

KLEIBER LIMA DE BESSA

**REDUÇÃO DE ARRASTO POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS EM
ESCOAMENTO PULSÁTIL LAMINAR E TURBULENTO EM
LEITOS ARTERIAIS CAUDAIS DE RATOS NORMOTENSOS E
HIPERTENSOS E TUBOS RÍGIDOS**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do Título de Doutor em
Engenharia.**

**São Paulo
2008**

Kleiber Lima de Bessa

REDUÇÃO DE ARRASTO POR ADIÇÃO DE POLÍMEROS EM
ESCOAMENTO PULSÁTIL LAMINAR E TURBULENTO EM LEITOS
ARTERIAIS CAUDAIS DE RATOS NORMOTENSOS E
HIPERTENSOS E TUBOS RÍGIDOS

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Energia e Fluido

Orientador:
Prof. Dr. Jayme Pinto Ortiz

São Paulo
2008

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, 26 de maio de 2008.

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Bessa, Kleiber Lima de

**Redução de arrasto por adição de polímeros em escoamento pulsátil laminar e turbulento em leitos arteriais caudais de ratos normotensos e hipertensos e tubos rígidos / K.L. de Bessa. -- São Paulo, 2008.
138 p.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Endotélio 2. Polímeros (Materiais) 3. Modelagem computacional 4. Polietileno glicol 5. Reatividade vascular 6. Redução de arrasto 7. Tensão de cisalhamento I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

DEDICATÓRIA

**Dedico esse trabalho a minha esposa
Kero pela compreensão e perseverança
demonstradas em todos esses anos e
ao nosso filho(a) que está a caminho.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jayme Pinto Ortiz, pela orientação, compreensão, paciência, amizade ao longo desse trabalho e, pela oportunidade em aprender e compartilhar seus conhecimentos.

A Professora Dra. Luciana Venturini Rossoni pela sua enorme contribuição para o desenvolvimento desse trabalho que se mostrou sempre receptiva e bastante favorável a discussões a respeito do tema e por ter disponibilizado a infraestrutura laboratorial, sem a qual esse trabalho não teria sido realizado.

A Juliana Fernandes Beletatti, por ter aceitado o desafio de trabalhar nessa interdisciplinaridade.

Ao Professor Raul Gonzalez Lima pelas sugestões para o enriquecimento desse trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Mecânica dos Fluidos, Daniel, Ricardo e Henrique pela sua amizade e ajuda. E, particularmente, a Daniel que acompanhou e compartilhou algumas etapas desse trabalho.

Aos amigos e associados do Laboratório de Fisiologia Vascular, pelas inúmeras experiências compartilhadas, profissionais e pessoais. Obrigado pela convivência tão agradável, pelo respeito mútuo, pela ajuda e pela disponibilidade.

Ao Professor Carlos Frederico Martins Menck, pelos seus conselhos e por disponibilizar o microscópio óptico para medição dos diâmetros arteriais.

A Eduardo Marcic pela sua contribuição e experiência para adaptações na bancada experimental.

Aos técnicos do Laboratório de MecFlu, Douglas e Laércio, pela sua contribuição experimental.

Aos amigos, Faggioni, Moacir, Ana Maria e Andréia, pela amizade sempre presente.

A todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

“O único homem que está isento de erros,
é aquele que não arrisca acertar.”

