

# Modelo de alvéolo pulmonar incluindo efeitos de tensão superficial

**Rudolf de Almeida Prado Hellmuth**, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e-mail: [rudolf.hellmuth@gmail.com](mailto:rudolf.hellmuth@gmail.com)

**Marcelo Amato**, Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, e-mail: [amato@unisys.com.br](mailto:amato@unisys.com.br)

**Raúl González Lima**, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e-mail: [lima.raul@gmail.com](mailto:lima.raul@gmail.com)

## Introdução

Os modelos mecânicos atuais de pulmão carecem de mecanismo de colapso alveolar e por isso não permitem simular manobras de recrutamento alveolar. Existem depósitos de água nos espaços intersticiais dos alvéolos e ali a tensão superficial desse líquido tem grande importância na estabilidade alveolar (Hills, 1999). Este trabalho desenvolve um modelo estrutural 2D utilizando o método de elementos finitos, levando em consideração o carregamento provocado pela tensão superficial das líquido nos espaços intersticiais dos alvéolos.

## Tensão superficial

A tensão superficial é uma energia repulsiva, que aparece na interface entre duas fases químicas de um sistema. Ela ocorre porque nas moléculas da interface não há o mesmo equilíbrio de forças moleculares que existe nas moléculas no substrato, afastadas da interface. Em interfaces curvas, como meniscos de capilares, a Lei de Young-Laplace, Equação (1), relaciona o raio do menisco ( $R$ ), a tensão superficial ( $\gamma$ ) e a diferença de pressão entre os dois lados da interface ( $\Delta p$ ) (Adamson, 1997).

$$\Delta p = \frac{\gamma}{R} \quad (1)$$

## Surfactante pulmonar

Para evitar colapamento dos alvéolos e controlar a histerese alveolar, algumas células do pulmão secretam uma mistura surfactante. O surfactante tem afinidade química com a fase líquida e a gasosa e, por isso, reduz drasticamente a tensão superficial. Pequenas alterações nas propriedades físico-químicas do surfactante e

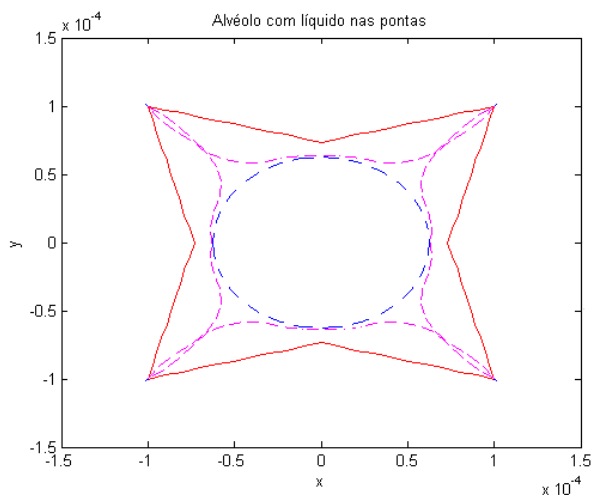
no volume do líquido podem desestabilizar o equilíbrio estrutural dos alvéolos.

## O modelo

O alvéolo foi modelado com elementos finitos de viga, com baixa rigidez de flexão e alta rigidez de tração. Suas pontas foram fixadas com elementos de mola de alta rigidez, para simular fibras estruturais do pulmão, em vínculos fixos. A geometria definida foi uma estrela de quatro pontas simétricas. Em cada ponta definiu-se um volume de líquido e uma tensão superficial constante.

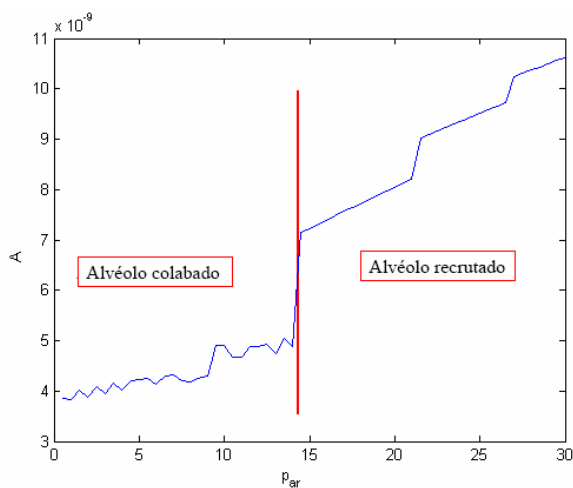
Por meio de integração numérica, da ponta e em direção ao centro, sabe-se quantos elementos de viga estão molhados e o raio da interface (distância do último nó molhado até o vetor de simetria ponta-centro). Um carregamento distribuído é aplicado somente nos elementos em contato com o líquido, de acordo com a Equação (1), e outro carregamento distribuído é aplicado em todos elementos, para simular a pressão do ar. A pressão feita pelas gotas é no sentido de fechar o alvéolo.

Com a deformação da estrutura, o líquido nas pontas é espremido e passa a molhar mais elementos, assim como o modelo de Hill et al. (1997). Por isso, são feitas várias iterações de integração – carregamento – deformação, para se atingir o equilíbrio final da estrutura colabada. O resultado da estrutura do alvéolo colabada pode ser vista na Figura 1.



**Figura 1: Alvéolo colabado. Linhas vermelhas contínuas: geometria inicial; linhas rosa tracejadas: geometria deformada (colapsada); linhas azuis tracejadas: menisco quando atinge o último nó de cada ponta.**

Este modelo também é capaz de mostrar o colapso acontecendo somente em pressões transmuralis inferiores a um valor bem definido de pressão transmural. Isso quer dizer, que acima deste valor o alvéolo está recrutado e abaixo ele tem um colapso súbito. A Figura 2 mostra um gráfico da área interna da geometria em função da pressão do ar dentro do alvéolo. Os valores não têm unidade relevante, são apenas ilustrativos.



**Figura 2: Gráfico da área intraluminal do alvéolo em função da pressão transmurais entre o ar e o tecido. Este gráfico mostra claramente a pressão mínima em que o alvéolo colaba.**

### Comentários finais

Este trabalho mostra ser possível simular o efeito da tensão superficial em alvéolos utilizando modelos de elementos finitos. Os

valores dos resultados não estão próximos da realidade, porque foram utilizados elementos de viga simples. Entretanto, qualitativamente, o modelo consegue mostrar o efeito do colapso alveolar provocado, entre outros fatores, pela tensão superficial. Na busca de resultados quantitativamente mais próximos da realidade presume-se necessário o desenvolvimento de modelos mais sofisticados, com modelos 3D, utilizando outros tipos de elementos finitos, com aglomerados de alvéolos lado a lado e melhor integração do volume líquido.

### Referências bibliográficas

Adamson, A. W. ; Gast, A. P., Physical Chemistry of Surfaces, 6e, Ed. John Wiley & Sons Inc., Estados Unidos, 1997.

Hill, M. J.; Wilson, T. A; Lambert, R. K., Effects of surface tension and intraluminal fluid on mechanics of small airways. Journal of Applied Physiology, Bethesda, v. 82, p 233-239, jun. 1997.

Hills, B. A., An alternative view of the role(s) of surfactant and the alveolar model. Journal of Applied Physiology, Bethesda, v. 87, p 1567-1583, nov. 1999.