

ANÁLISE NUMÉRICA DE ESCOAMENTOS COM BAIXOS NÚMEROS DE REYNOLDS PARA DISPOSITIVOS DE ASSISTÊNCIA VENTRICULAR

Guilherme Barbosa Lopes Júnior, ICTE/UFTM, lopesjunior.gb@gmail.com
Eduardo Guy Perpétuo Bock, IFSP, eduardo_bock@yahoo.com.br
Luben Cabezas Gómez, EESC/USP, cab35ezas@yahoo.com.br

Resumo

Os avanços científicos e tecnológicos no desenvolvimento de bombas de sangue têm sido impulsionados pela crescente importância que estes dispositivos vêm desempenhando no tratamento de pacientes cardiopatas e na ampliação da qualidade de vida das pessoas assistidas. Para aprimorar e otimizar o projeto e o desenvolvimento, ferramentas numéricas foram incorporadas na análise destes mecanismos e se tornaram imprescindíveis em seus avanços. O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento de escoamentos com baixo número de Reynolds de rotor, em uma faixa para a qual ainda não há consenso sobre o desenvolvimento completo ou não da turbulência em dispositivos de assistência ventricular (DAV). Para dar suporte às análises, simulações numéricas computacionais foram realizadas em diferentes cenários para uma mesma rotação do rotor. Foram empregadas três abordagens: uma laminar e duas turbulentas, aplicando os modelos $\kappa - \epsilon$ e $\kappa - \omega$, tradicionais. Os resultados entraram em concordância com a literatura, indicando também que a faixa de escoamentos transitórios, aplicada para tanques agitados, poderia incorporar o desenvolvimento turbulento para estes dispositivos para um número de Reynolds médio de 6469, indicando uma turbulência a baixos números de Reynolds, para os cenários testados.

Palavras chave: DAV, simulação numérica, turbulência, baixo Reynolds.

1. INTRODUÇÃO

Os avanços na medicina moderna têm buscado incorporar em seus tratamentos técnicas e procedimentos que visam não só a ampliação do tempo de vida dos pacientes, mas também uma melhoria em sua qualidade de vida. Inserido neste contexto, a bioengenharia tem acompanhado a medicina moderna, dando suporte tecnológico que permita alcançar melhorias e novos tratamentos para doenças crônicas, degenerativas e agudas que assolam a população, dentre elas as doenças cardíacas, as quais se destacam como algumas das doenças modernas de maior abrangência e impacto.

Nas últimas décadas, o número de pacientes com doenças cardiovasculares e o número de óbitos relacionados a elas, passaram a impulsionar o desenvolvimento de mecanismos de assistência cardíaca nos Estados Unidos da América (Hayward e Swartz, 2012), como forma de amenizar o quadro alarmante. Estes mecanismos podem, atualmente, serem classificados de acordo com seus usos, tipos de assistências e posicionamentos em relação ao corpo humano. De acordo com o posicionamento, por exemplo, eles podem ser: extracorpóreos, paracorpóreos ou implantáveis, de acordo com a finalidade (ou “ponte”) necessária.

La Franca *et al.* (2013) classificaram, de maneira generalizada, o tipo de mecanismo usualmente empregado de acordo com o tempo necessário para o tratamento da cardiopatia, conforme o quadro 01. Eles ainda classificaram as “pontes” em cinco categorias: ponte para transplante, ponte para recuperação, ponte para candidatura, ponte para outra ponte e ponte para terapia.

Quadro 01. Tipo de mecanismo de acordo com o tempo de tratamento. (adaptado de La Franca *et al.*, 2013)

Escala Temporal	Tipo de Mecanismo
Temporário (abaixo de 1 mês)	Extracorpóreo
Período curto	Sistema paracorpóreo mono ou bi ventricular
Pontes (até 1 ano)	Coração artificial total ou dispositivo de assistência ventricular implantável
Longos períodos (acima de 1 ano)	Dispositivo de assistência ventricular implantável

Independente do tipo de mecanismo, o custo de manutenção ainda é bastante elevado, devido a diversos fatores (Gelijns *et al.*, 1997), o que impulsiona ainda mais áreas como farmacologia e de desenvolvimento biomecânico, por exemplos, caracterizando um dos gargalos destes mecanismos, bem como o alto custo de implantação. Sendo assim, otimizar o processo de desenvolvimento e fabricação, bem como diminuir, mesmo que sutilmente, as taxas de hemólises ocasionadas (grande empecilho da manutenção dos aparelhos) tornam-se desafios atuais. Uma das tendências para se alcançar estes objetivos tem sido conciliar os métodos experimentais com análises numéricas, já presente nos processos registrados pela *Food and Drugs Administration* (FDA), órgão estadunidense responsável por fiscalizar pesquisas e regulamentação na área.

