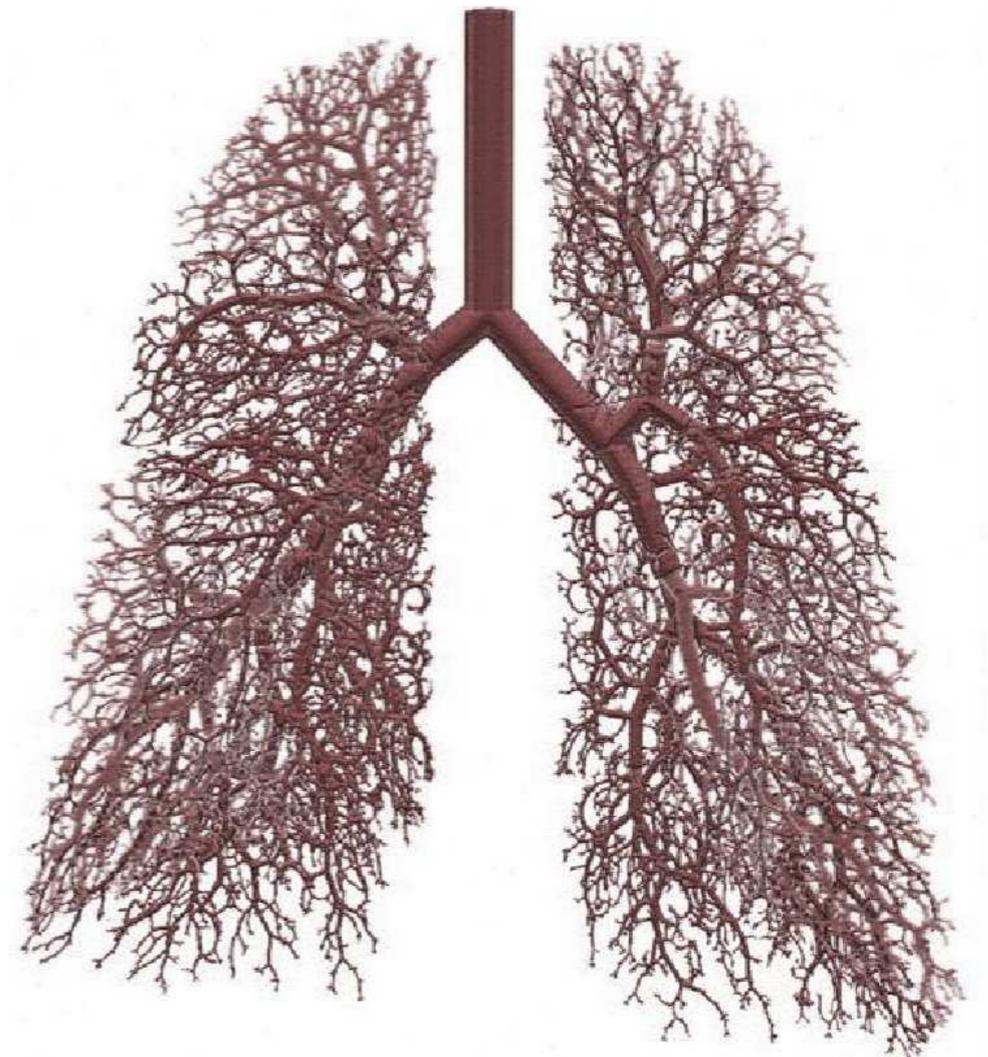
Física do Corpo Humano

Prof. Adriano Mesquita Alencar
Dep. Física Geral
Instituto de Física da USP



Sistema Respiratório

D02



Circulação Sangüínea

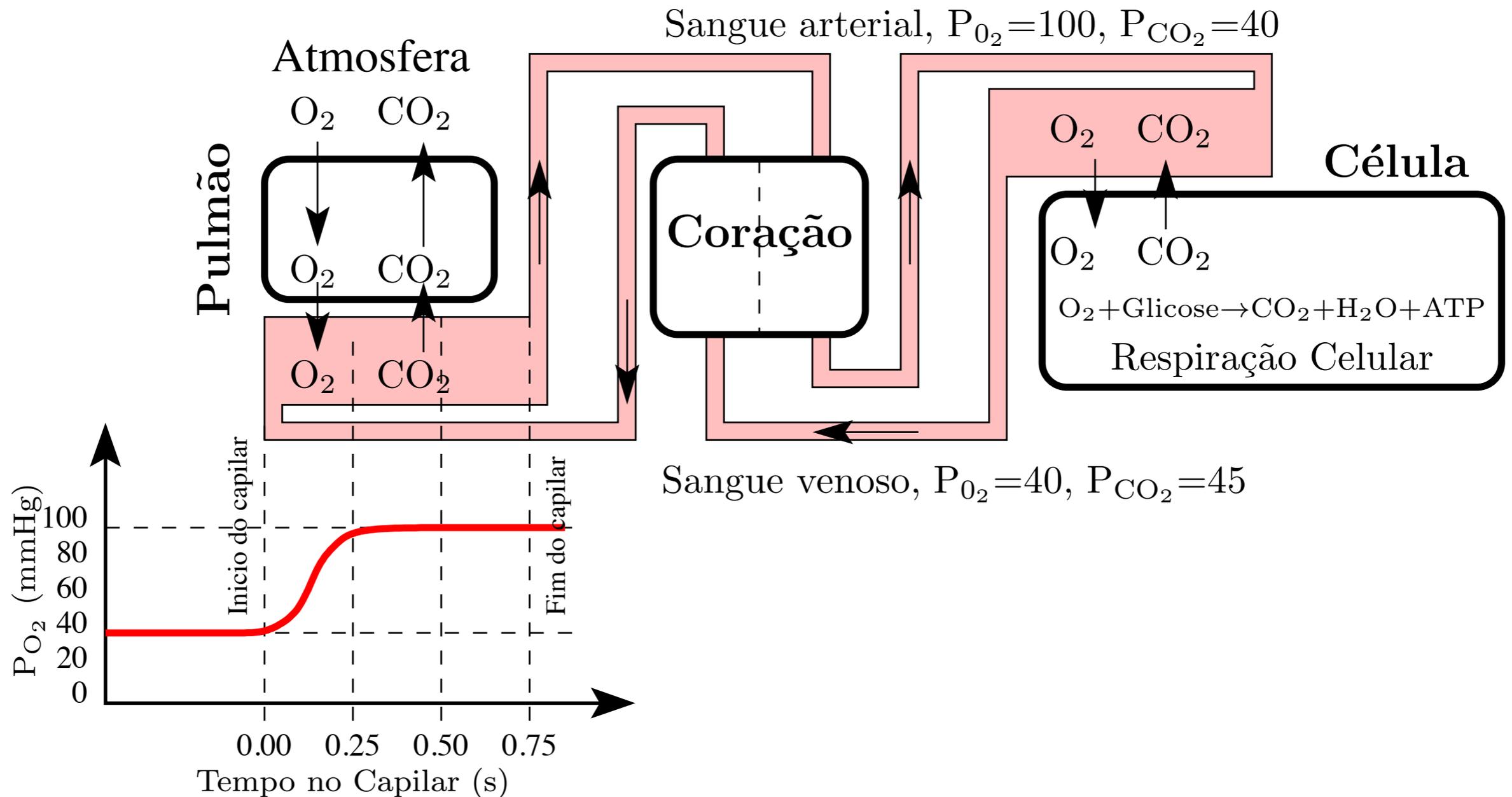


Figura 1-1: Exemplo diagramático do caminho do O_2 e do CO_2 entre a atmosfera e as células.

Uma estrutura tipo árvore

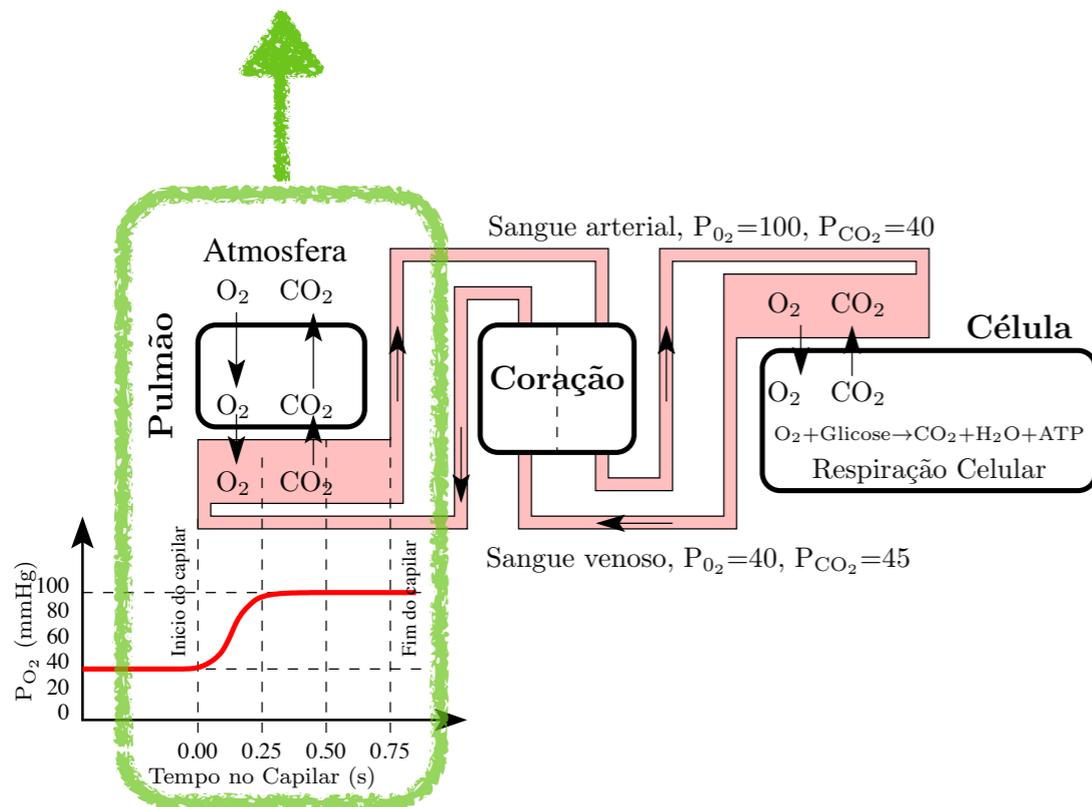
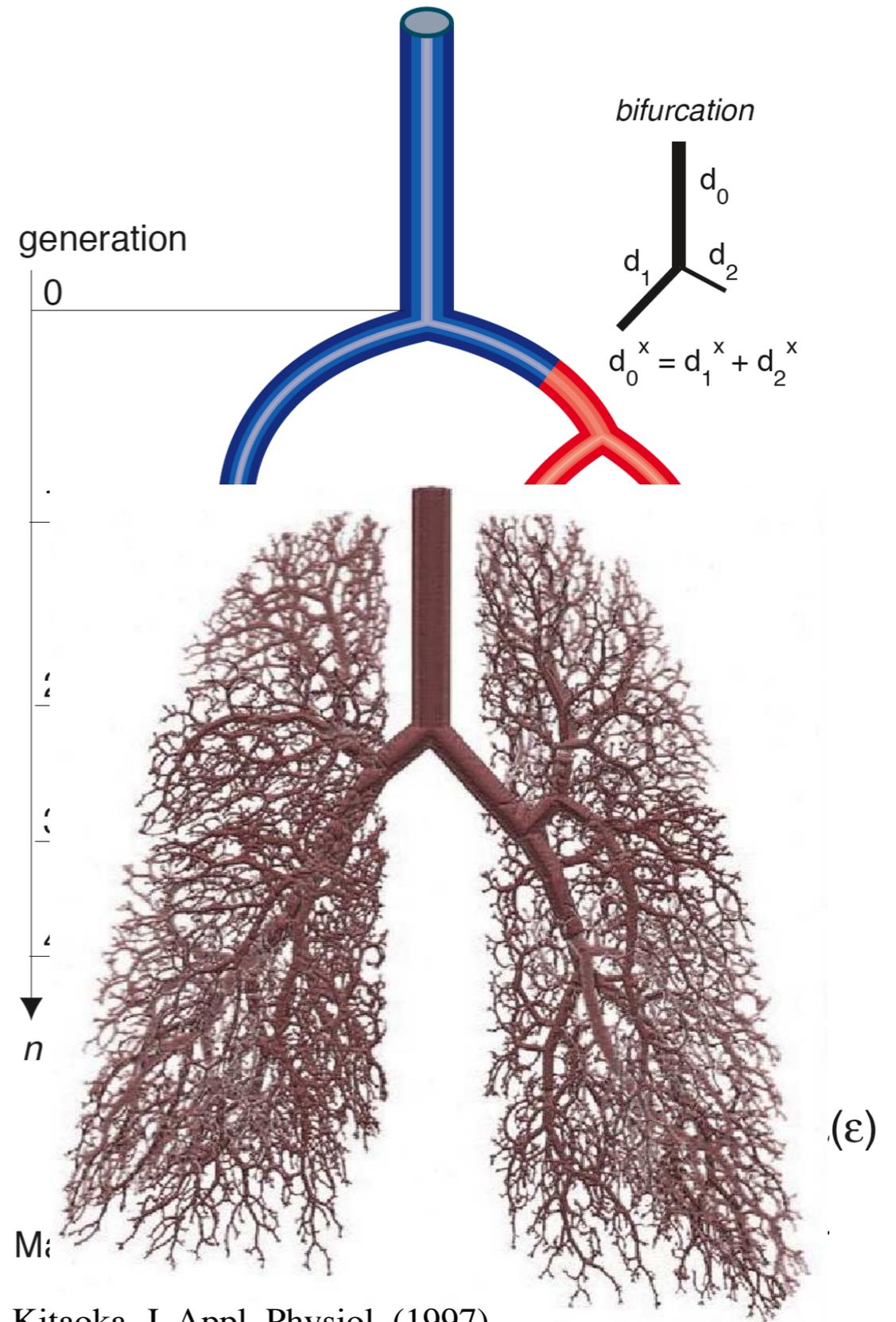
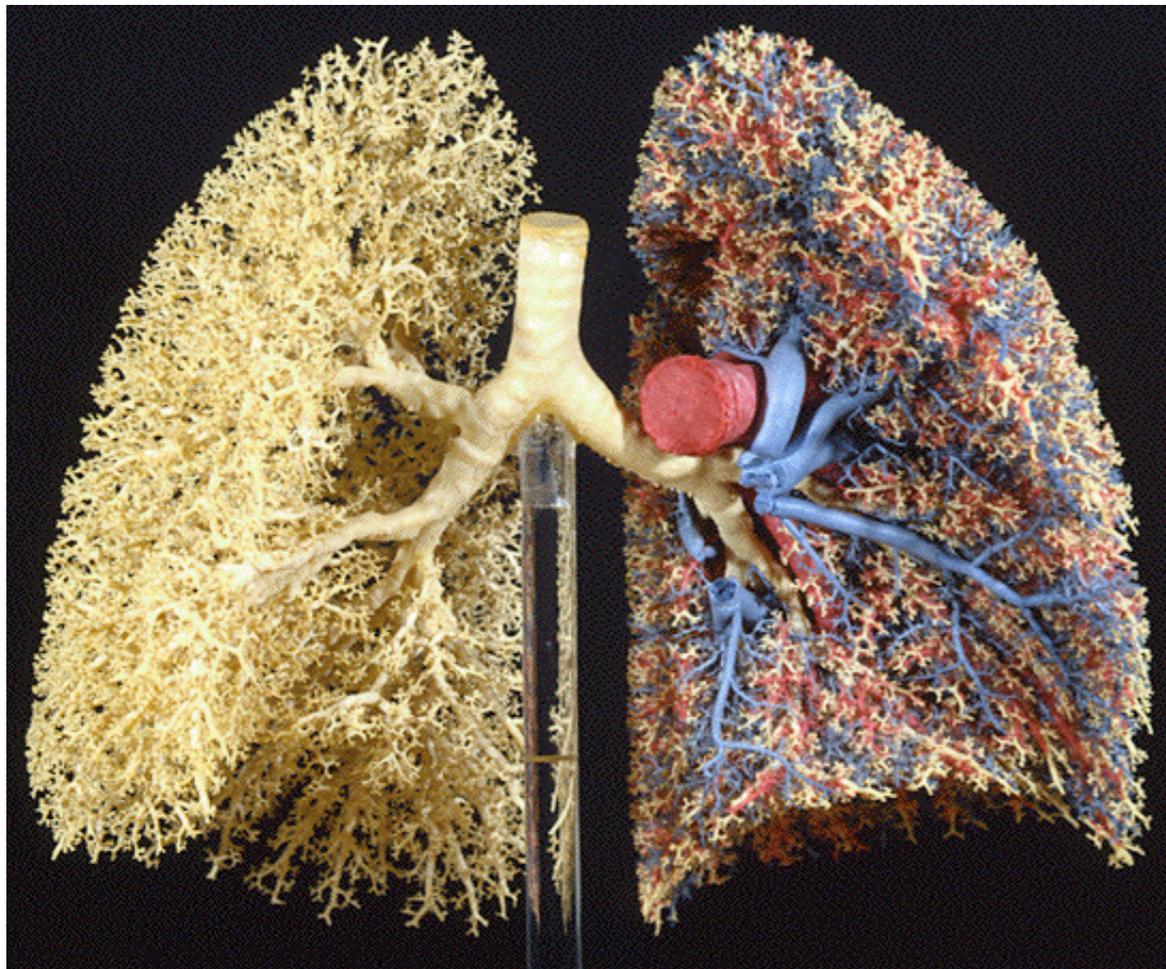
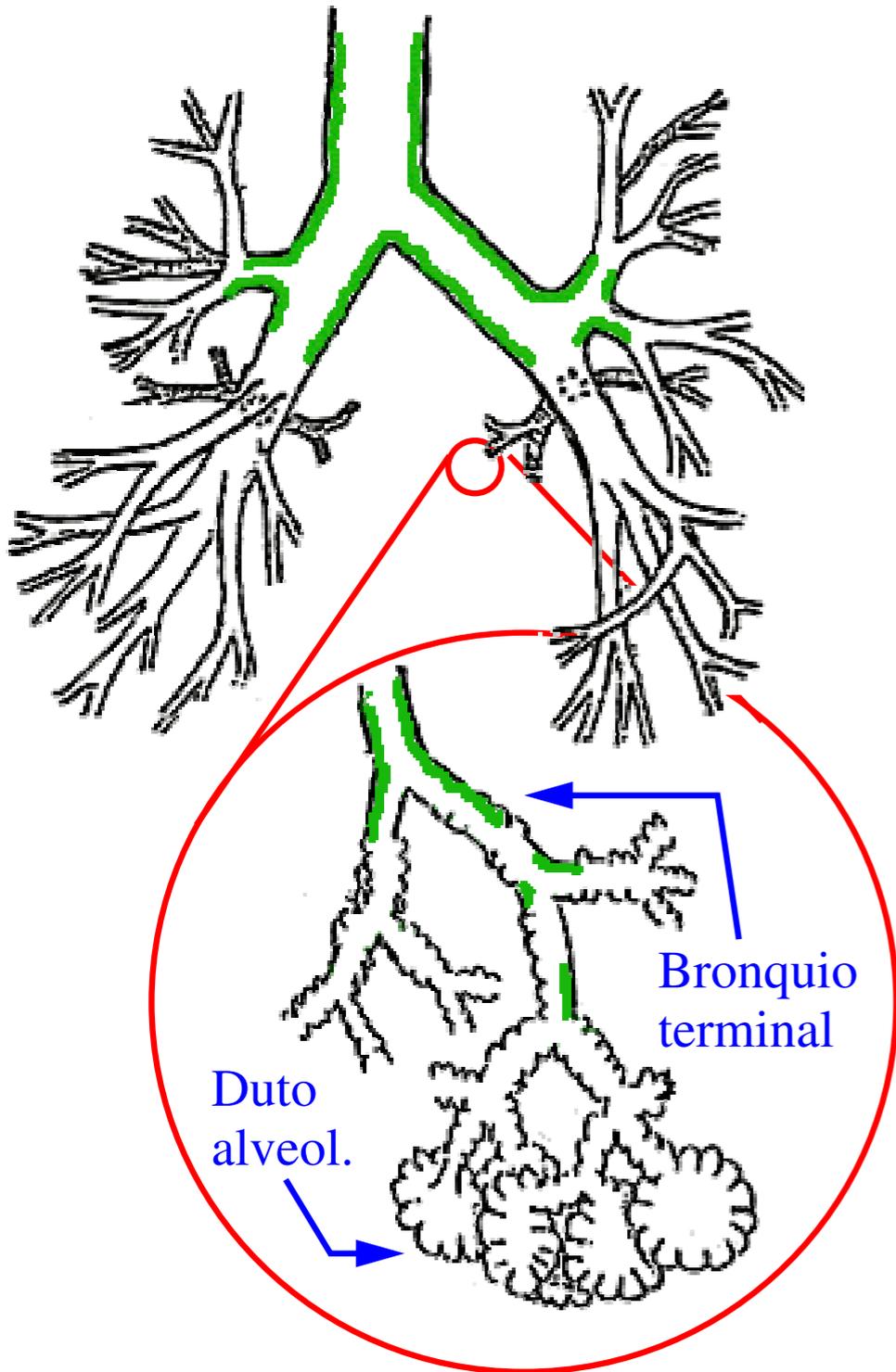