Albert Einstein

RESUMO

Nesse trabalho, foi analisada a redução de arrasto, a partir da utilização de duas bancadas experimentais, onde uma delas está situada no laboratório de Mecânica dos Fluidos (EPUSP) e a outra, no laboratório de Fisiologia Vasculiar (ICB-USP). A redução de arrasto foi investigada a partir do uso dos seguintes polímeros: poliacrilamida 1822S e 1340S, polietileno glicol (PEG4000) e óxido de polietileno (Polyox WSR-301). O comportamento reológico das soluções poliméricas do PEG4000 e das poliacrilamidas foi adquirido experimentalmente, enquanto do Polyox WSR-301 foi obtido da literatura. Esses polímeros foram utilizados na bancada experimental da EPUSP, simulador hidrodinâmico, mas somente o PEG4000 foi utilizado na bancada experimental do ICB-I em leitos arteriais caudais de ratos normotensos (Wistar) e espontaneamente hipertensos (SHR). No simulador hidrodinâmico, foi estudada a redução de arrasto em escoamentos pulsáteis laminares e turbulentos, cuja faixa de Reynolds varia entre 2300 a 13700, com concentrações poliméricas que variaram entre 5 e 100 ppm, porém para o PEG4000 essa concentração atingiu valor de 5000 ppm. Em leitos arteriais caudais de ratos, a redução de arrasto foi analisada para escoamento laminar, cuja faixa de Reynolds varia entre 100 e 700, com concentração polimérica de 5000 ppm. Além disso, a redução de arrasto foi estudada na presença e ausência das células endoteliais. Simulações computacionais utilizando o método dos volumes finitos (Fluent) foram realizadas a partir dos dados obtidos da bancada experimental do ICB-I, para avaliar a distribuição da tensão de cisalhamento sobre a parede do vaso na presença e ausência das células endoteliais e do PEG4000, considerando a parede da artéria rígida. A partir dos dados obtidos da análise da viscosidade, ficou constatado que o PEG4000 com concentração de 5000 ppm e as poliacrilamidas 1822S e 1340S com concentrações de 5 e 10 ppm apresentaram comportamento de fluido Newtoniano. Para as poliacrilamidas, concentrações poliméricas acima de 10 ppm apresentaram comportamento de fluido não-Newtoniano. De acordo com a literatura, o Polyox WSR-301 apresentou comportamento de fluido Newtoniano para todas as concentrações poliméricas utilizadas nesse trabalho. O PEG4000 não apresentou o fenômeno da redução de arrasto em nenhuma concentração polimérica analisada, quando aplicado na bancada experimental da EPUSP. As poliacrilamidas e o Polyox WSR-301 apresentaram reduções de arrasto que foram dependentes do número de Reynolds e da concentração utilizada, muito embora o Polyox WSR-301 tenha se mostrado mais eficiente em promover esse fenômeno. Nos leitos arteriais caudais, o PEG4000 apresentou redução de arrasto para a concentração de 5000 ppm, que foi acentuada pela presença das células endoteliais. Os valores da tensão de cisalhamento foram maiores para o animal SHR quando comparados com o animal Wistar. Além disso, no animal Wistar, o endotélio controlou o aumento dessa tensão via produção de substâncias vasodilatadoras, mas apresentou disfunção no animal SHR. A partir dos resultados apresentados acima, pode-se concluir que o Polyox WSR-301 é mais eficiente para promover a redução de arrasto em tubos rígidos. Por outro lado, muito embora o PEG4000 não tenha apresentado efeito na bancada experimental da EPUSP, esse se mostrou um bom redutor de arrasto em leitos arteriais caudais, tendo sua ação intensificada pela presença das células endoteliais.

Palavras-chave: redução de arrasto, endotélio, polímeros, tensão de cisalhamento, modelagem física e computacional.

ABSTRACT

In this work, the drag reduction was analyzed in two benches located at Laboratory of Fluid Mechanics at Polytechnic School (EPUSP) and at Laboratory of Vascular Physiology at Institute of Biomedical Science (ICB-USP). The drag reduction was investigated for the following polymers: polyacrilamide 1822S and 1340S, polyethylene glycol (PEG4000) and polyethylene oxide (Polyox WSR-301). The rheological behavior of polymeric solutions of polyacrilamide and PEG4000 was acquired experimentally; while it was obtained from the literature for Polyox WSR-301. All of these polymers were used in the hydrodynamic simulator, but only PEG4000 was employed in the tails arterial bed from normotensive (Wistar) and spontaneously hypertensive rats (SHR) at ICB-1. In the hydrodynamic simulator, the drag reduction was analyzed in laminar and turbulent pulsatile flow, in the range varying between 2300 and 13700, with polymeric concentrations between 5 and 100 ppm, but for PEG4000, concentration has reached 5000 ppm. On the other hand, in the tail arterial beds, the drag reduction was analyzed for laminar flow, in the range between 100 and 700, with polymeric concentration of 5000 ppm. In addition, it was studied in the presence and absence of endothelial cells. Computational simulation using the finite volume method (Fluent) was performed using data obtained from ICB-1 in order to analyze the wall shear stress distribution along of wall vessel both in the presence and absence of endothelial cells and PEG4000, considering the rigid walls. Polyacrilamide 1822S and 1340S as well as PEG4000 showed behavior of Newtonian fluid in the following concentrations: 5 and 10 ppm and 5000 ppm, respectively. On the other hand, for polyacrilamides, concentrations higher than 10 ppm showed behaviour of non-Newtonian fluids. According to the literature, the Polyox WSR-301 behaved as a Newtonian fluid in all concentrations used in this work. At EPUSP's bench, while PEG4000 did not show drag reduction for any polymeric concentration analyzed, this phenomenon could be seen for polyacrilamides and Polyox WSR-301, being dependent on Reynolds number as well as polymeric concentration. More important, Polyox WSR-301 showed to be the most efficient drag reducer of them. Interestingly, in the assays employing the tail arterial beds, PEG4000 showed drag reduction in the concentration of 5000 ppm and it was increased by the presence of the endothelial cells. Thus, Polyox WSR-301 seems to be more efficient to promote drag reduction in the rigid tubes. On the other hand, while PEG4000 did not show drag reduction at EPUSP's bench, it was a good drag reducer in the tail arterial beds, being intensified by the action of endothelial cells.