Neste contexto, a análise numérica foi realizada para o escoamento em um protótipo de dispositivo de assistência ventricular (DAV) proposto por Bock *et al.* (2011), disposto na figura 1.

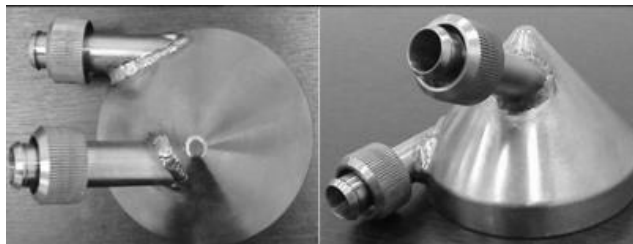


Figura 1. Imagens do protótipo estudado por Bock *et al.* (2011).

Em resumo, o protótipo conta com uma carcaça cilíndrica/cônica, com diâmetros de entrada e saída de 9,0mm, contendo um rotor helicoidal com quatro pás na base, de propulsão magnética, representando uma bomba centrífuga de entrada oblíqua. Os materiais abordados pelos autores foram titânio, polímero ABS e nylon, tendo sido selecionado para as análises de escoamento o titânio, cuja rugosidade se aproxima de outros materiais usados cirurgicamente, podendo estar entre 20,13 μm e 299,64 μm (Da Silva, 2006).

O presente trabalho, portanto, realiza análises numéricas para uma faixa de Reynolds consideravelmente baixa, verificando a afirmação gerada por Fraser *et al.* (2012) de que estaria havendo um escoamento turbulento a baixos números de Reynolds de rotor para sua faixa de trabalho (entre 18704 e 84717). Outra comparação realizada é com relação a faixa de Reynolds de rotor usualmente empregadas para tanques agitados, de forma a tentar fazer uma analogia aos valores estimados para o escoamento turbulento, cerca de 10000 (Holland e Bragg, 2002).

O número de Reynolds de rotor empregado aqui varia entre 412 próximo a entrada e 12527 na região das pás do rotor, para a rotação de 800rpm e tomando-se o diâmetro característico como a distância entre os extremos do rotor em um plano paralelo ao eixo do rotor. A equação 1 foi, então, aplicada para se alcançar estes valores.

$$Re_{rotor} = \frac{D^2 \cdot N}{\nu} \quad (1)$$

2. METODOLOGIA NUMÉRICA

As análises numéricas foram baseadas em um conjunto de 15 simulações, divididas em 05 cenários distintos, de acordo com a vazão empregada: 0,002 l/min (1), 0,508 l/min (2), 1,092 l/min (3), 1,518 l/min (4) e 1,614 l/min (5). Cada cenário foi testado para dois regimes de escoamento: laminar e turbulento, sendo este testado pelos modelos $\kappa - \epsilon$ e $\kappa - \omega$ tradicionais, comparando os resultados com a diferença de pressões entre entrada e saída, obtidas experimentalmente (Bock *et al.*, 2011) e cedidas para análise deste estudo.

As simulações, por sua vez, foram feitas com o auxílio do software Fluent[®] da Ansys[®], o qual utiliza o método dos volumes finitos em seus algoritmos. A malha computacional foi gerada pelo Meshing[®] da mesma companhia a partir do domínio fluido, destacado na Figura 2, obtido do protótipo em estudo.

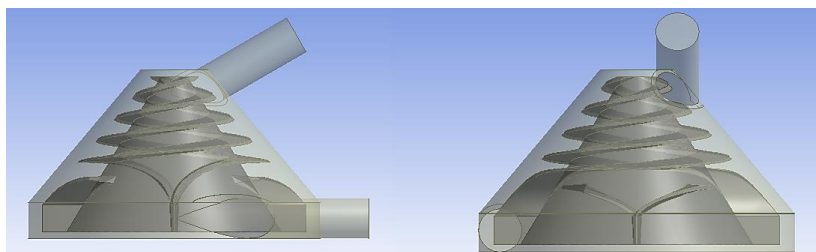


Figura 2. Domínio fluido e destaque do rotor para o protótipo simulado.