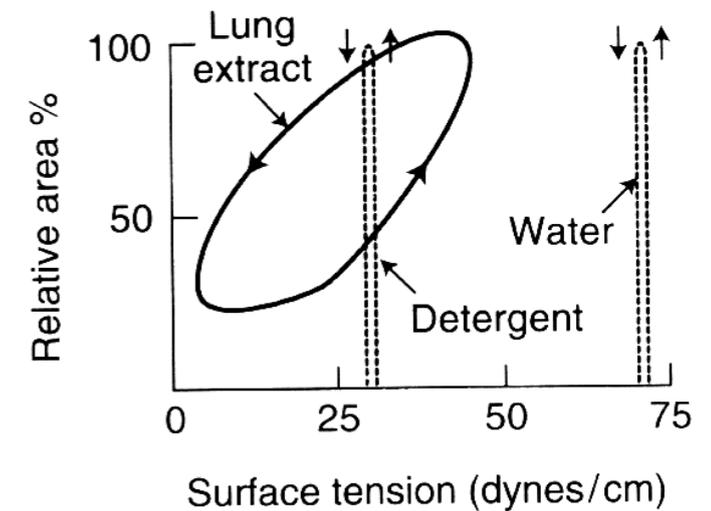
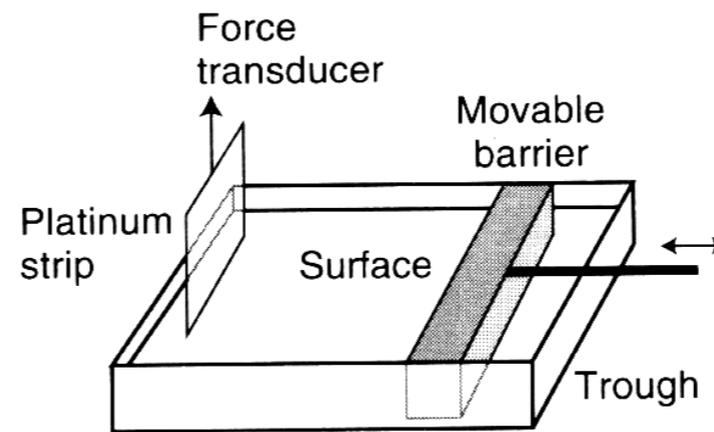
Figura 1-1: Exemplo diagramático do caminho do O₂ e do CO₂ entre a atmosfera e as células.

Estrutura do Órgão

Traqueia



O Pulmão é revestido por um fluido complexo, Sufactante



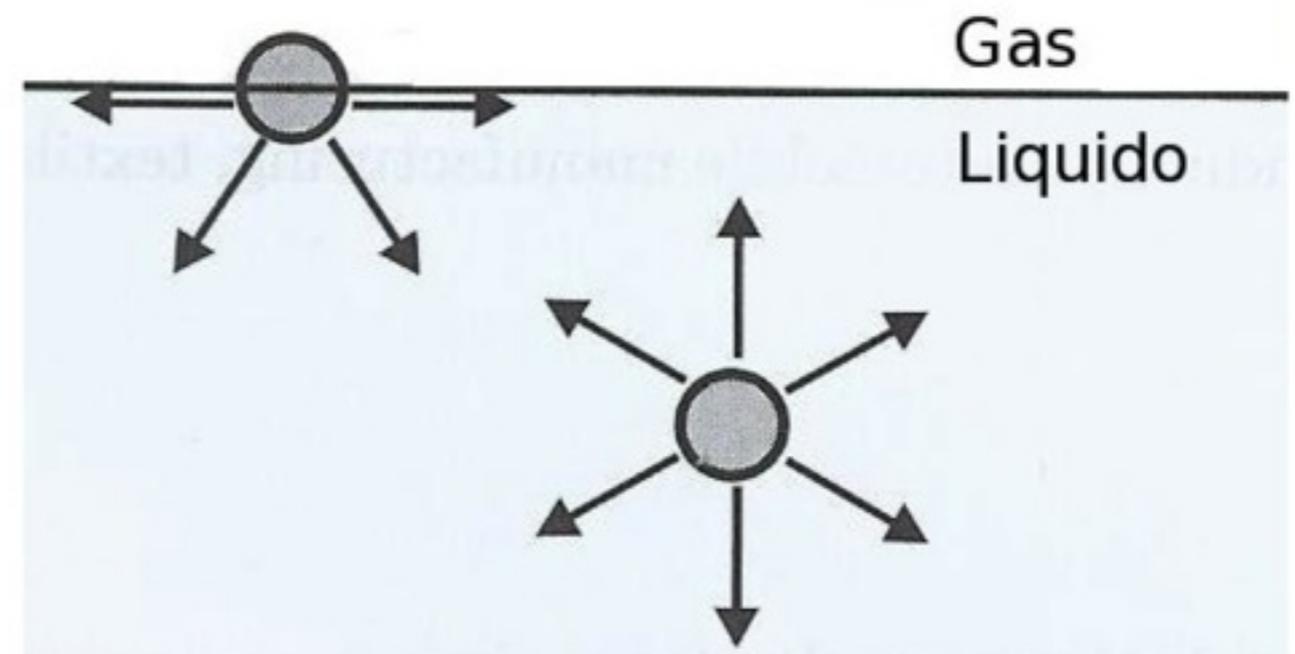
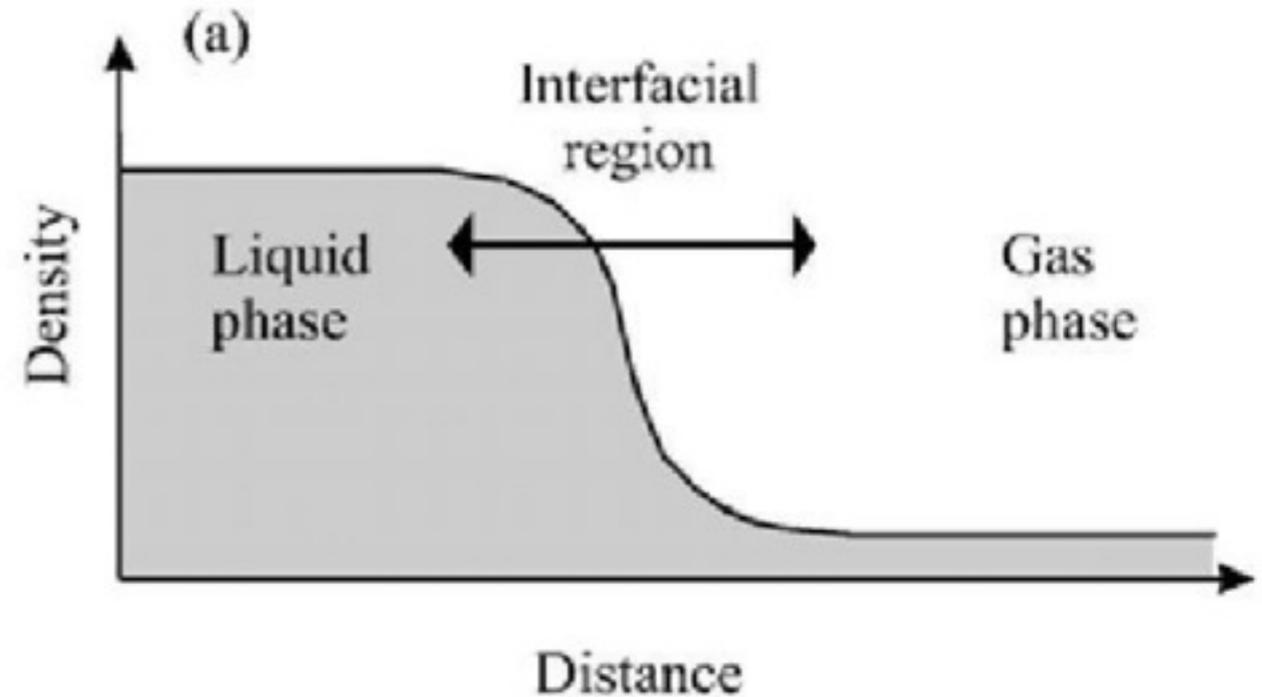
As trocas gasosas acontecem nos alvéolos, folhas
Obstruções são frequentes em doenças (pneumonia, asma etc)

Interface e tensão superficial

- troca de partículas na interface
- a tensão superficial pode ser definida como:

$$\gamma = \left[\frac{\partial U}{\partial A} \right]_{T, V, n}$$

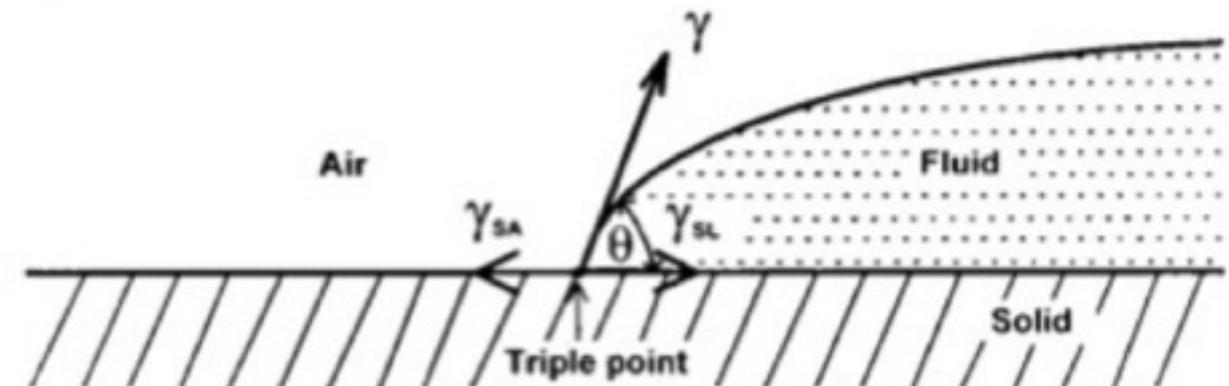
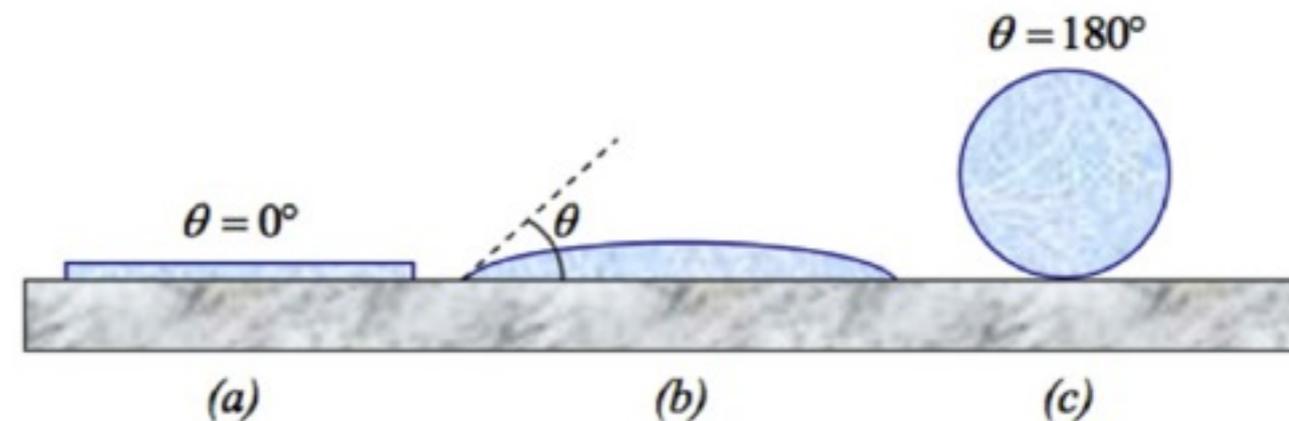
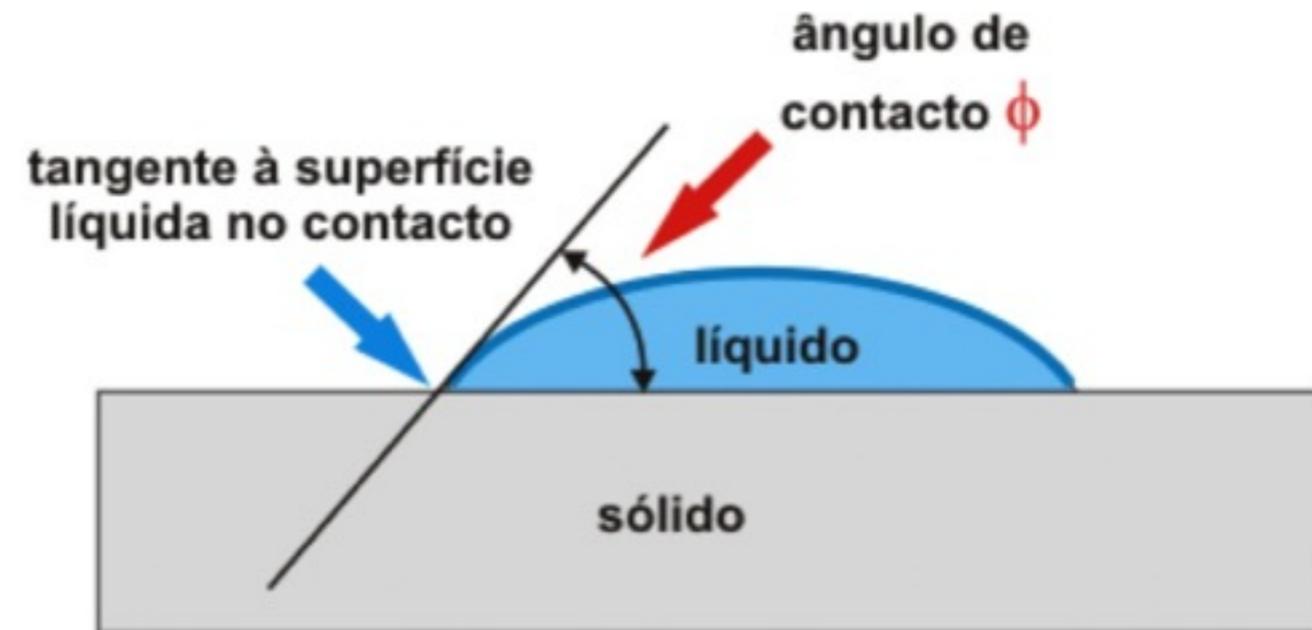
- coesão entre as moléculas
- energia para trazer uma molécula do interior do líquido para a superfície



