

Os Métodos Computacionais em Hemodinâmica

Rui Lima^{1,2}, Ken-ichi Tsubota², Shigeo Wada², Takami Yamaguchi²

1 - Instituto Politécnico de Bragança (IPB), Escola Superior de Tecnologia e de Gestão (ESTiG), Campus de Santa Apolónia, Apartado 134, 5301-857, Bragança, Portugal, ruimec@ipb.pt

2 – Tohoku University, Graduate School of Engineering, Dep. of Bioengineering and Robotics, Aoba 01, Sendai 980-8579, Japan, ruい@pfs1.mech.tohoku.ac.jp

RESUMO

Até à última década do século XX, a investigação realizada em hemodinâmica limitava-se, essencialmente, a estudos baseados em métodos experimentais e modelos matemáticos. No entanto, no final do século XX, os avanços tecnológicos na área da computação e o custo mais baixo de aquisição propiciaram uma nova forma de investigar os factores hemodinâmicos em termos fisiológicos e patológicos. Tal como tem acontecido em diversas áreas da ciência, os métodos computacionais constituem um complemento bastante promissor para investigar e analisar uma série de mecanismos fisiológicos e patológicos existentes nos vários órgãos do corpo humano. Este artigo trata, portanto, dos métodos computacionais em hemodinâmica e faz uma breve descrição do processo e da aplicação destes métodos no estudo do escoamento sanguíneo.

INTRODUÇÃO

Desde os finais dos anos sessenta que existe, na comunidade científica, um consenso cada vez mais alargado de que os factores hemodinâmicos contribuem de forma significativa para o início e desenvolvimento das doenças cardiovasculares. De entre este tipo de doenças, a aterosclerose é a de maior incidência e significância, ocupando o topo da lista dos casos mortais nos países industrializados e podendo o seu desenvolvimento resultar numa diminuição ou mesmo estagnação do fluxo sanguíneo para órgãos cruciais como o cérebro ou o coração. Neste contexto, um conhecimento detalhado da influência dos factores hemodinâmicos na iniciação e desenvolvimento da aterosclerose poderá ser um contributo importante no conhecimento dos acidentes cardio e cerebrovasculares [1-5].

De acordo com descobertas recentes a nível científico, os escoamentos turbulentos com zonas de separação e de recirculação, as tensões de corte baixas e oscilantes existentes nas paredes das artérias, e o tempo de residência de determinadas partículas em zonas com geometrias bastante complexas, são factores hemodinâmicos que se têm revelado ser contributos importantes para a prevenção, diagnóstico e tratamento das doenças cardiovasculares. Neste contexto, uma melhor compreensão dos mecanismos complexos envolvidos no processo do escoamento sanguíneo exige um conhecimento detalhado dos fenómenos mecânicos e estruturais do fluido, existentes no sistema vascular. Todavia, os modelos teóricos e experimentais que têm sido desenvolvidos no estudo destes fenómenos, ainda não conseguiram explicar com exactidão os mecanismos existentes durante o escoamento do sangue no sistema vascular. Um dos obstáculos existentes é o facto do escoamento sanguíneo e das grandes deformações presentes nos tecidos serem não lineares e bastante sensíveis a pequenas diferenças geométricas o que, por sua vez, incentivou uma nova forma de investigar com recurso aos métodos computacionais. [1-3]

A investigação com utilização de métodos computacionais não é mais do que um complemento da investigação realizada em termos teóricos e experimentais, apresentando como principais vantagens a validação e a análise de modelos matemáticos e físicos e o apoio aos métodos experimentais na determinação das variáveis mais complexas de obter experimentalmente como, por exemplo, as tensões de corte exercidas nas paredes dos vasos sanguíneos. Por outro lado, os métodos computacionais possibilitam, ainda, a obtenção de resultados de uma forma mais rápida e com custos mais baixos, quando comparados com a investigação experimental. [1-3]