Keywords: drag reduction, endothelium, polymers, shear stress, computational and physical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Representação esquemática do fator de atrito versus número de Reynolds: (1) escoamento laminar; (2) escoamento turbulento em tubos lisos; (3) assíntota de máxima redução de arrasto de Virk; (4), (5) e (6) três típicos comportamentos para soluções de polímeros, surfactantes e fibras.....	6
Figura 5.1 – Estrutura química da acrilamida.....	17
Figura 6.1 - Registro do aumento da velocidade com o tempo de um escoamento turbulento num tubo através de um anemômetro de filme quente.....	21
Figura 6.2 - Registro do fluxo sanguíneo na aorta descendente de um cão apresentando a turbulência durante a fase de desaceleração da sístole.....	21
Figura 6.3 - Estabilidade do escoamento sanguíneo na aorta descendente de cães anestesiados influenciados pelo pico do número de Reynolds e número de Womersley. Os pontos ligados referem-se ao mesmo animal. Círculos abertos, escoamento laminar; círculos preenchidos, escoamento turbulento; círculos parcialmente preenchidos, escoamento na fase de transição.....	22
Figura 6.4 - Perfil de velocidade completamente desenvolvido num tubo adimensionalizado com a velocidade máxima.....	29
Figura 6.5 - Perfil de velocidade (u_s) completamente desenvolvido, velocidade máxima (\hat{u}_s) e velocidade média (\bar{u}_s) como sendo metade da velocidade máxima.....	30
Figura 6.6 – Gradiente de pressão pulsátil $k(t)$ consiste de um parte constante, k_s , e uma parte puramente oscilatória, $k_\phi(t)$	33
Figura 6.7 – Perfis de velocidade oscilatórios num tubo rígido com número de Womersley $\Omega = 1$	39
Figura 6.8 - Perfis de velocidade oscilatórios num tubo rígido com número de Womersley $\Omega = 3$	40
Figura 6.9 - Perfis de velocidade oscilatórios num tubo rígido com número de Womersley $\Omega = 10$	42
Figura 6.10 - Variação da taxa de vazão volumétrica oscilatória q_ϕ no ciclo oscilatório comparada com a variação correspondente do gradiente de pressão com o número de Womersley $\Omega = 1$	44
Figura 6.11 - Variação da taxa de vazão volumétrica oscilatória q_ϕ no ciclo oscilatório comparada com a variação correspondente do gradiente de pressão com o número de Womersley $\Omega = 3$	44

Figura 6.12 - Variação da taxa de vazão volumétrica oscilatória q_ϕ no ciclo oscilatório comparada com a variação correspondente do gradiente de pressão com o número de Womersley $\Omega = 10$	45
Figura 6.13 – Curva do pulso de pressão e gradiente de pressão arterial medidos entre dois pontos distantes 5 cm na artéria femoral de cão.....	47
Figura 6.14 – Gráfico discretizado do gradiente de pressão oscilatório em 50 partes iguais: 7,2°.....	47
Figura 6.15 – Representação do pulso oscilatório de vazão e do gradiente de pressão na artéria femoral de um cão.....	50
Figura 7.1 – Representação dos cilindros e perfil de velocidade entre cilindros concêntricos: (a) cilindro interno girando; (b) distribuição de velocidades; (c) cilindro interno.....	52
Figura 7.2 – Viscosímetro capilar de força gravitacional: Ubbelohde.....	53
Figura 7.3 – Simulador hidrodinâmico para estudos <i>in vitro</i> do sistema cardiovascular. A – unidade central de bombeamento; B – seção de teste.....	56
Figura 7.4 – Descrição da unidade central de bombeamento e da seção de teste do simulador hidrodinâmico para estudos <i>in vitro</i> do sistema cardiovascular. R – reservatório; 1 – motor de corrente contínua; 2 – câmara do pistão; 3 e 4 – válvulas unidirecionais; 5 – manômetros.....	57
Figura 7.5 – Moldes utilizados para o desenvolvimento dos tubos de silicone: (A) molde sem estenose; (B) moldes com 30% e 50% de redução de área.....	58
Figura 7.6 – Representação dos tubos estenosados de silicone (Sylgard 184, Dow Corning).....	59
Figura 7.7 – Descrição da bancada experimental utilizada no ensaio de redução de arrasto em leitos arteriais caudais.....	61
Figura 7.8 – Artérias caudais de rator normotensos (Wistar) e espontaneamente hipertensos (SHR).....	62
Figura 7.9 – Malha computacional que representa a artéria caudal mostrando a camada limite.....	68
Figura 8.1 – Tensão de cisalhamento versus taxa de deformação para a solução polimérica (PEG4000 – 5000 ppm) sem e com Krebs.....	70

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