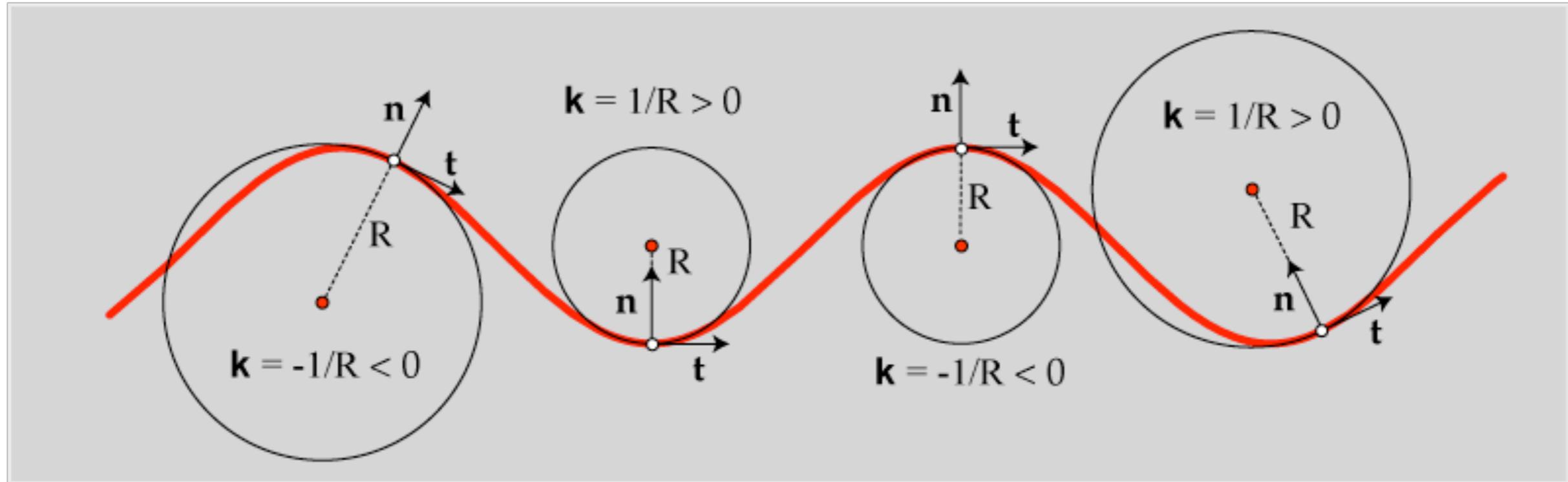
Interface e tensão superficial

- Existe ângulo de contato
- As tensões são evidentes no ponto tríplice

$$\gamma_{SA} - \gamma_{SL} = \gamma_{LA} \cos(\theta)$$



Lei de Young Laplace



$$H(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (1.4)$$

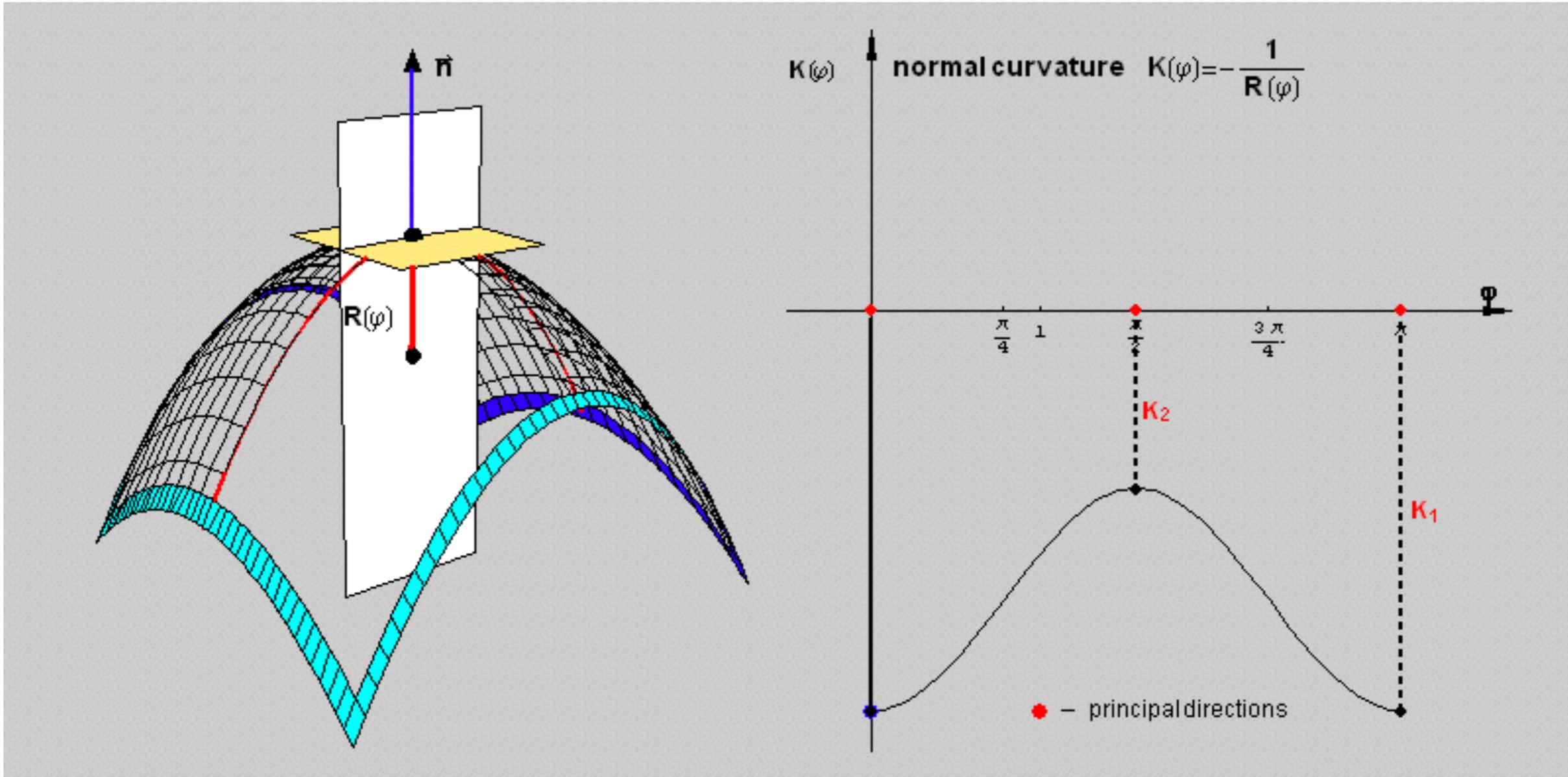
onde $R_1 = 1/\kappa_1$ e $R_2 = 1/\kappa_2$. Para uma interface esférica os dois raios de curvatura são os mesmos, $R = R_1 = R_2$, e $H = 1/R$, o que torna os cálculos mais simples. A Eq. 1.5 pode ser escrita de forma mais precisa

$$H(\mathbf{p}) = -\frac{1}{2} \nabla \cdot \hat{n}(\mathbf{p}), \quad (1.5)$$

A fórmula acima é válida para qualquer superfície no espaço 3D definidas de qualquer forma, desde que o divergente de $\hat{n}(\mathbf{p})$ possa ser calculado.

$$H = \frac{1}{R} = \frac{1}{k}$$

Lei de Young Laplace



$$H(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$H(\mathbf{p}) = -\frac{1}{2} \nabla \cdot \hat{n}(\mathbf{p})$$

Lei de Young Laplace

A descontinuidade da pressão na interface, ΔP , é consequente curvatura, é causada devido a tensão superficial γ , originada por sua vez da resultante para dentro da atração entre as moléculas. As moléculas se reorganizam e esta reorganização é delineada pelo princípio da minimização de energia. Para deduzir a lei de Young-Laplace, podemos imaginar uma bolha líquida de raio R , com descontinuidade de pressão na interface

⁷A normal é definida aqui como sendo na direção em que a superfície curva

com o ar dada por ΔP . Se a bolha se expande ou contrai, o raio da nova bolha será $R' = R + dR$ e o trabalho necessário para essa mudança de R será dado pela equação do trabalho, $W = \vec{F} \cdot \vec{d}$, modificada para a pressão,

$$W = \Delta P dV \quad ,$$

onde no caso da esfera $dV = 4\pi R^2 dR$ e $dA = 4\pi((R + dR)^2 - R^2) \approx 8\pi R dR$. Ou seja $dV = R dA / 2$. Assim temos,

$$\Delta P = \frac{2 W}{R dA} \quad . \quad (1.6)$$

A primeira lei da termodinâmica nos diz que a variação da energia interna de um sistema é $dU = Q + W$, onde Q é o calor transferido do sistema ou para o sistema. Em uma expansão ou contração da bolha em que não haja calor transferido, a Eq. 1.6 pode ser reescrita como

$$\Delta P = 2H\gamma \quad . \quad (1.7)$$

onde $\gamma = dU/dA$, é a definição da tensão superficial. A equação acima é conhecida como equação de Young-Laplace.

$$R' = R + dR$$

$$W = \vec{F} \cdot \vec{d}, \quad W = \Delta P dV$$

no caso da esfera $dV = 4\pi R^2 dR$ e dA

$$\begin{aligned} dA &:= 4\pi((R + dR)^2 - R^2) \\ &\approx 8\pi R dR \end{aligned}$$

$$dV = R dA / 2$$

$$\Delta P = \frac{2 W}{R dA}$$

$$dU = Q + W,$$

$$\Delta P = 2H\gamma \quad \text{onde } \gamma = dU/dA,$$

Interface e tensão superficial

- Tensão na interface

$$F_w = 2F_{sy}$$

- Young-Laplace equation:

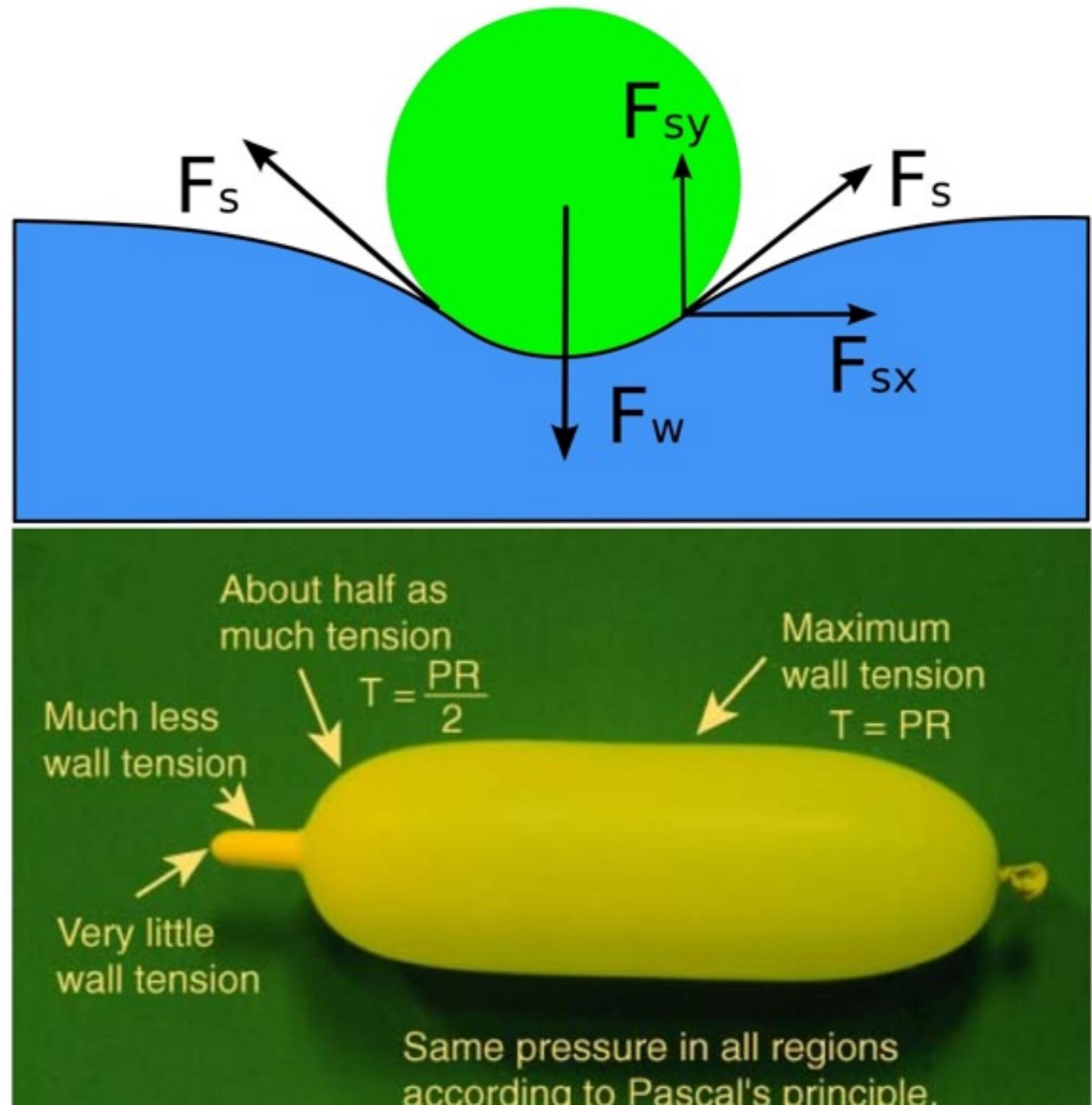
$$P = T \left(\frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \right)$$

