

Acoplamento entre deformação elástica e escoamento de fluido intersticial em tecidos vascularizados: Ramificações para o imageamento poroelástico.

Ricardo Leiderman, Programa de Engenharia Mecânica da COPPE, UFRJ, e-mail: leider@mecanica.ufrj.br.

Fernando Alves Rochinha, Programa de Engenharia Mecânica da COPPE, UFRJ, e-mail: faro@serv.com.ufrj.br.

Paul E. Barbone, Departamento de Engenharia Aeroespacial e Mecânica, Boston University, e-mail: barbone@bu.edu.

Assad A. Oberai, Departamento de Engenharia Mecânica, Aeroespacial e Nuclear, Rensselaer Polytechnic Institute, e-mail: oberaa@rpi.edu.

Jeffrey C. Bamber, Departamento de Física, Institute of Câncer Research, e-mail: jeff@icr.ac.uk.

Introdução

Tradicionalmente, algumas propriedades biomecânicas, e em particular a rigidez do tecido, têm sido úteis no diagnóstico e monitoramento do tratamento de cânceres. Na maioria destes casos, a rigidez é avaliada através da palpação, ou seja, o médico ou o paciente, apalpando o tecido, percebe o tumor como sendo uma região mais rígida. Recentemente, um número grande de pesquisadores têm trabalhado no sentido de se desenvolver e sistematizar técnicas de imageamento para a avaliação da rigidez em tecidos macios, para substituir a palpação. A este conjunto de técnicas dá-se o nome geral de “Elastografia”.

Entretanto, hoje em dia é reconhecido que a rigidez não é a única propriedade biomecânica que pode trazer informações úteis para o diagnóstico e tratamento de tumores sólidos. De fato, alguns pesquisadores têm dito que a densidade de microvascularização anormal (*angiogênese*) parece ser o parâmetro mais significativo no que diz respeito ao diagnóstico, prognóstico e monitoramento do tratamento de tumores sólidos.

Tecidos macios apresentam fases sólidas e líquidas, as quais podem se mover independentemente umas das outras. Além disso, o fluido se encontra em vários compartimentos do tecido, e em especial no compartimento vascular (incluindo capilares e vasos linfáticos) e no compartimento extravascular (interstício). Devido a permeabilidade das paredes dos microvasos, fluido é freqüentemente trocado entre

estes dois compartimentos. É reconhecido que o escoamento de fluido propicia uma relaxação do tecido. É razoável conjecturar-se então, que medindo-se o padrão espaço-temporal da deformação elástica do tecido em um experimento de relaxação, utilizando técnicas já existentes de elastografia, possa-se visualizar e quantificar o escoamento de fluido e, conseqüentemente, imagear-se propriedades biomecânicas relacionadas a ele.

Nesse sentido, este trabalho tem como motivação principal responder a seguinte questão: *É viável a utilização de técnicas de Elastografia no imageamento do padrão espaço-temporal da deformação elástica em tecidos macios e, por conseguinte na visualização e quantificação do escoamento de fluido intersticial?* Para responder a esta questão nós utilizamos um modelo matemático existente na literatura [1] em conjunção com o método dos elementos finitos para prever os efeitos do escoamento de fluido intersticial no padrão espaço-temporal da deformação elástica em tecidos sob diferentes condições fisiológicas.

Modelo poroelástico

As equações do modelo utilizado são:

$$\nabla \cdot \dot{\mathbf{u}} - \nabla \cdot (\kappa \nabla p) + \chi p = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (-p \mathbf{I} + \lambda \nabla \cdot \mathbf{u} \mathbf{I} + 2\mu \boldsymbol{\varepsilon}) = 0 \quad (2)$$

Aqui, \mathbf{u} e $\dot{\mathbf{u}}$ são o deslocamento e a velocidade da fase sólida. κ é a permeabilidade intersticial, em geral extremamente baixa em tecidos. O último

termo do lado esquerdo da Equação (1) representa a troca de fluido entre compartimentos. Esta troca é governada pela lei de Starling, onde χ , conhecido como o *coeficiente de filtração*, é a constante de proporcionalidade. Em Leiderman *et al* [2] encontra-se a derivação e a descrição detalhada do modelo.