OS MÉTODOS COMPUTACIONAIS EM HEMODINÂMICA

Descrição do Processo

A análise computacional do escoamento sanguíneo pode ser dividida em várias fases (veja-se a Figura 1). Todavia, antes de se efectuar a simulação computacional tem que se seleccionar o modelo matemático que melhor descreve o escoamento real do sangue. Assim, o primeiro passo consiste, essencialmente, em identificar as equações fundamentais que descrevam em linguagem matemática os princípios físicos relacionados com estudo em causa. O modelo matemático que é considerado ser o mais completo e que reúne maior consenso na comunidade científica, especialista em hemodinâmica, é o que se baseia nas equações de Navier-Stokes e na equação de continuidade. Estas equações podem, de acordo com [1, 2, 8], ser especificadas pelas fórmulas seguintes:

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \vec{u} = 0, \quad (2)$$

ou

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

onde ∇ representa o vector divergência, \mathbf{u} a velocidade, t o tempo, p a pressão, e os parâmetros ρ e μ a densidade e a viscosidade, respectivamente. De salientar que a especificação das equações (1) e (2) é obtida depois de um certo número de aproximações (assumindo-se o comportamento do sangue idêntico ao de um fluido Newtoniano incompressível) e, ainda, pela utilização de relações auxiliares (i.e., relações entre o estado de tensão e a cinemática de um fluido) [1, 8].

Apesar da sua fórmula simplificada, as equações de Navier-Stokes e de continuidade são equações não-lineares sem solução analítica em situações complexas. No entanto, é possível com o auxílio de técnicas numéricas discretizar as equações de um modelo matemático, constituído por equações diferenciais, e obter as equações algébricas correspondentes. A discretização pode ser

realizada por intermédio de vários métodos numéricos, sendo os mais conhecidos o método dos elementos finitos, o método das diferenças finitas, o método dos volumes finitos e, mais recentemente, o método de geração automática da malha (“mesh free method”) [1]. Uma informação mais detalhada sobre os vários métodos numéricos poderá ser encontrada consultando bibliografia especializada nesta área [1- 3].

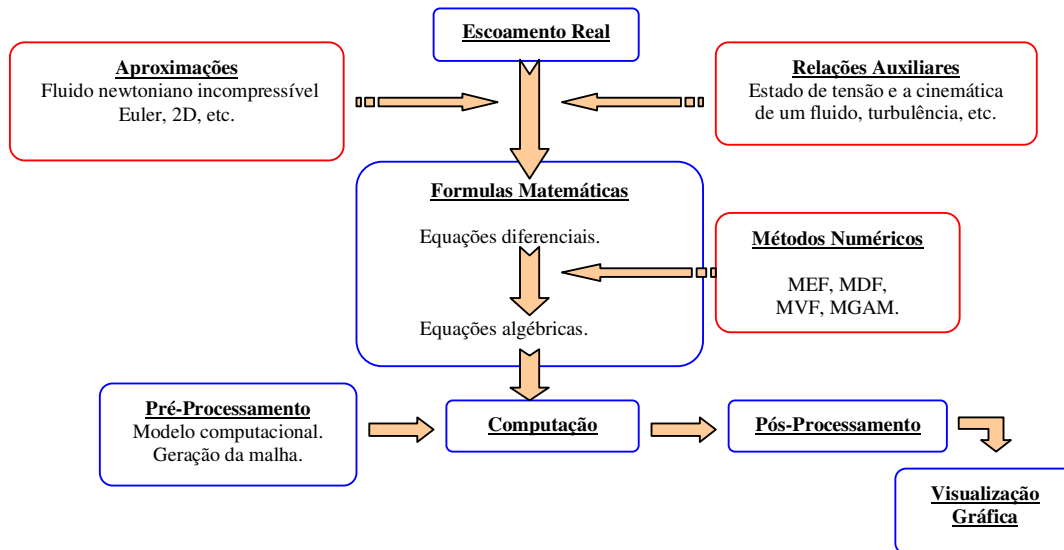


Figura 1- Diagrama das várias fases dos estudos com a técnica CFD (adaptado de [1]).