- Se $R_x = R_y$ temos

$$T = PR/2$$

- Se $R_x \rightarrow \infty$ temos

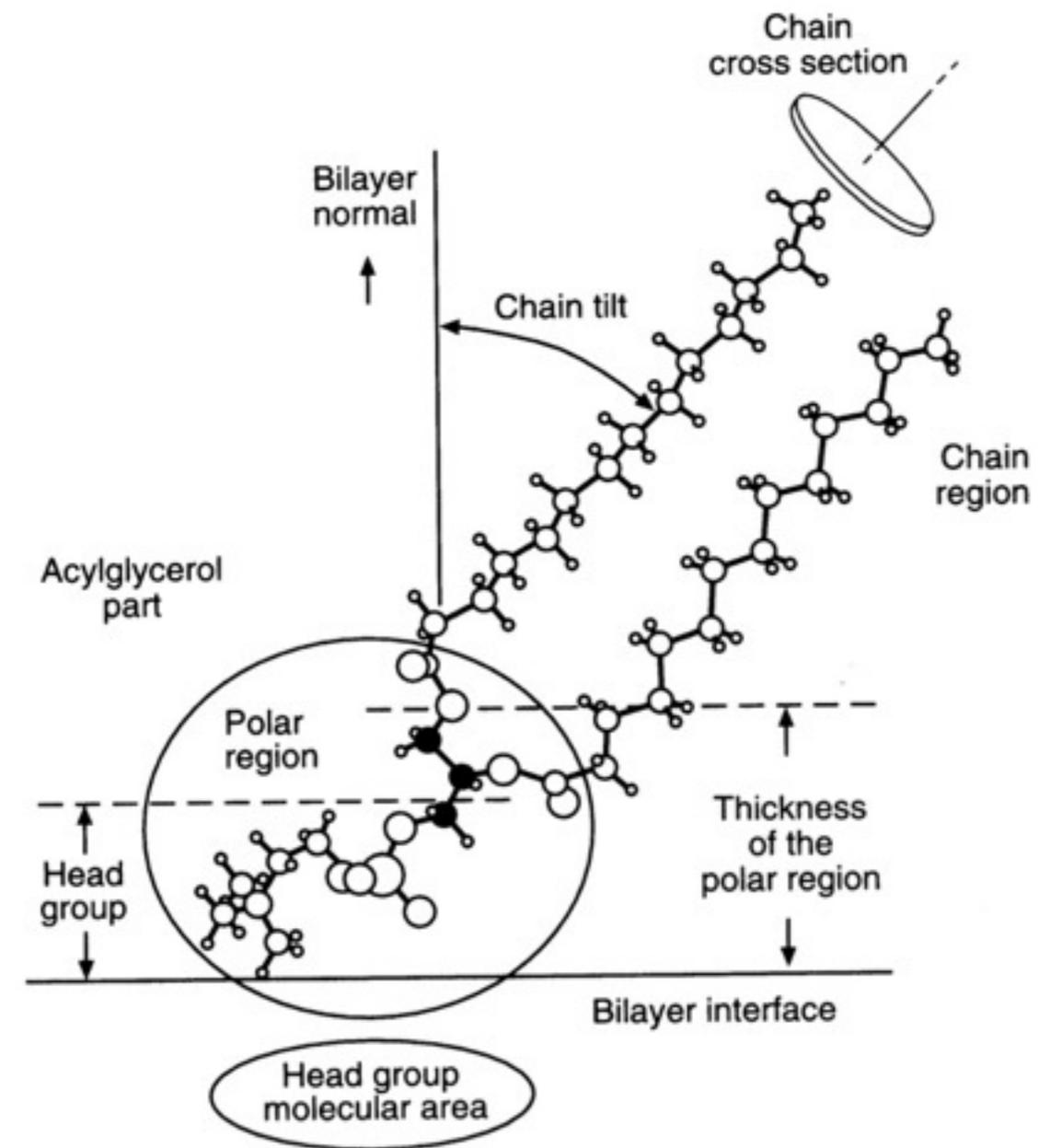
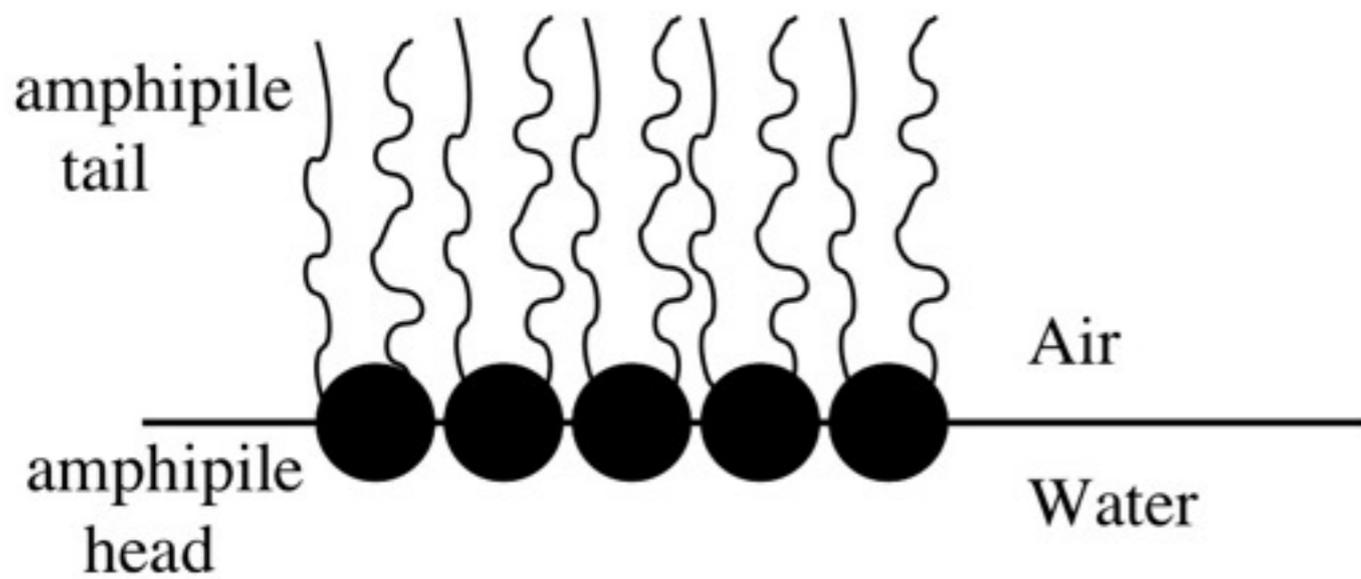
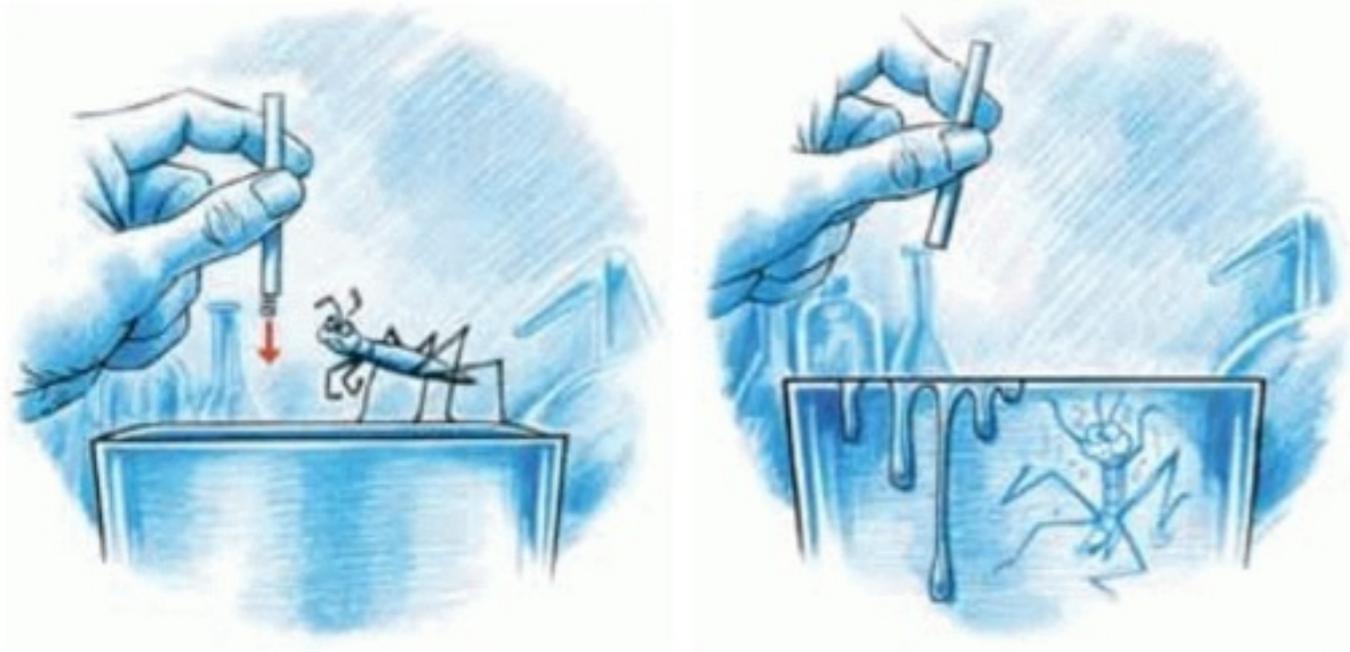
$$T = PR$$



Interface e tensão superficial



Surfactante pulmonar



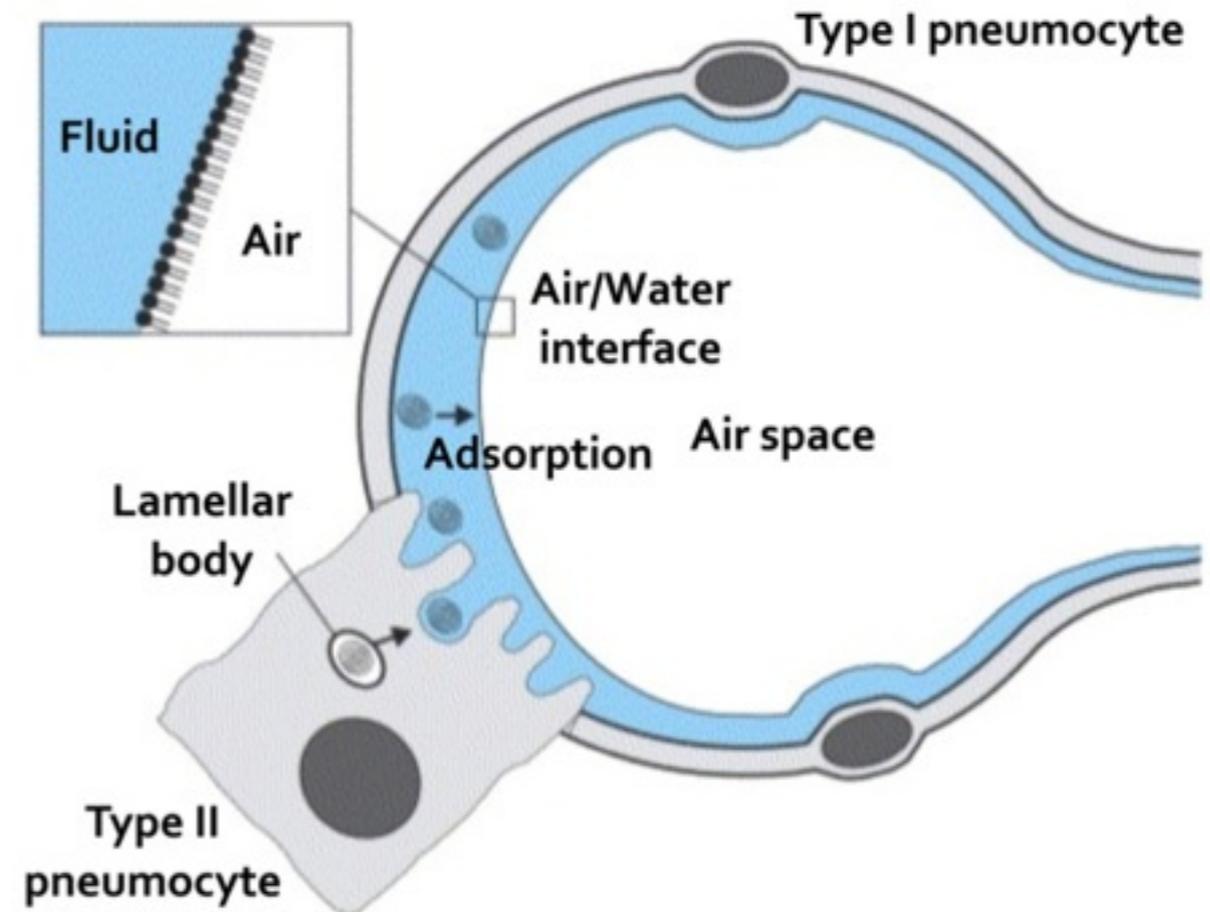
Surfactante pulmonar

O Surfactante Pulmonar:

- um complexo lipo-proteico
- Sintetizado pelos pneumocitos tipo II

Funções:

- Aumentar a complacência (pulmonar)
- Prevenir atelectasia (expiração)
- facilitar o recrutamento (inspiração)