Experimento numérico e resultados

A simulação está representada de forma esquemática na Figura 1, e representa uma inclusão circular de 1cm de diâmetro presente em uma amostra de tecido sadio de 10cm X 10cm. As propriedades biomecânicas da inclusão foram escolhidas a partir de valores disponíveis na literatura, para simular o comportamento de um tumor maligno. Compressão mecânica é aplicada e mantida na superfície superior da amostra.

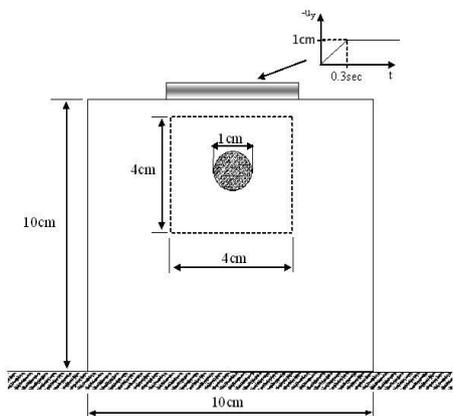


Figura 1: Experimento numérico

Na Figura 2 são apresentados os resultados da simulação relativos a resposta espaço-temporal da pressão (MPa) na região delimitada pela linha pontilhada na Figura 1. O gráfico da esquerda representa o campo de pressão logo após a compressão ter sido aplicada. O gráfico da direita representa o campo de pressão após cerca de 5 segundos. Pode-se notar que devido a microvascularização anormal (aumentada) do tumor, ele relaxa muito mais rápido que o tecido sadio em volta.

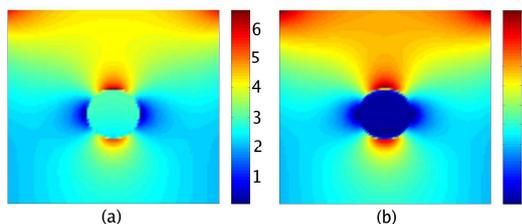


Figura 2: Campo de pressão para t=0.5seg e t=5.3seg.

Na Figura 3 é apresentada a diferença da dilatação para t=0.3seg e 5.3seg.

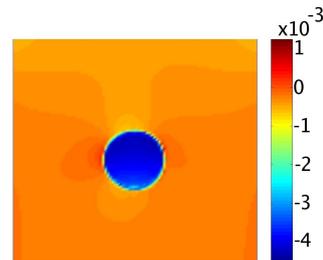


Figura 3: Diferença da dilatação para t=0.5seg e t=5.3seg.

Pode-se notar na figura acima que, em concordância com os campos de pressão, o tumor encolheu muito mais neste intervalo de tempo que o tecido sadio em volta. Mais uma vez, isto é devido a microvascularização anormal do tumor.

Conclusão

Um modelo poroelástico que inclui os efeitos de escoamento de fluido intersticial e a possibilidade de troca de fluido entre compartimentos foi utilizado em conjunção com o método dos elementos finitos para investigar os efeitos do escoamento de fluido no padrão espaço-temporal da deformação elástica em tecidos macios sob uma variedade de condições fisiológicas.

Resultados das simulações numéricas sugerem ser possível o imageamento do escoamento de fluido intersticial (e conseqüentemente o imageamento de propriedades biomecânicas relacionadas a ele) medindo-se a correspondente taxa de deformação. Em particular, mostrou-se aqui que a vascularização anormal de tumores sólidos tende a aumentar a velocidade de relaxação e por conseqüência a taxa de deformação.

Referências bibliográficas

- [1] Netti PA, Baxter LT, Boucher Y, Skalak R, Jain RK. Macro- and microscopic fluid transport in living tissues: Application to solid tumors. *AICHE Journal*, Vol. **43**(3), pp. 818-834, 1997.
- [2] Leiderman R, Barbone PE, Oberai AA, Bamber JC. Coupling between elastic strain and interstitial fluid flow: ramifications for poroelastic imaging. *Phys. Med. Biol.* **51**, pp. 6291-6313, 2006.