O método de resolução adotado foi o Método das Referências Múltiplas, também conhecido como rotor congelado, tendo sido, portanto, analisado apenas o regime permanente através do método semi-implícito para equações de pressões acopladas em sua versão consistente (SIMPLEC). O número de iterações adotado como limite foi de 5000, tendo convergido todas as simulações ao critério de $1,0 \cdot 10^{-3}$ para todos os residuais empregados: velocidades, continuidade e variáveis de turbulência (κ , ϵ e ω), quando aplicáveis; antes de atingir o número máximo de simulações.

Com relação ao fluido, o sangue foi tratado como Newtoniano, uma vez que as tensões aplicadas pelo DAV ao fluido são suficientes, bem como a escala espacial, para garantir tal comportamento, conforme relatado por Mazumbar

(2004) e Chandran *et al.* (2012). Assim, para a viscosidade dinâmica e a densidade foram adotados 0,004 Pa.s e 1059 kg/m³, respectivamente.

2.1. Malha computacional

A malha computacional foi gerada apenas para os domínios fluidos, através do Ansys® ICEM CFD®. Como já foi comentado no início deste item, foi feito uso do sistema de múltiplas referências, subdividindo o domínio fluido em dois subdomínios: um inercial e outro não inercial, para representar a rotação do rotor. Entre os dois subdomínios uma interface fluido-fluido é, então, gerada para que haja a transmissão de informações de um domínio para o outro, alterando o sistema de referências entre as células adjacentes.

Em cada subdomínio ainda foram especificados os coeficientes de suavização da malha e o método utilizado para a discretização do domínio foi o dimensionamento fixo por domínio. Para o não inercial, mais próximo ao rotor, o coeficiente de suavização foi de 1,15, limitando em 15% a taxa de crescimento de um elemento para o outro ao se afastar do rotor. Já no inercial, esta taxa foi limitada em 30%.

Além deste coeficiente, mais três coeficientes foram observados para tentar garantir uma qualidade satisfatória para a malha: razão de aspecto, coeficiente de assimetria e densidade de malha. A razão de aspecto média dos elementos foi de 1,91, com desvio padrão de 0,58, enquanto que os coeficientes de assimetria permaneceram próximos a 0,25, com desvio padrão de 0,15. Já a densidade de malha foi de 127,69 elementos/mm³ no subdomínio inercial e de 109,03 elementos/mm³ no subdomínio não inercial, totalizando em 6442830 de elementos em todo o domínio fluido.

Para analisar então uma distribuição destes elementos nos domínios fluidos, uma observação cautelosa da malha foi feita, em suma disposta na figura 3 e 4, nas quais, em uma visão geral, a malha atende, portanto, as necessidades para o estudo aqui proposto.

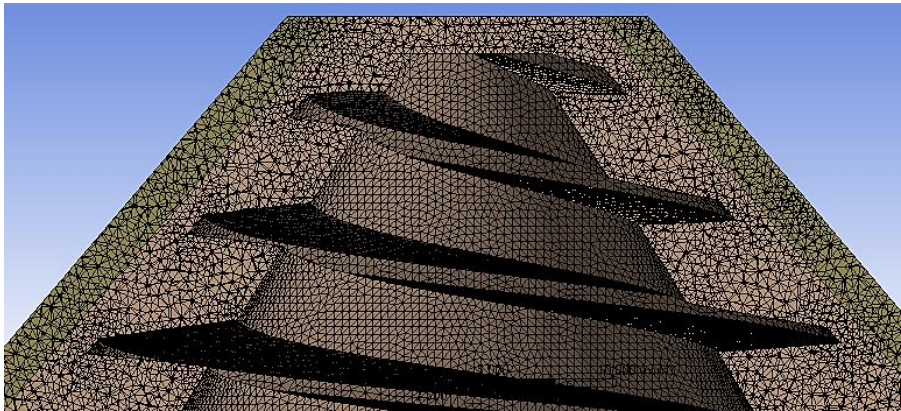


Figura 3. Distribuição dos elementos em um corte ortogonal ao eixo do rotor, destacando a região superior.