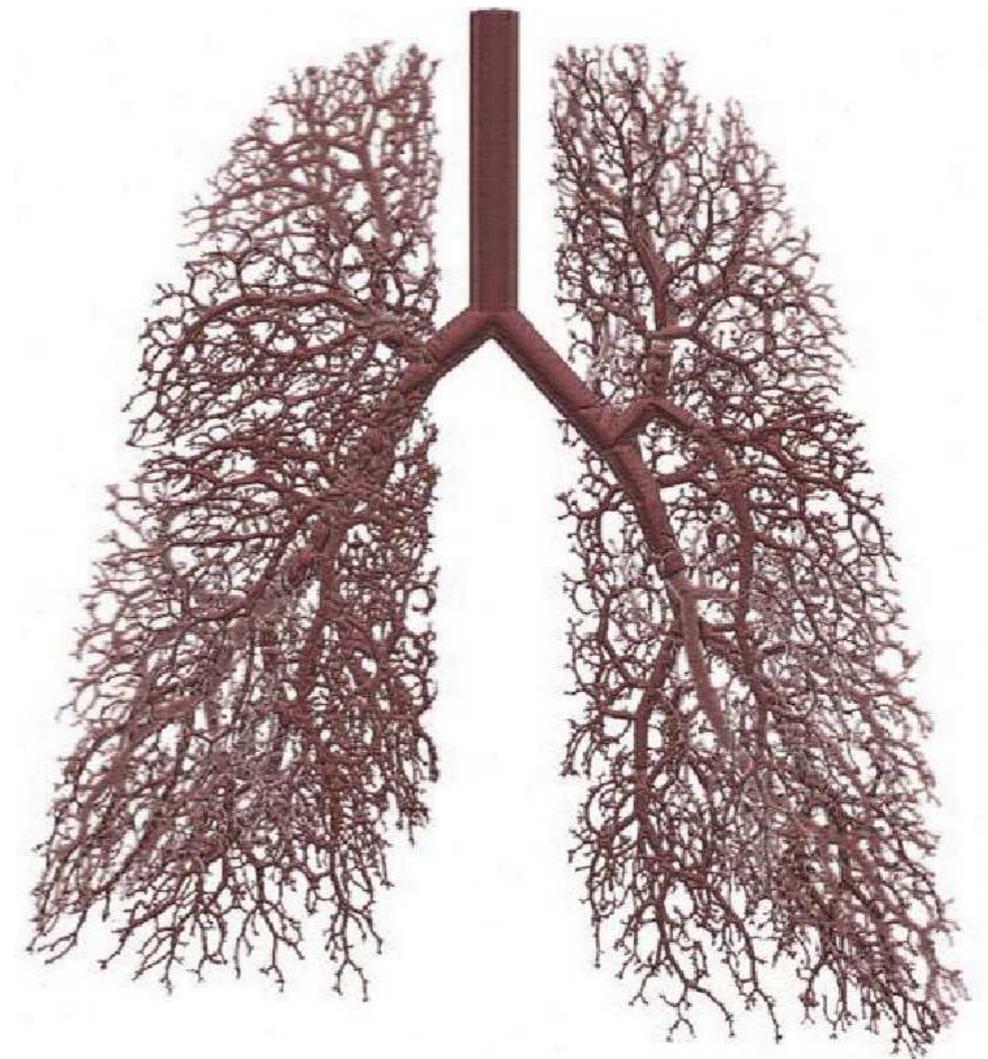
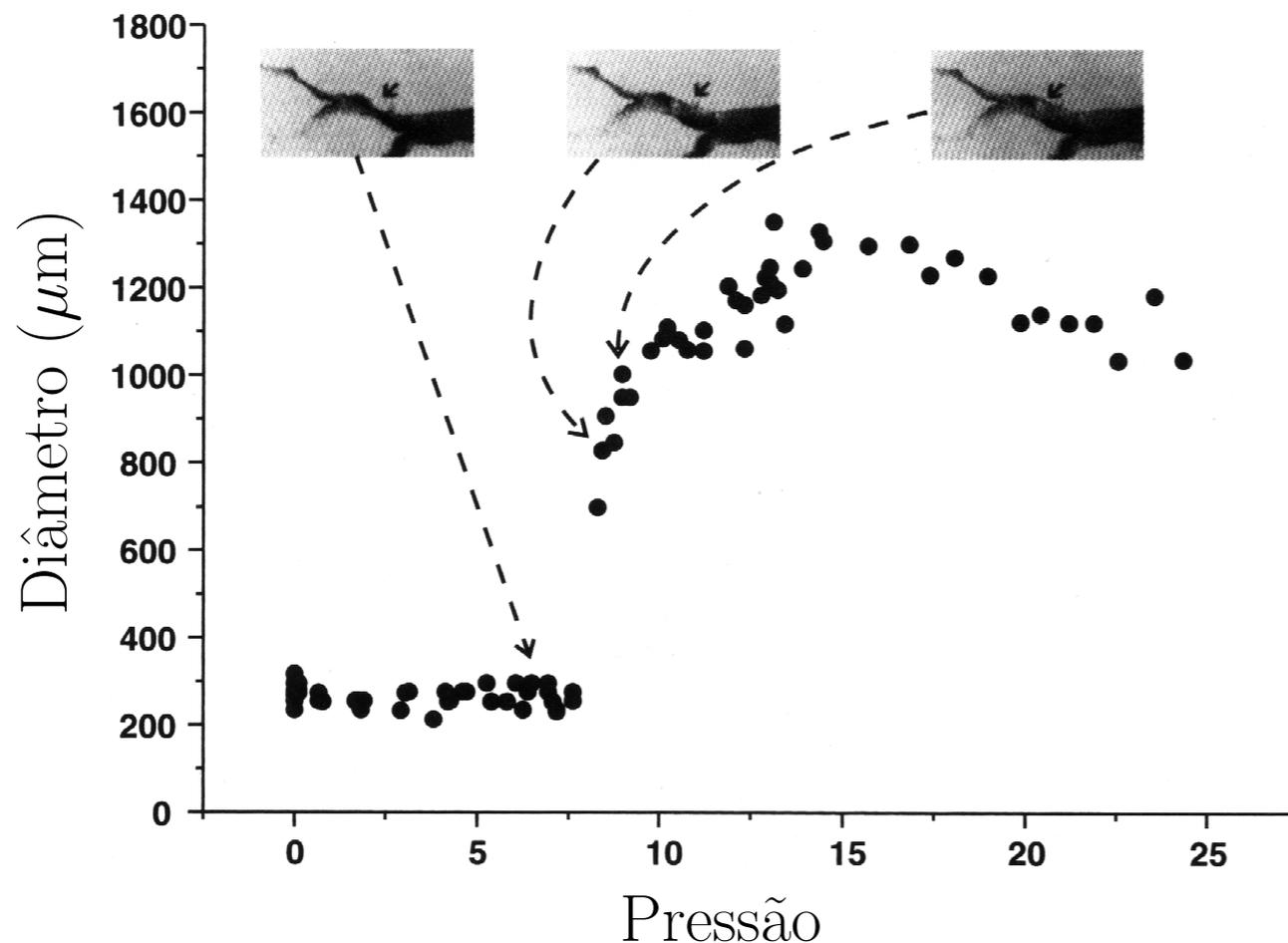


Complacência

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$

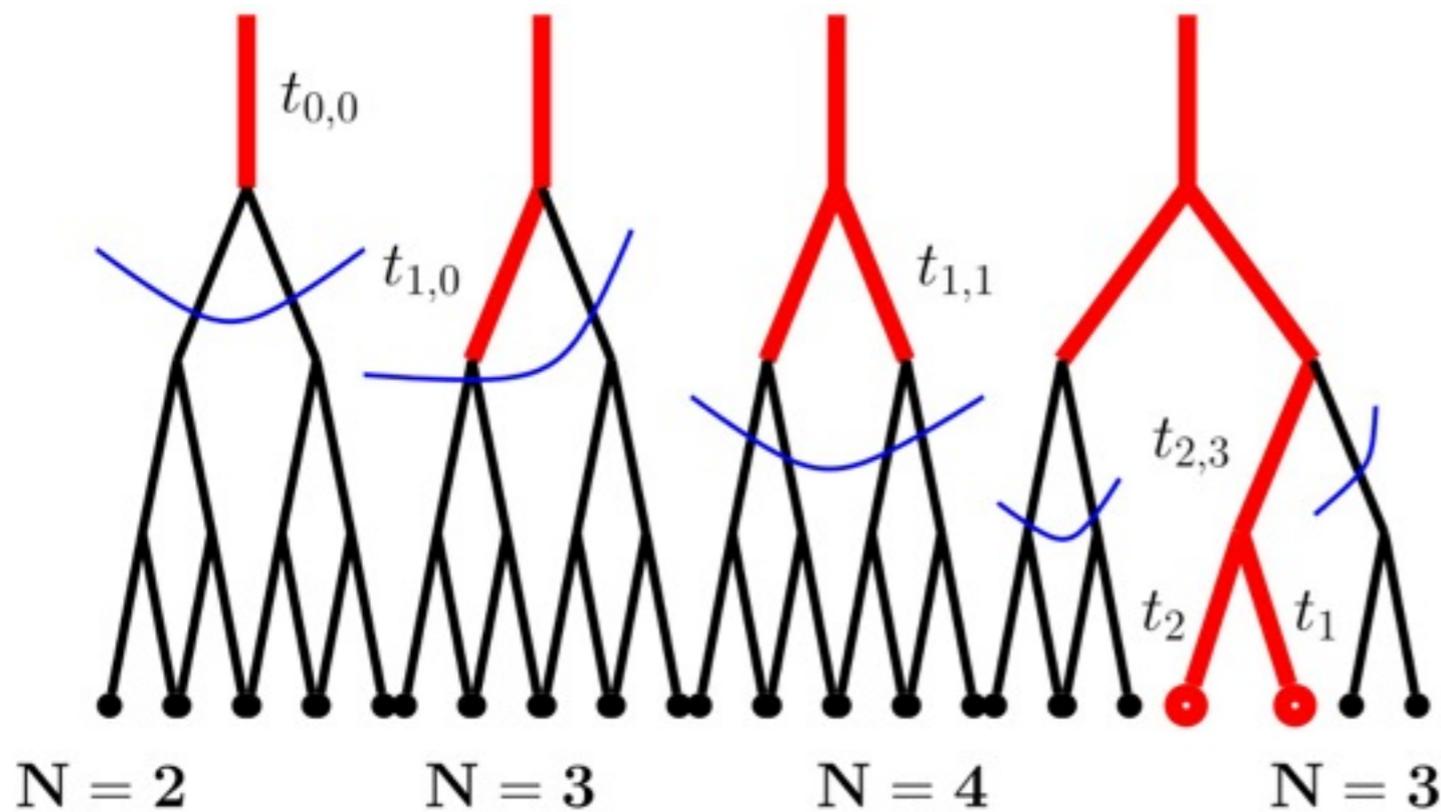
Obstruções

1. Qualquer obstrução em um ramo, afeta toda a hierarquia abaixo;
2. existe um limiar P_{ij} de reabertura
3. o que acontece se $P_{ij} = \text{Rand}(0,1)$?
4. Avalanche!



Estrutura do Orgão

Durante a inflação a pressão $P(t)$ na traqueia (raiz) é incrementada

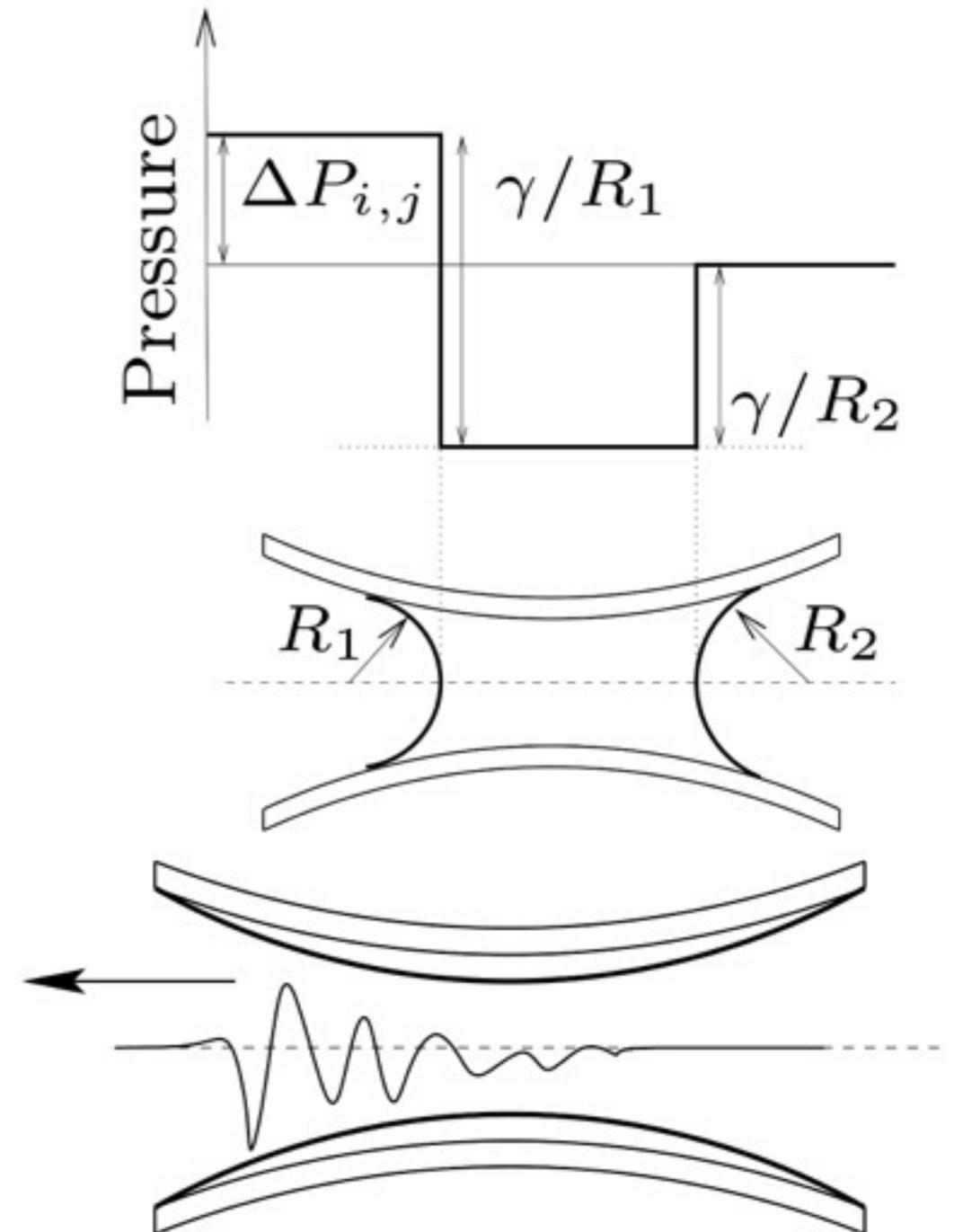


Para cada reabertura...

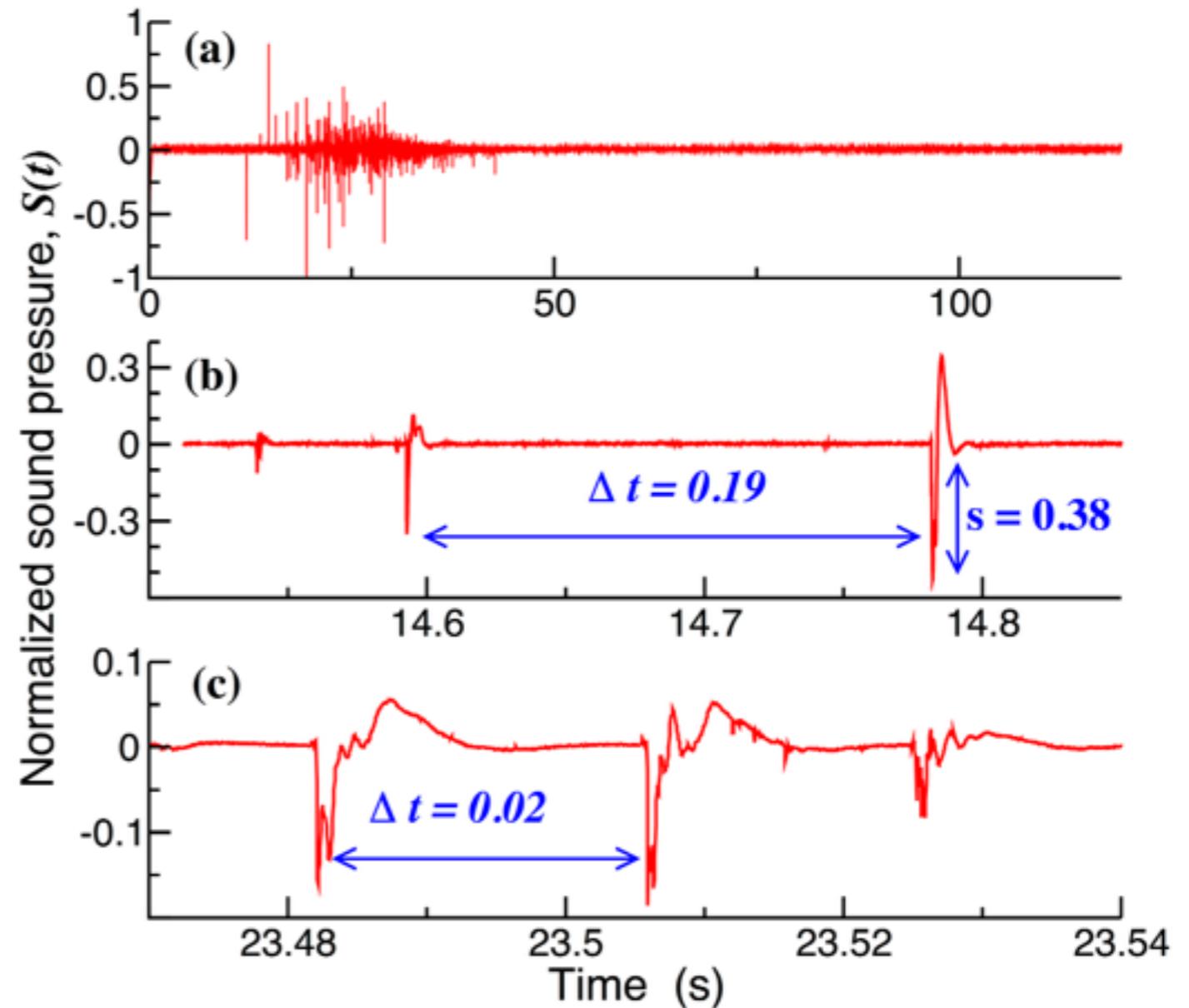
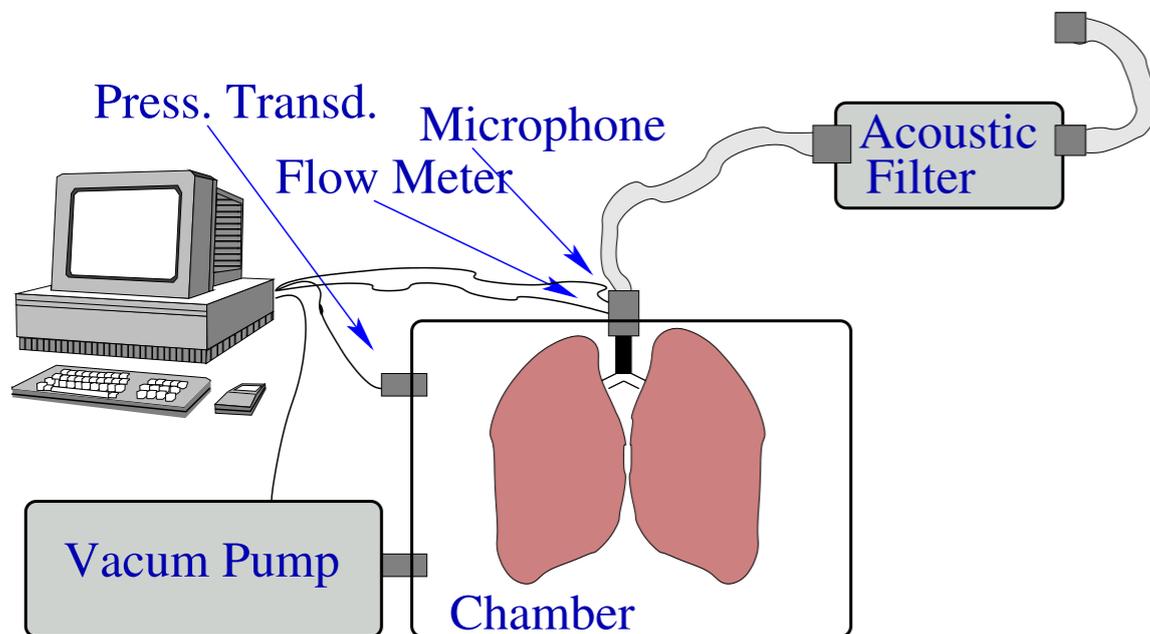
uma “explosão” (crackle)