Depois de se ter seleccionado o método numérico mais adequado é necessário, pela operação designada de pré-processamento (“pre-processing”), não só definir o modelo computacional mas também as condições iniciais e de fronteira do problema em estudo. Esta fase é considerada uma das mais importantes e morosas porque, no caso de se pretender estudar geometrias bastante complexas, a construção da malha computacional pode representar mais de 90% de toda a análise computacional. Na fase seguinte, a solução numérica das equações algébricas pode ser obtida utilizando um software comercial de CFD (“Computational Fluid Dynamics”). Nesta fase os resultados obtidos não passam de extensas listas de números que representam os parâmetros que pretendemos estudar. Por ser difícil interpretar estes resultados torna-se necessário utilizar programas e/ou ferramentas de visualização para converter os resultados computacionais em

informação passível de ser interpretada e comparada qualitativa e quantitativamente em termos fisiológicos e patológicos. [1]

Aplicações da Técnica CFD

A dinâmica computacional dos fluidos, conhecida na literatura inglesa da especialidade por CFD (“Computational Fluid Dynamics”), é uma técnica que utiliza um software comercial para obter soluções numéricas através da aplicação dos princípios clássicos da mecânica dos fluidos como, por exemplo, a aplicação da equação de Navier-Stokes, acima referida. Como esta técnica envolve um número bastante elevado de equações existe, por vezes, necessidade de se recorrer a sistemas computacionais sofisticados para se conseguir obter soluções numéricas. De entre as diferentes áreas científicas, onde os modelos computacionais têm sido utilizados com bastante sucesso, destaca-se a sua aplicação na meteorologia onde são utilizados na previsão do tempo e na engenharia aeronáutica onde a decisão de produzir, por exemplo, uma asa de avião só se concretiza depois da concepção de vários modelos em computador e da simulação em CFD das várias alternativas, acabando por ser escolhido o modelo que obtém melhor comportamento aerodinâmico.

Apesar dos avanços tecnológicos recentes na ciência médica, no domínio da aquisição de imagem para diagnóstico e terapêutica, os técnicos e especialistas desta área ainda não colocaram em prática a possibilidade de tratarem a informação recolhida, pelas tecnologias existentes, utilizando métodos computacionais. Apesar da evolução tecnológica na área, a informação obtida só é válida para determinadas condições fisiológicas recolhidas no paciente (normalmente em repouso) sendo necessário extrapolar-se para se poder obter informações relativas a outras condições fisiológicas, tais como andar, correr ou pós intervenção cirúrgica e, neste campo, os métodos computacionais poderão dar um contributo importante. [1,3,6,7]

De acordo com a opinião de diversos especialistas, a implementação dos métodos computacionais irá proporcionar a utilização da medicina de previsão (“predictive medicine”) enquanto complemento dos métodos clássicos de diagnóstico e tratamento como, por exemplo, a

possibilidade de se simularem diferentes tipos de cirurgias virtuais e de se escolher a que apresenta melhores resultados. Assim, no futuro, os cirurgiões poderão prever os resultados de uma determinada operação antes de a realizarem no paciente. No entanto, para realizar este tipo de simulação é necessário utilizar modelos bastante precisos, em termos anatómicos e fisiológicos, do paciente que irá ser operado e, por isso, apesar da investigação que se tem vindo a fazer nesta área, a complexidade do corpo humano tem sido um dos grandes obstáculos em reunir consenso sobre o modelo a ser implementado no futuro. [6,7]

O Laboratório de Estudos dos Escoamentos Fisiológicos (“Physiological Flow Studies Laboratory”, PFSL) da Universidade de Tohoku, no Japão, é um dos centros de investigação em biomecânica computacional que aplica a técnica CFD em hemodinâmica. Existem, neste momento, vários projectos em curso nomeadamente: o desenvolvimento de um sistema cooperativo para aplicação da biomecânica computacional na medicina clínica cardiovascular [9, 10], a simulação do deslocamento e deformação dos glóbulos vermelhos tendo como base o princípio de energia mínima [11, 12, 13, 14], e a utilização de um método de geração automático da malha para investigar vários fenómenos fisiológicos e patológicos que ocorrem no sistema circulatório humano, como, por exemplo, a formação, desenvolvimento e destruição de um trombo [12, 13, 14]. Uma informação mais detalhada sobre estes projectos poderá ser obtida consultando a página oficial do laboratório (www.pfsl.mech.tohoku.ac.jp).