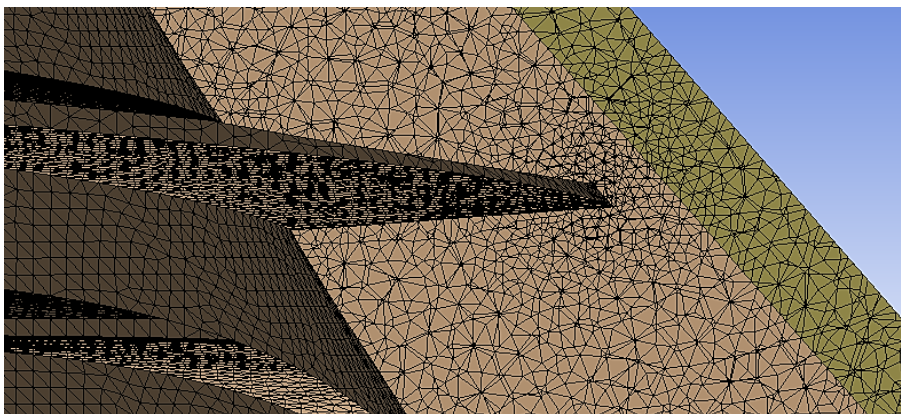


Figura 4. Detalhe dos elementos próximos a uma quina da região helicoidal do rotor.

Mesmo sem parâmetros de densidade de malha bem definidos e uma análise mais criteriosa, para o contexto destas análises, os demais parâmetros indicam certa qualidade para a malha, que contorna ao menos os problemas numéricos mais grosseiros, como fluxo numericamente induzido.

2.2. Modelagem do escoamento

A modelagem do escoamento é baseada na formulação integral, uma vez que o método dos volumes finitos é empregado pelo software. Assim, sabendo que \mathbf{F} representa os termos de geração e consumo:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \end{Bmatrix} dV + \int_S \begin{Bmatrix} \rho \vec{V} \\ \rho u \vec{V} \\ \rho v \vec{V} \\ \rho w \vec{V} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \end{Bmatrix} dA = \int_V \mathbf{F} dV \quad (2)$$

Onde $\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$ e τ representam as tensões viscosas dadas por:

$$\tau_{ji} = \mu \left[\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) - \delta_{ji} \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right] \quad (3)$$

Já a inserção dos modelos turbulentos é feita pelas equações para ambos os modelos, descritas pelas equações (4) e (5) para o modelo $\kappa - \epsilon$, que representam as equações adicionais a serem resolvidas para energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, respectivamente.

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{V}_i\kappa)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] - \rho\epsilon - \frac{\rho v'_i v'_j}{\sigma_\kappa} \frac{\partial(\bar{V}_i)}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{V}_i\epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} \frac{\rho v'_i v'_j}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial(\bar{V}_i)}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (5)$$

Onde, para o modelo padrão: $C_{1\epsilon} = 1,44$; $C_{2\epsilon} = 1,92$; $\sigma_\kappa = 1,0$; e $\sigma_\epsilon = 1,3$. Já a parcela da viscosidade turbulenta da hipótese de Boussinesq é dada pela equação (6).

$$\mu_t = 0,09 \cdot \rho \cdot \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (6)$$

Já para o modelo $\kappa - \omega$, são utilizadas as equações (7), (8) e (9) para a energia cinética turbulenta, para a taxa de específica de dissipação turbulenta e para a viscosidade turbulenta, respectivamente.

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{V}_i\kappa)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma^* \mu_t \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] - \rho\beta^* \omega \kappa - \frac{\rho v'_i v'_j}{\sigma_\kappa} \frac{\partial(\bar{V}_i)}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\bar{V}_i\omega)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma \mu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \rho\beta\omega^2 - \alpha \cdot \frac{\omega}{\kappa} \cdot \frac{\rho v'_i v'_j}{\sigma_\omega} \frac{\partial(\bar{V}_i)}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$\mu_t = \rho \cdot \frac{C_\mu}{B^*} \cdot \frac{\kappa}{\omega} \quad (9)$$

Onde, para o modelo $\kappa - \omega$ padrão: $\alpha = 5/9$; $\sigma^* = \sigma = 0,5$; $\beta = 3/40$; $e\beta^* = C_\mu = 0,09$. Alguns autores ainda apresentam valores diferentes para a parcela $\alpha^* = C_\mu/\beta^*$, divergindo do criador do modelo, conforme disposto em Wilcox (1994). O software, por exemplo, adota $\alpha^* = 1$, para números de Reynolds elevados, mas adapta este valor para baixos números de Reynolds pela equação (9), para $Re_t = \rho \cdot \kappa / \mu \cdot \omega$.