instabilidades na curva $P \times V$

As duas grandezas acima são mensuráveis



Ruido de crepitação

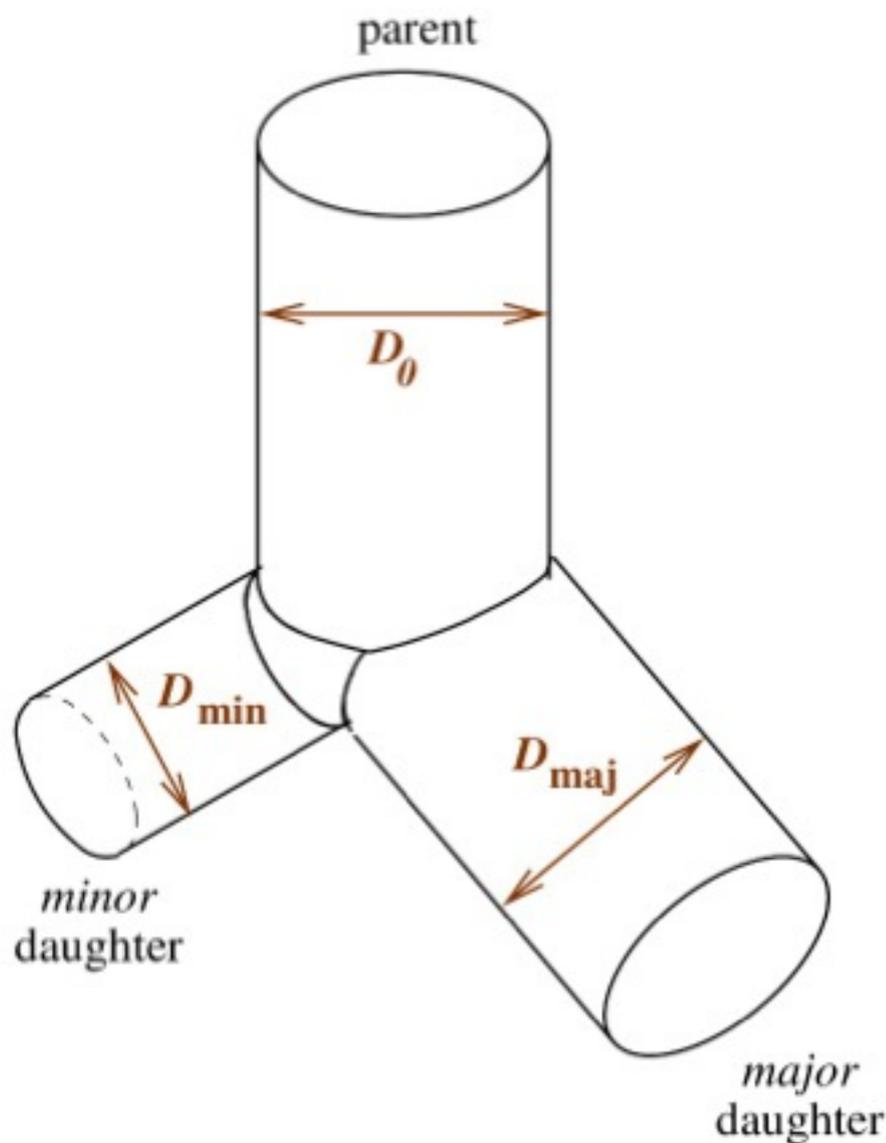


Amplitude das explosões

Sons são atenuados a cada bifurcação:

$$D_0^\beta = D_{\min}^\beta + D_{\text{maj}}^\beta$$

$$s_i = \frac{2A_i}{A_i + A_{\min} + A_{\text{maj}}} s_m = b_i s_m$$



$M \rightarrow$ Número de gerações

Resultado analítico

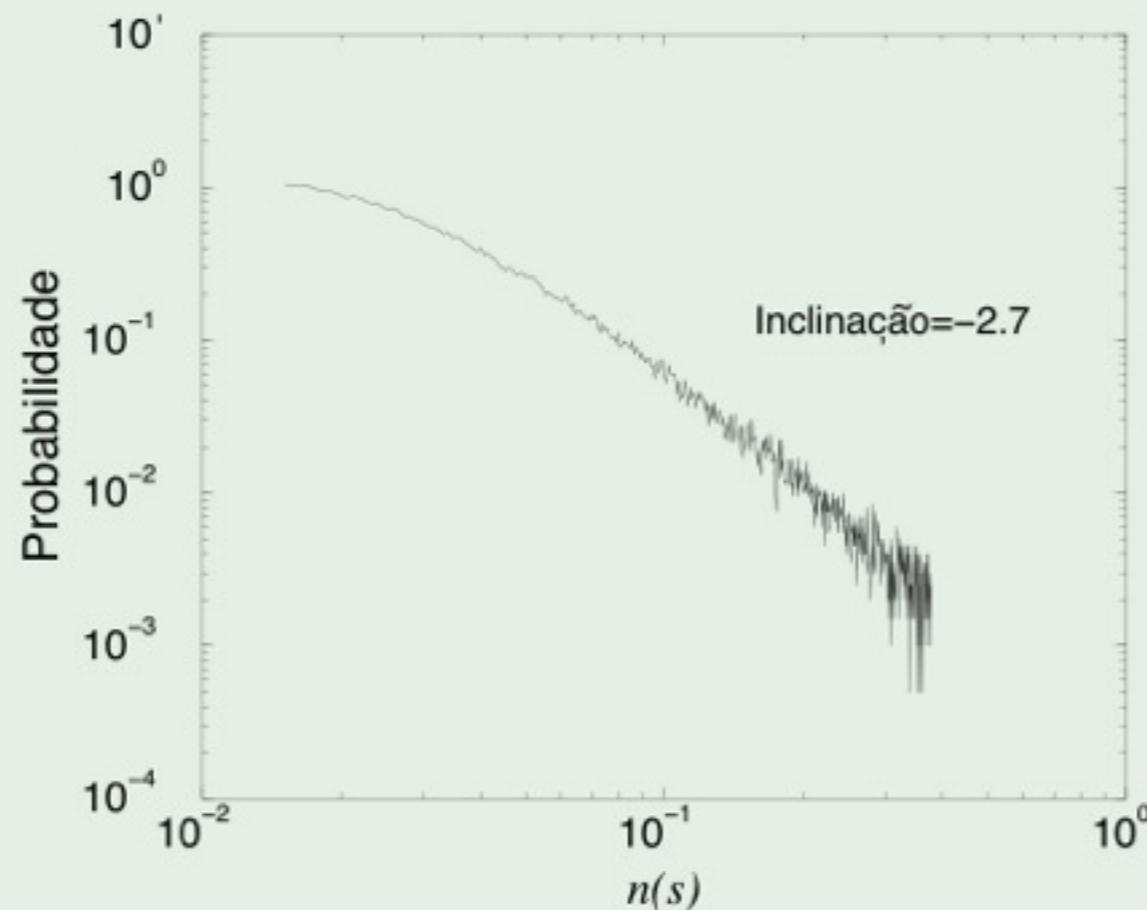
$$\Pi(s) = \frac{1}{b^M} f\left(\frac{s}{b^M}\right)$$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha-1} & \text{se } x < 1; \\ \frac{x^{-\alpha}}{\alpha-1} & \text{de outra forma.} \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{\ln(2/b)}{\ln(b)}$$

Amplitudes (Teórico x Experimental)