CONCLUSÃO

Em hemodinâmica, tanto a investigação teórica como a experimental são abordagens importantes no estudo de um determinado problema. Contudo, basear o estudo apenas nestas duas componentes poderá ser bastante limitativo e dispendioso.

A necessidade de prever certas anomalias no escoamento sanguíneo, as incertezas das análises teóricas, a dificuldade de obter informação detalhada experimentalmente para se perceberem os fenómenos fisiológicos e patológicos, os progressos nos métodos numéricos aliados à possibilidade de adquirir computadores bastante poderosos a baixo custo foram factores

determinantes no aparecimento de uma nova alternativa de realizar investigação científica em hemodinâmica, ou seja, a investigação com o recurso aos métodos computacionais.

No entanto, os métodos computacionais não foram criados para substituir a investigação tradicional, mas sim para auxiliar a investigação experimental e teórica. Assim, de forma a garantir a confiança nos resultados obtidos através da simulação computacional, é prática comum realizar ensaios experimentais em situações idênticas às aquelas simuladas.

Apesar da aplicação dos métodos computacionais na medicina ainda ser bastante incipiente, a crescente investigação nesta área irá proporcionar, num futuro próximo, uma ferramenta indispensável nos diagnósticos e tratamentos médicos.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Yamaguchi, T; “Computational Visualization of Blood Flow in the Cardiovascular System”, Biological Flow, Jaffrin, M. and Caro, C.(eds), Plenum Press, New York, pp.115-136, 1996.
- [2] Perktold, K. and Rappitsch, G.; “Computational Simulation of Arterial Blood Flow ”, Biological Flow, Jaffrin, M. and Caro, C.(eds), Plenum Press, New York, pp.83-114, 1996.
- [3] Yamaguchi, T; “Computational Mechanical Model Studies in the Cardiovascular System”, Clinical Application of Computational Mechanics to the Cardiovascular System, Springer-Verlag, Tokyo,pp.3-17, 2000.
- [4] Liepsch, D. , “Fundamental Flow Studies in Models of Human Arteries”, Frontiers Med. Biol. Engng., Nº1, pp.51-55, 1993.
- [5] Hosoda, S., T. Yaginuma, M. Sugawara, M. Taylor and C. Caro, *Recent Progress in Cardiovascular Mechanics*, Harwood Academic Publishers, Switzerland, 1994.
- [6] Taylor, C.,“A Computational Framework for Investigating Hemodynamic Factors in Vascular Adaptation and Disease”, PhD Thesis, Dep. Mechanical Engineering, Stanford University, 1996.
- [7] Lohner R. et al., “Applications of Patient-Specific CFD in Medicine and Life Sciences”, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 43, pp.637-650, 2003.
- [8] Teixeira, J. C., “Mecânica dos Fluidos”, Departamento de Mecânica, Universidade do Minho, Guimarães, 2001.
- [9] Yamaguchi, T.; “Computational Visualization of Blood Flow for Application to Clinical Cardiovascular Medicine”, Future Medical Engineering based on Bio-nanotechnology, 21st Century COE Program, Tohoku University, Japan, pp.13-14, 2004.
- [10] Yamaguchi, T., et al.; “A Collaborative System for the Application of Computational Biomechanics to Clinical Cardiovascular Medicine”, Proceedings of the European Society of Biomechanics, Netherlands, 2004.
- [11] Wada, S.; Kobayashi, R., 2002. “Simulation of the Shape Change of a Red Blood Cell at the Entrance of a Capillary”, Proceedings of the 4th World Congress of Biomechanics, Calgary, Canada, 2002.
- [12] Tsubota, K., et al.; “Coupled Analysis of Blood Cell Motion and Plasma Using Particle Method”, Proceedings of the European Society of Biomechanics, Netherlands, 2004.
- [13] Lima, R., et al.; “O Método MPS de Simulação Computacional: aplicações ao estudo do escoamento sanguíneo”, Encontro, 1, Biomecânica, Abrantes, Portugal, pp.325-330, 2005.
- [14] Tsubota, K. et al. “A particle method for blood flow simulation: application to flowing red blood cells and platelets”, Journal of the Earth Simulator, Vol.5, pp 2-7, 2006.