$$\alpha^* = \left(\frac{0,024 + Re_t/6}{1 + Re_t/6} \right) \quad (10)$$

2.3. Condições de contorno

As condições de contorno empregadas foram velocidade na entrada e *outflow* na saída. O Fluent extrapola as grandezas do domínio para a saída, aplicando condição de gradiente nulo para as variáveis e corrige o balanço de massa global, por isso a necessidade de se empregar com a velocidade de entrada. Devido à escolha do *outflow* como condição

de saída, ela foi distânciada em aproximadamente 10 vezes o diâmetro de saída a partir do rotor, para evitar problemas com escoamentos ainda não desenvolvidos nesta região.

A rotação empregada foi de 800 rpm e as condições de entrada para a resolução das equações turbulentas foram viscosidade turbulenta e intensidade turbulenta, calculadas pelas equações (6) e (8), as equações básicas baseadas na escala de comprimento de Komogorov e as relações básicas entre κ , ε e ω ($\omega_\infty = \varepsilon_\infty / \beta^* \kappa_\infty$), adotando $l = l_m = 0,07.L$, como uma boa prática sugerida por Ansys Inc. (2012).

As condições de parede empregadas, por fim, variam de acordo com o refinamento da malha na região, podendo ser aplicado um tratamento de parede, simulando a camada limite na região, ou, caso o refinamento não seja suficiente, as leis de parede são empregadas. Em geral, em torno de 50% das regiões de parede, sobretudo no rotor, as camadas limites são resolvidas numericamente sem o auxílio das funções de parede.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados globais são os dispostos na figura 5, comparando as diferenças de pressões para cada cenário simulado e os dados experimentais (Bock *et al.*, 2011).

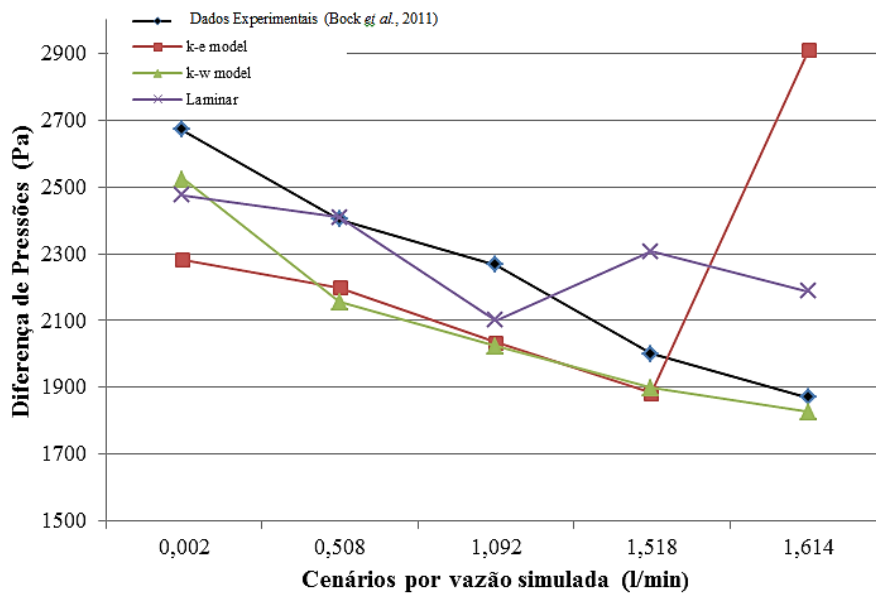


Figura 5. Resultados Globais das Simulações.

Observando apenas o gráfico acima, nota-se que o comportamento do modelo $k - \omega$ conseguiu seguir bem os dados experimentais. A variação percentual relativa para os modelos se mostraram satisfatórias, alcançando um máximo de 10,72% para o modelo $\kappa - \omega$, seguido de 17,18% para o regime laminar e 55,58% para o modelo $\kappa - \varepsilon$, em um ponto com comportamento não condizente aos demais para o mesmo modelo.