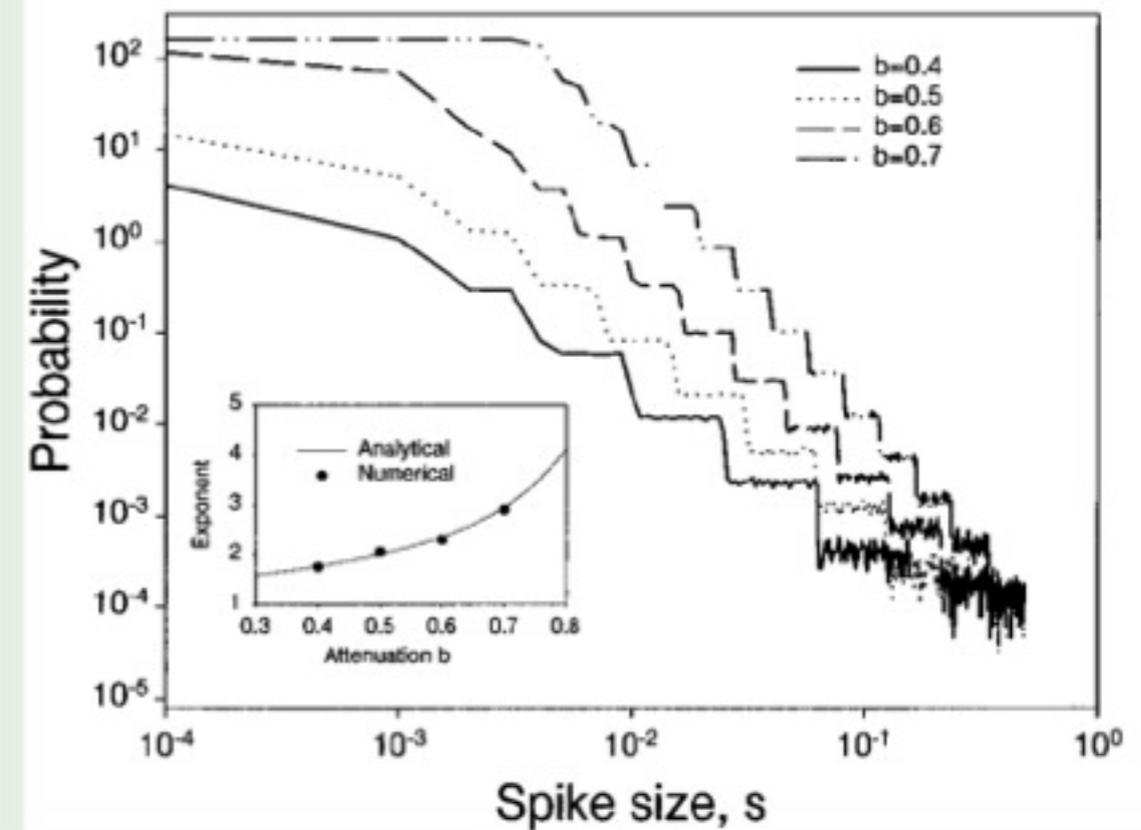
Resultado Experimental



Morfométrico

$$b = 0.62$$

Modelo

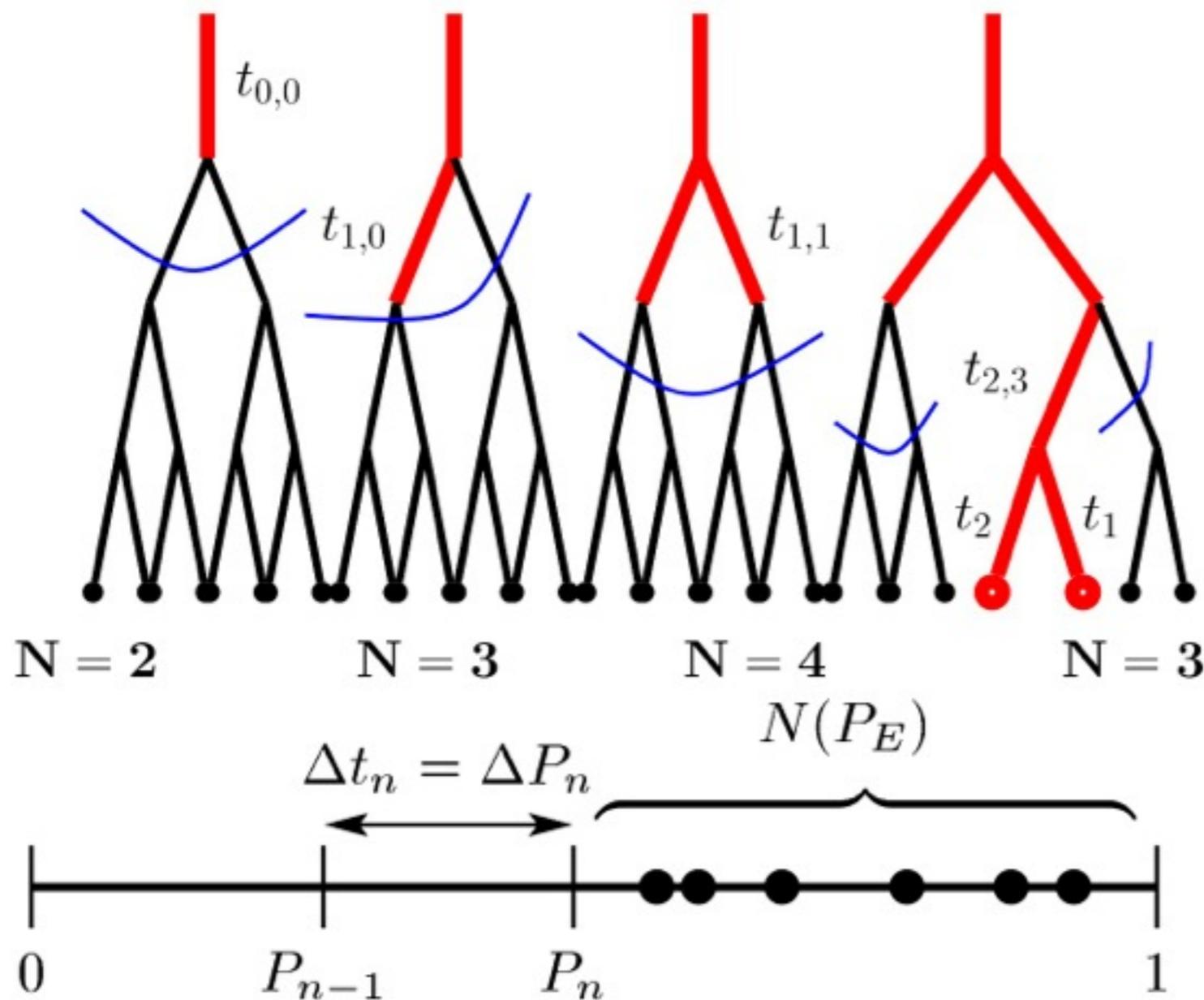


Ajuste

$$M = 15 \text{ e } b = 0.65$$

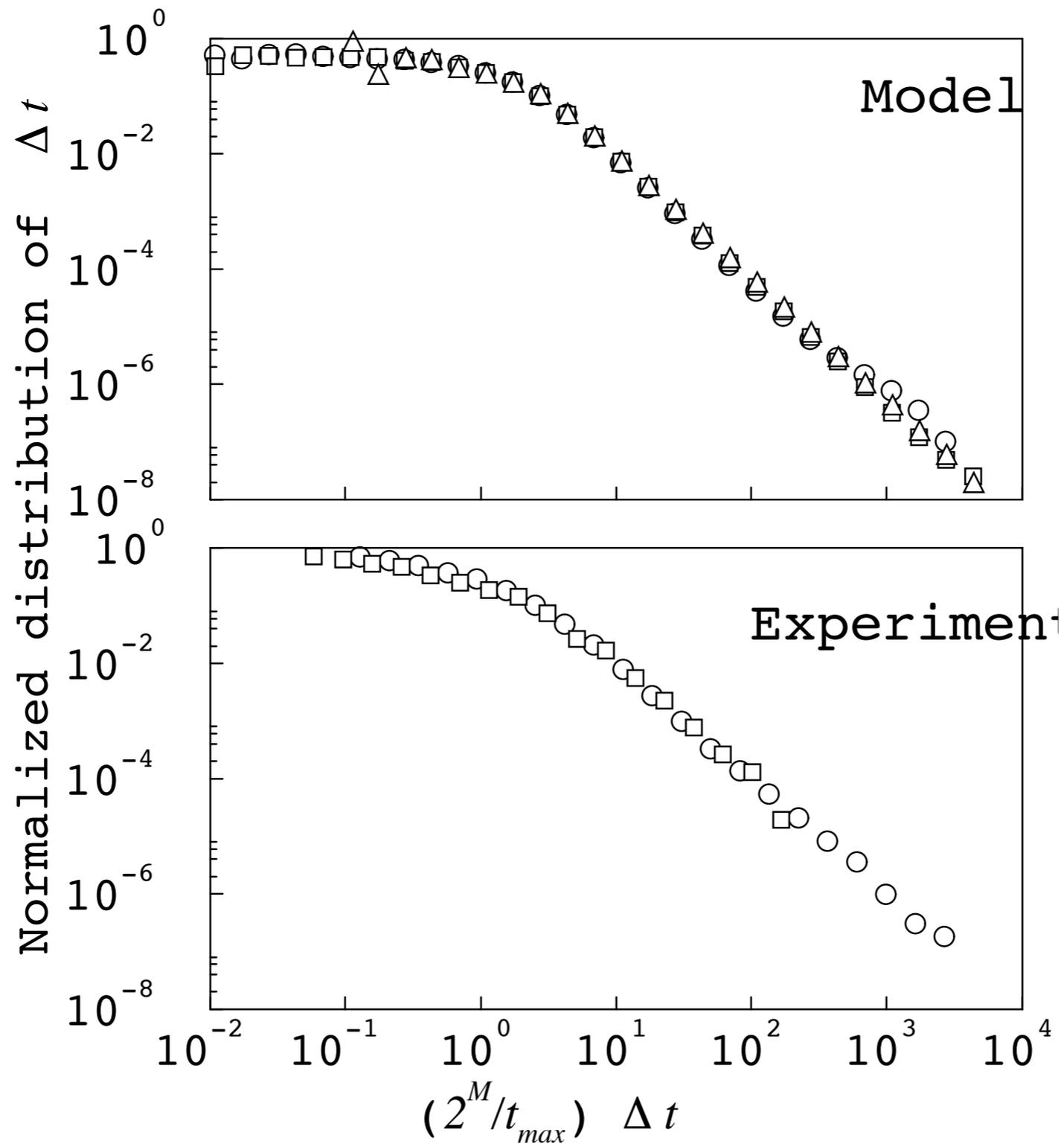
Intervalo entre os ruídos

$$P_{(i,j)} = \eta$$

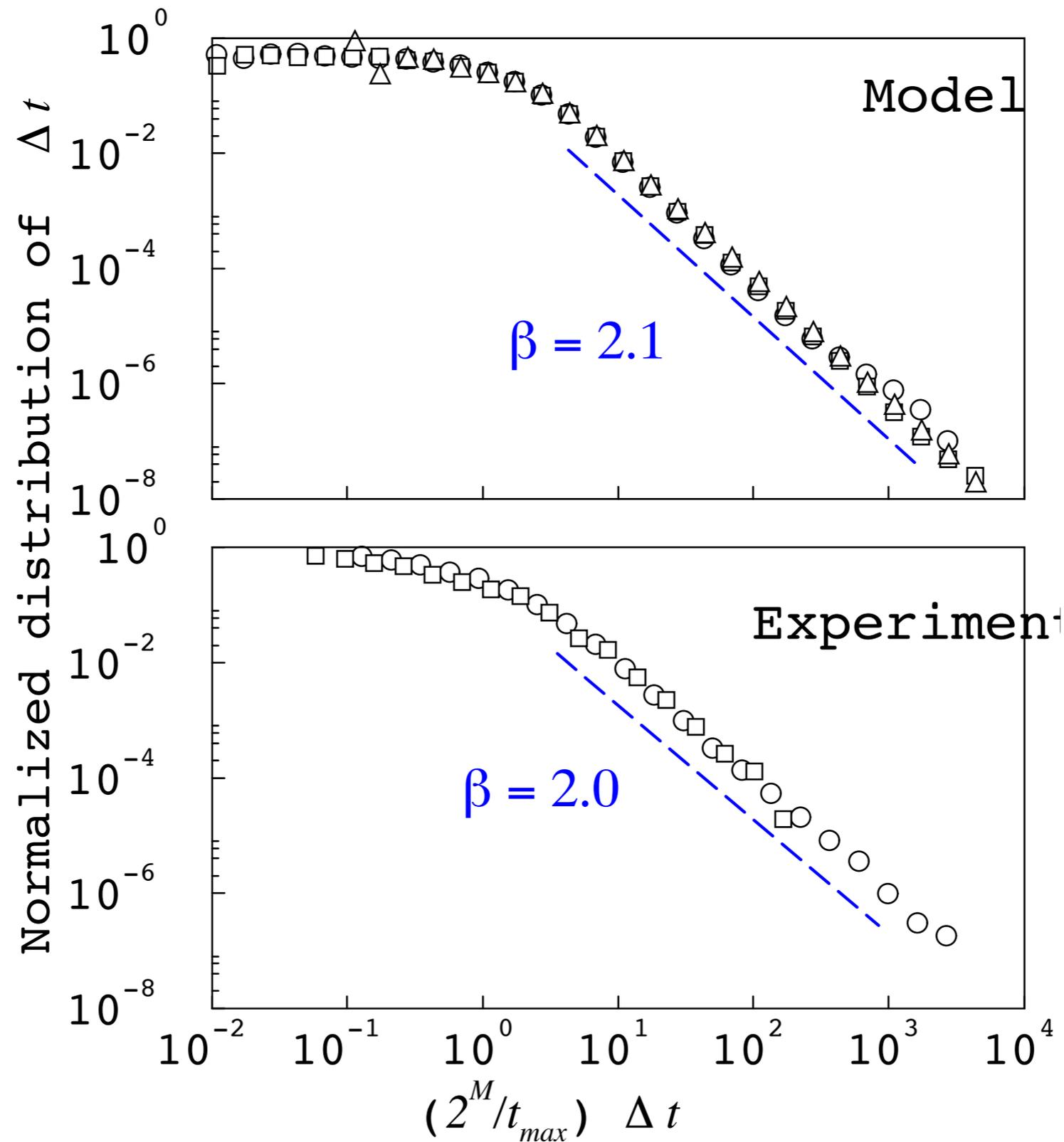


- se $P(i,j) < P(t)$, esse ramo é recrutado (aberto)
- cada ramo recrutado, dois novos ramos a,b, “aparecem”
- se P_a ou $P_b < P(t)$ esses ramos também abrem definindo uma avalanche
- até atingir os alvéolos (folhas)

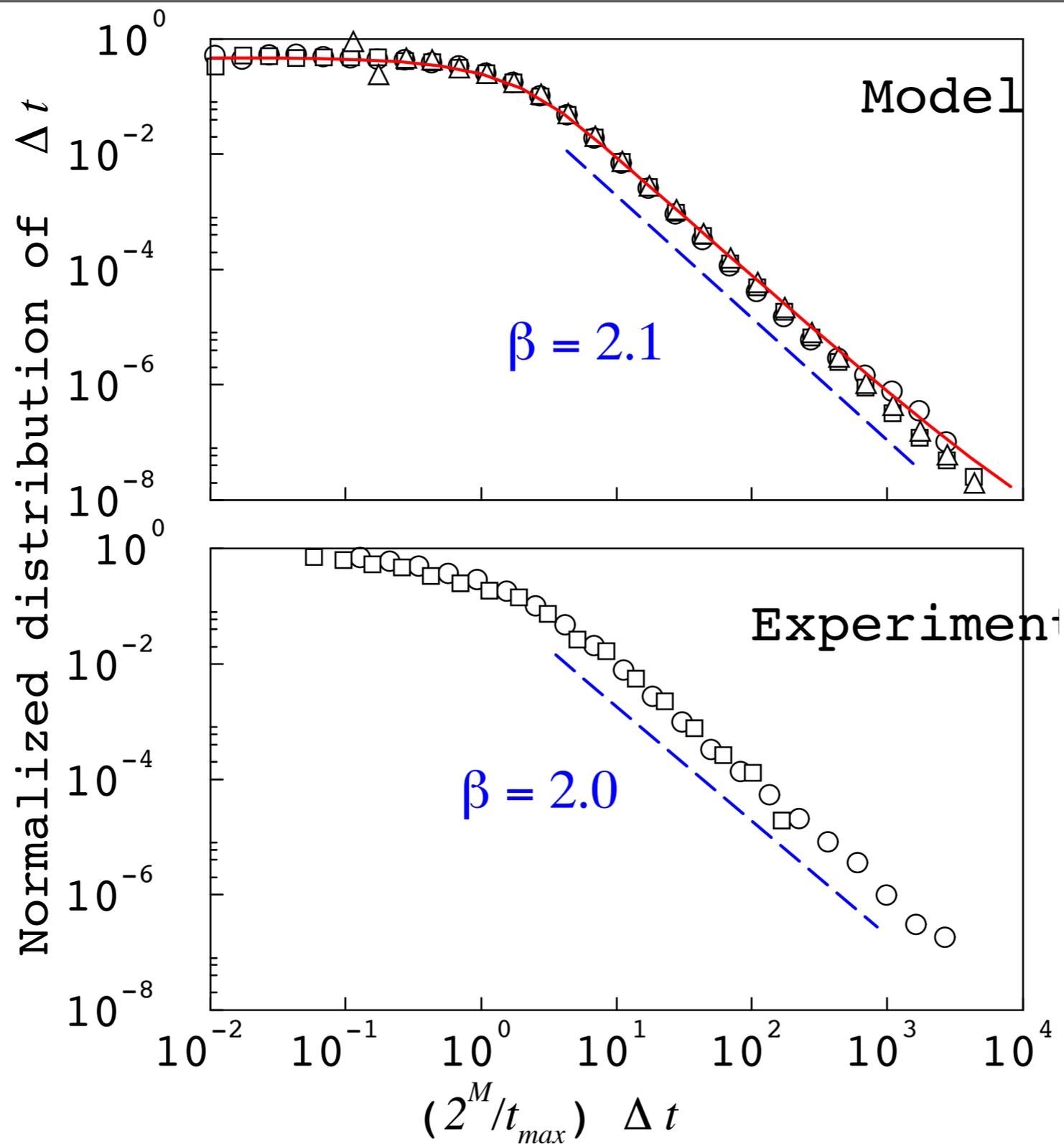
Intervalo entre os ruidos



Intervalo entre os ruídos



Intervalo entre os ruídos



Estrutura do Orgão

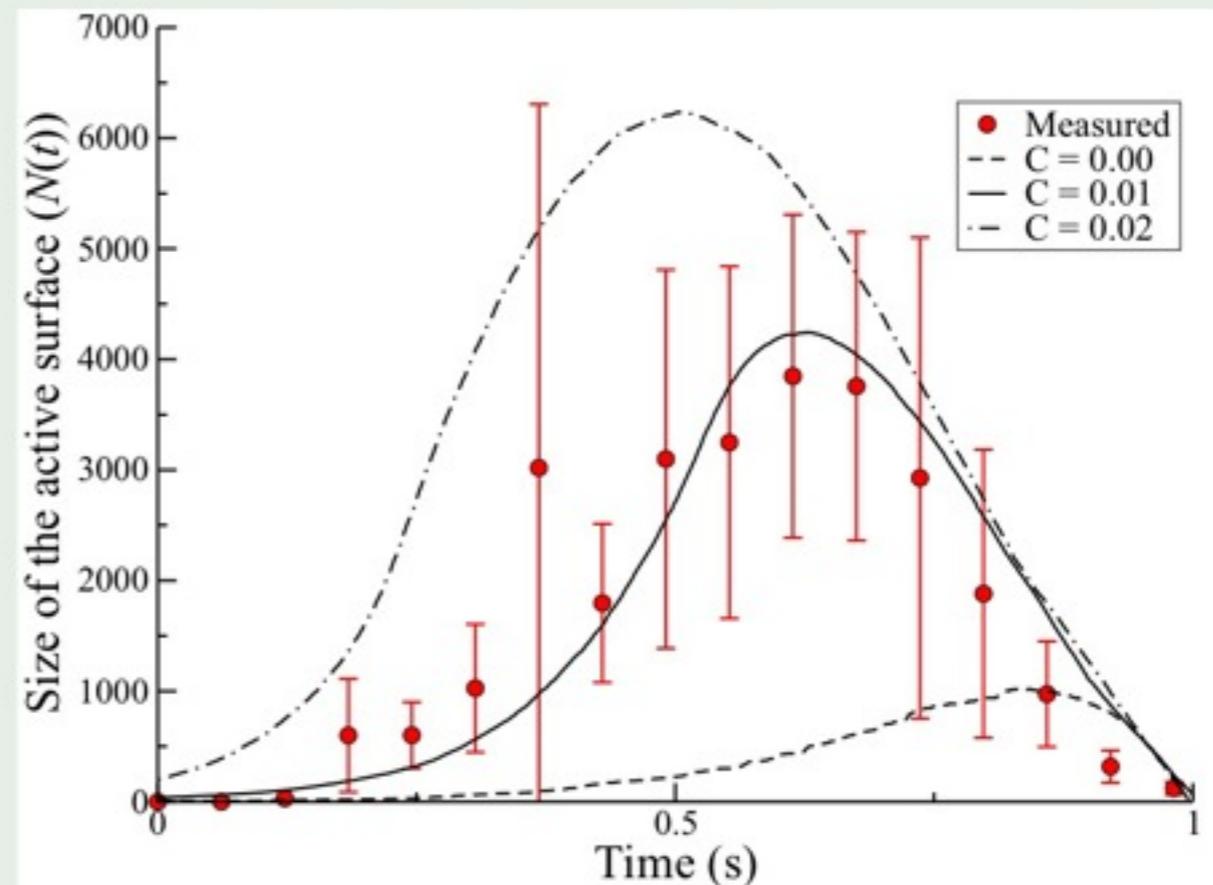
Superfície Ativa

$$\langle N(P_E) \rangle = \frac{1 - P_E}{\langle \Delta t_n \rangle}$$

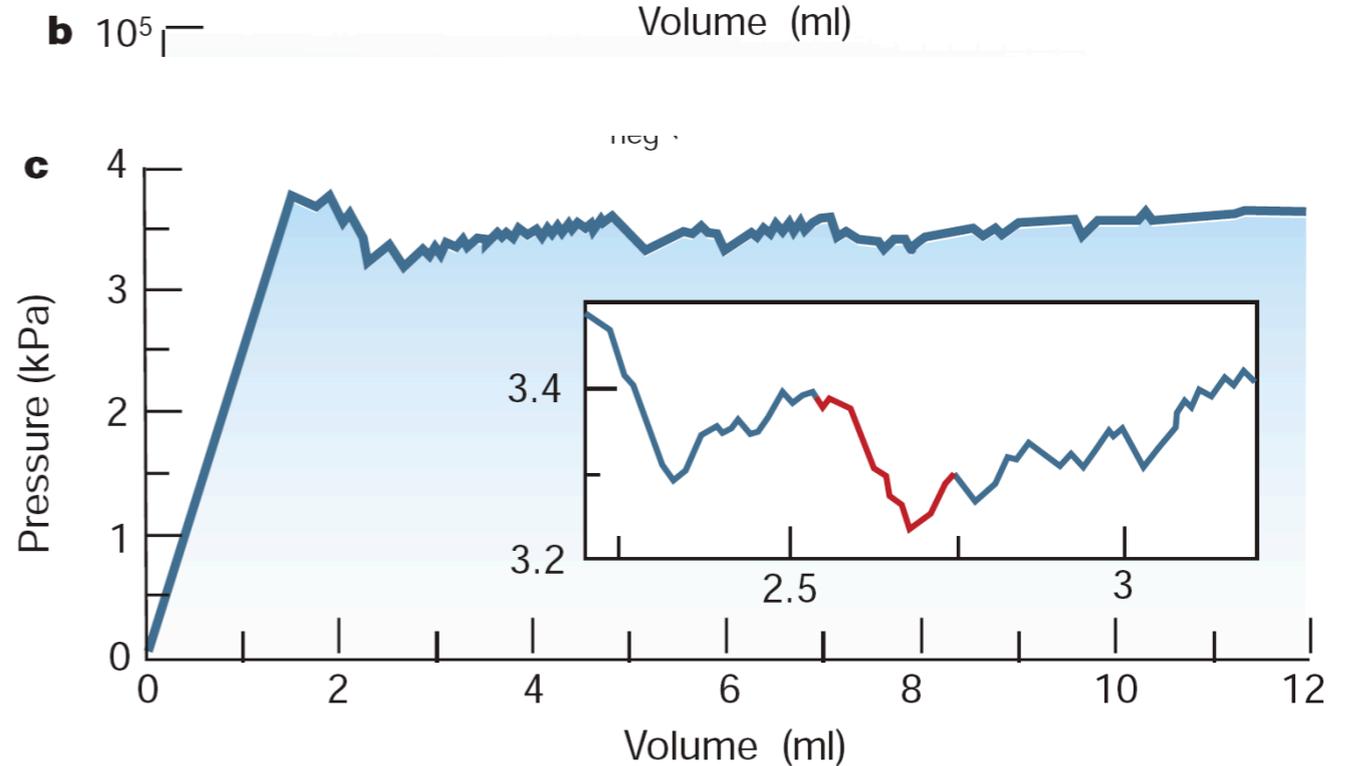
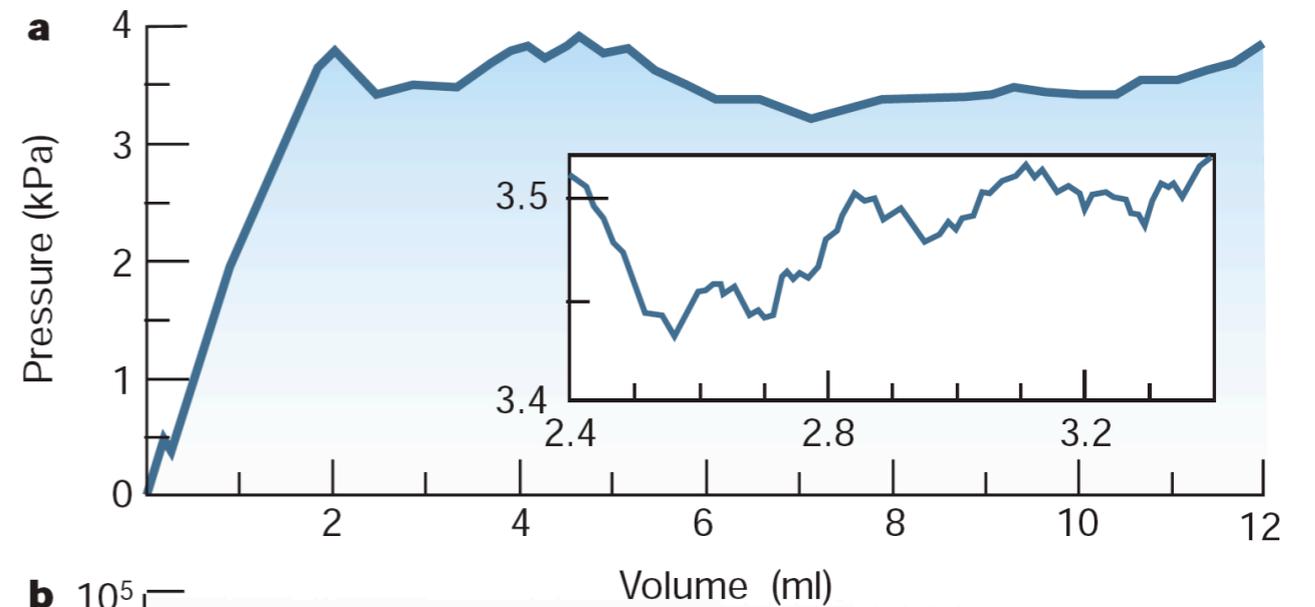
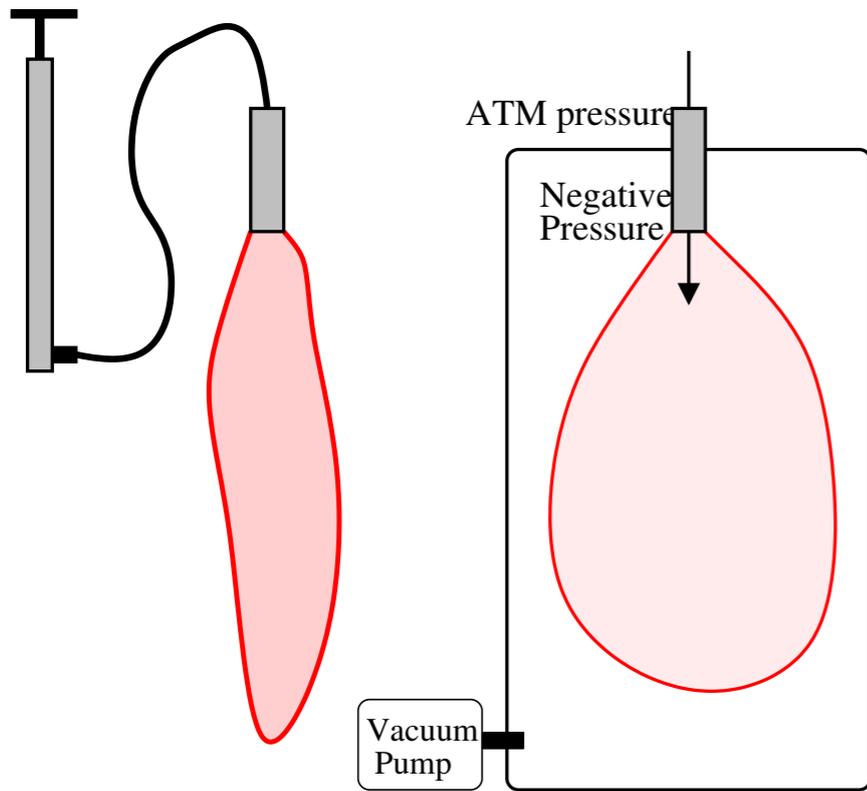
associado a uma pequena alteração no modelo

$$P_{i,M} = \frac{C\gamma_{i,M}}{d_i} + \eta,$$

Tensão Superficial



Instabilidade nos pulmões



$E = \frac{dP}{dV} > 0$

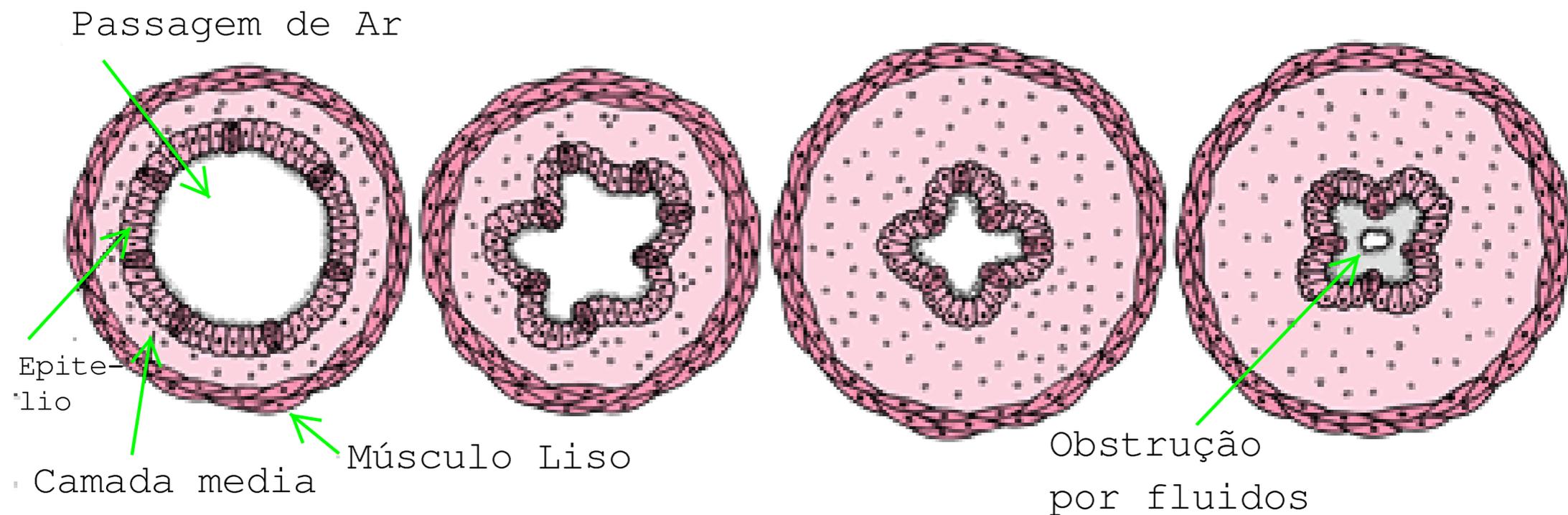
Não para o Pulmão!!!

Estrutura do Orgão

- A árvore pulmonar determina:
 - a intensidade dos sons (atenuação)
 - o intervalo temporal **AVALANCHES**
- O fluido que reveste o pulmão determina: reabertura e fechamento
 - a intensidade dos sons (geração)
- Entender o fluido que reveste o pulmão é crucial

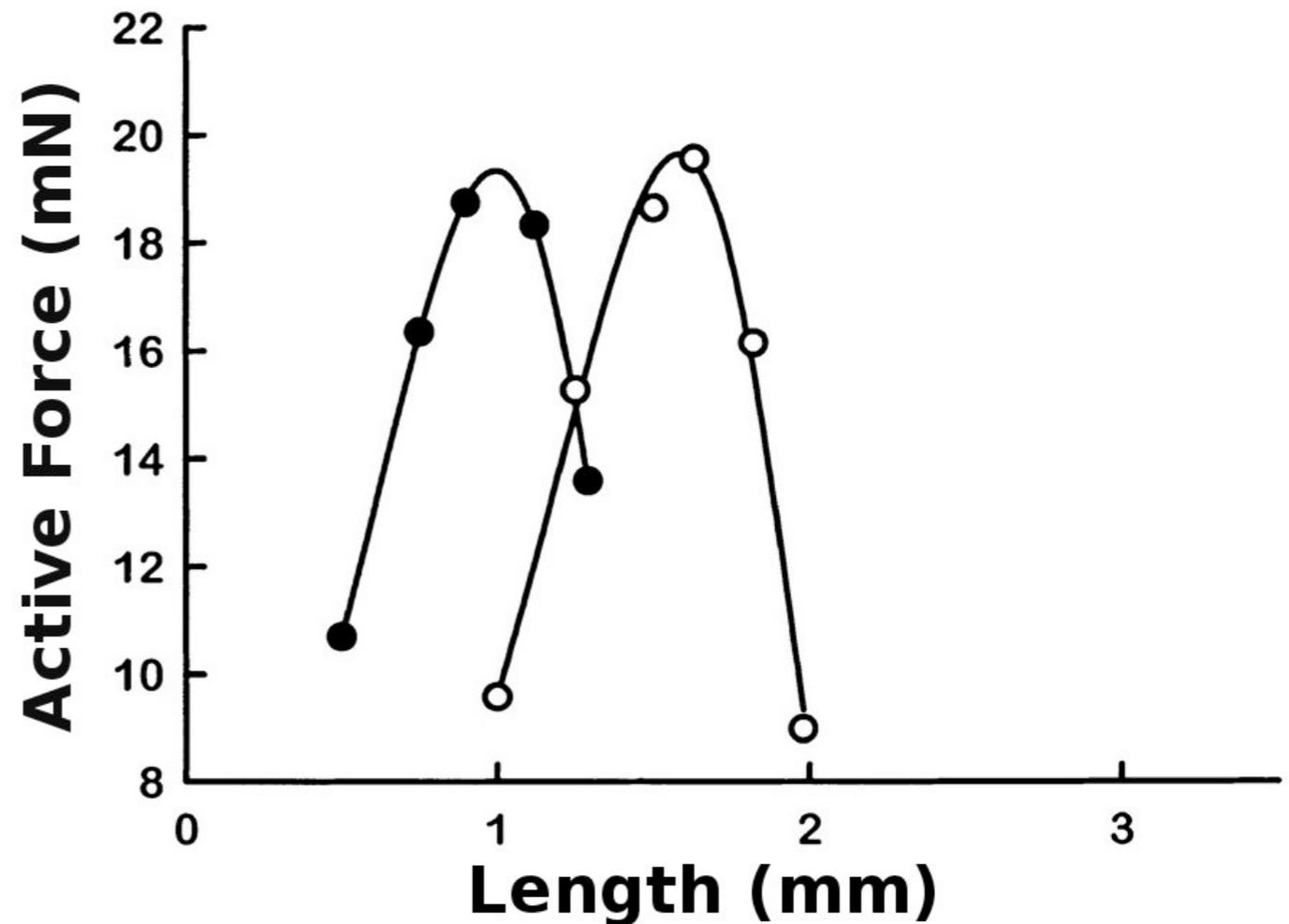
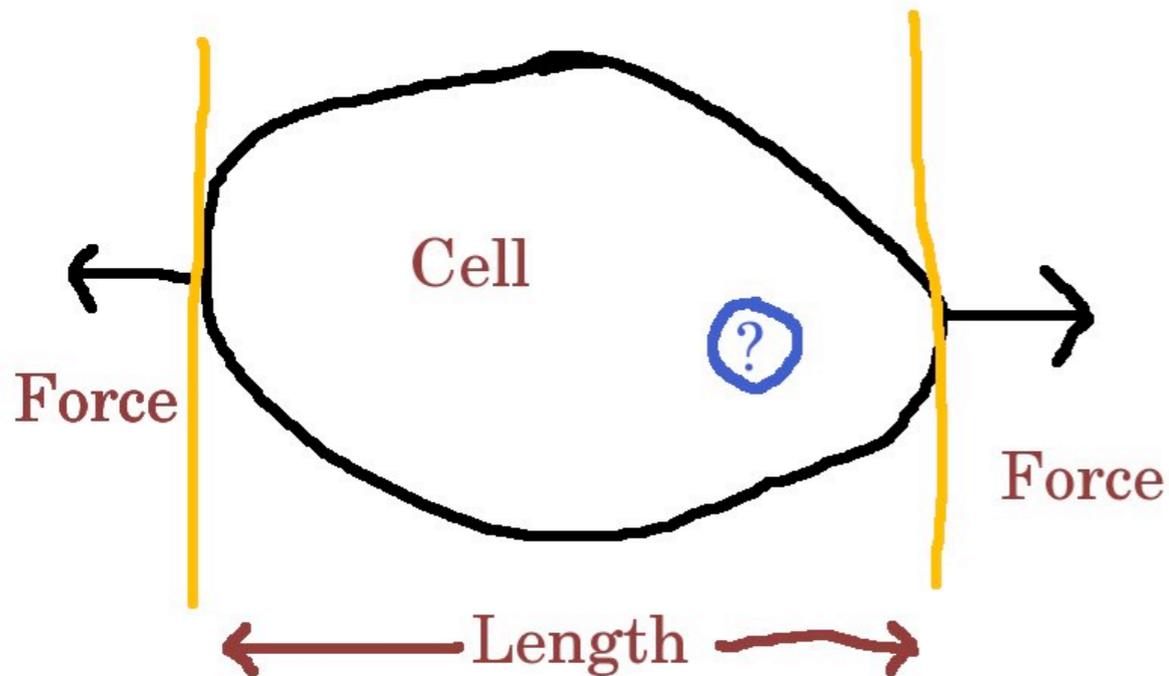
Tecido da via aerea

Corte transversal de vias aéreas (normal) → (inflamada)



O músculo liso possui uma característica vital para regular as vias aéreas:
Adaptação de tensão

Adaptação de comprimento



O músculo liso se adapta a novas “configurações”

[1] Wang et al., J. Apply. Physiology (2001)