Entretanto, ao observar as distribuições de pressões e velocidades, nota-se que tanto o modelo $k - \omega$ quanto o regime laminar passam a apresentar resultados não condizentes com o esperado fisicamente para a situação. No entanto o $k - \varepsilon$, excluindo-se o ponto extraordinário, ao menos apresentou resultados mais coerentes com a situação física esperada, por exemplo, apresentando zonas de recirculação próxima às pás inferiores, conforme pode ser destacado na figura 6.

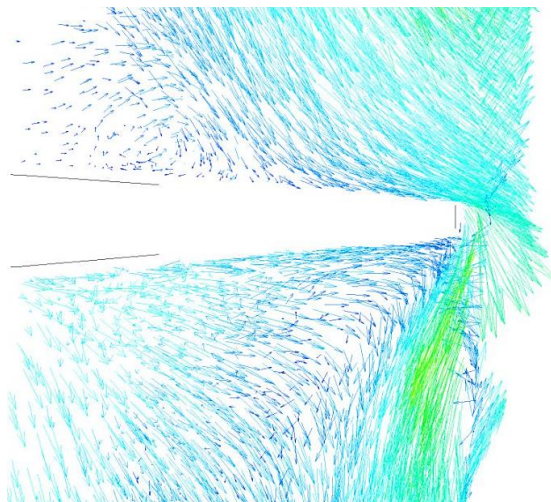


Figura 6. Vetores de velocidades próximos a uma das pás inferiores.

Ao analisar a figura 7, por exemplo, uma possível explicação pode ser dada sobre o comportamento global dos modelos, uma vez que todas as representações de pressões e velocidades seguem um padrão semelhante.

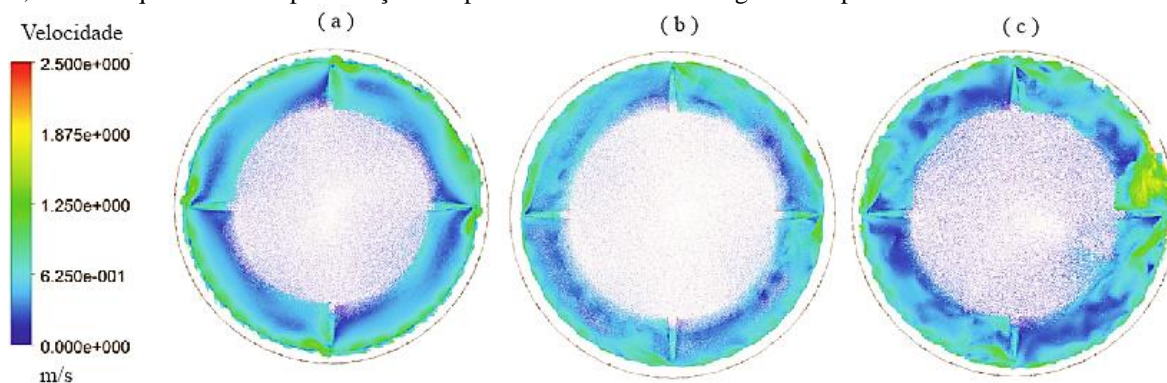


Figura 7. Velocidades na região inferior do rotor, para o segundo cenário: (a) $\kappa - \epsilon$; (b) $\kappa - \omega$; e (c) Laminar.

As possíveis causas podem ser variadas e as mais diversas, desde uma malha pouco refinada, que poderia estar causando o comportamento pouco representativo para o $k - \omega$, a problemas na passagem entre os dois subdomínios pela interface fluido-fluido para o regime laminar, uma vez que o divergente da velocidade nesta região, para o subdomínio inercial é bem elevado, forçando as instabilidades que não são usualmente captadas sem uma abordagem turbulenta.

4. COMENTÁRIOS FINAIS

Os modelos de turbulência foram mais representativos para as simulações geradas, seja pela análise do resultado global de diferenças de pressões, seja pela análise física dos campos de velocidade e pressões. Sendo assim, pode-se considerar que próximo aos 6500, o escoamento é provavelmente turbulento, mesmo a um baixo número de Reynolds de rotor, em concordância com a afirmação de Fraser *et al.* (2012). Este número de Reynolds, entretanto, localiza-se dentro da faixa transição para tanques agitados (entre 1000 e 10000), conforme disposto por Holland e Bragg (2002).

A malha computacional, assim, mostrou-se satisfatória, em vista da precisão obtida para as análises numéricas comparativas aqui empregadas. Entretanto, uma melhor estimativa para densidade de malha, bem como uma análise criteriosa da mesma, baseando na independência de malha nas simulações é essencial para a obtenção de resultados absolutos mais acurados.

Assim, apesar de as análises e simulações necessitarem de certo aprimoramento para se concluir qual dos modelos de turbulência é o mais adequado, como uma melhoria na malha computacional, bem como uma análise mais abrangente de outros modelos de turbulência, pode-se concluir que, mesmo para um baixo número de Reynolds de rotor, obteve-se uma boa representatividade das simulações em regime turbulento.

Tal conclusão reforça a necessidade de se obter faixas para o número de Reynolds de rotor para mecanismos de assistência cardíaca, uma vez que as faixas usuais de número de Reynolds, usadas por comparação de bombas

centrífugas com outras aplicações e tanques agitados, são inapropriadas para os estudos específicos de bombas de sangue, devido às dimensões, rotações e do fluido em si.

5. REFERÊNCIAS

- Anslys Inc., 2012, ANSYS FLUENT User's Guide.
- Bock, E., Antunes, P., Leao, T., Uebelhart, B., Fonseca, J., Leme, J., Utiyama, B., da Silva, C., Cavalheiro, A., Santos Filho, D., Dinkhuysen, J., Biscegli, J., Andrade, A., Arruda, C., 2011, Implantable Centrifugal Blood Pump With Dual Impeller and Double Pivot Bearing System: Electromechanical Actuator, Prototyping, and Anatomical Studies. *Artificial Organs*, 35(5), pg. 437-442, Wiley Periodics.
- Chandran, K.B., Rittgers, S.E., Yoganathan, A.P., 2012. *Biofluid Mechanics: the human circulation*. 2nd Edition, CRC.
- Da Silva, J.C., 2006, Estudo Comparativo de Superfícies de Titânio Utilizada em Implantes. Dissertação de Mestrado apresentada a Universidade Federal do Paraná.
- Fraser, K.H., Zhang, T., Taskin, M.R., Griffith, B. P., Wu, Z.J., 2012, A Quantitative Comparison of Mechanical Blood Damage Parameters in Rotary Ventricular Assist Devices: Shear Stress, Exposure Time and Hemolysis Index. *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 134.
- Gelijns, A.C., Richards, A.F., Williams, D.L., Oz, M.C., Oliveira, J., Moskowitz, A.J., 1997. Evolving Costs of Long-term Left Ventricular Assist Device Implantation. *The Society of Thoracic Surgeons*, 1997, 64:1312-9.
- Hayward, C. E Swartz, M., 2012, The evolution of Ventricular Assist Devices and the HeartWare® Ventricular Assist System. *European Cardiology Review*, 8(1):32-5. Disponível em: <http://www.radcliffecardiology.com/articles/evolution-ventricular-assist-devices-and-heartware-ventricular-assist-system>.
- Holland, F.A., Bragg, R., 2002, *Fluid Flow for Chemical Engineers*, 2ª Edição.
- La Franca, E., Iacona, R., Ajello, L., Sansone, A., Caruso, M., Assennato, P. 2013, Heart Failure and Mechanical Circulatory Assist Devices. *Global Journal of Health Science*, Volume 5, Nº5.
- Mazumdar, J.M., 2004, *Biofluid Mechanics*. World Scientific Publishing, ISBN 981-02-3801-0.
- Wilcox, D., 1994, *Turbulence Modeling for CFD*. ISBN 0-9636051-0-0, DCW, La Cañada, 477p..

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, que financiou o trabalho de doutorado que gerou o presente trabalho.

7. ABSTRACT

Advances in blood pumps development has been promoted by the relevance this devices have in heart diseases treatment and life quality improvements for patients. To improve and optimize these development processes, the analyses have incorporated numerical approaches, which have become indispensable. This work aimed to analyze low Reynolds flows in a Ventricular Assist Device (VAD), since there is no consensus about a Reynolds number limit for turbulence development. Supporting the analyses, scenarios for a same rotation velocity were set, and three flow approaches were applied: a laminar and two turbulent, applying the standard κ - ϵ and κ - ω . The results achieve agreed to other authors and indicated a range of application, for stirred tanks, could also indicates a turbulent development for the impeller Reynolds in VAD, concluding the existence of low Reynolds turbulent flow for these scenarios.

8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores e suas referências são os responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.