



A UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA CFD NO APRENDIZADO DE MÁQUINAS DE FLUXO

Eliana Ferreira Rodrigues – elianaf@em.ufop.br

Henor Artur de Souza – henor@em.ufop.br

Luiz Joaquim Cardoso Rocha - ljoaquim@em.ufop.br

Luiz Claudio Fialho Andrade – lcffa@hotmail.com

Guilherme Henrique de Alvarenga Araújo – gaa20@ymail.com

Grupo de Análise Numérica e Experimental em Fenômenos de Transporte

Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas.

Campus Universitário Morro do Cruzeiro

35.400-000 – Ouro Preto - MG

Resumo: A simulação do escoamento em uma bomba centrífuga é apresentada. As equações da conservação da massa e do momento da quantidade de movimento, juntamente com um modelo de turbulência de tensão de cisalhamento (SST) são resolvidas utilizando o software ANSYS-CFX. Os campos resultantes de velocidade e pressão da água são discutidos e associados com a teoria de máquinas de fluxo. Esta abordagem está também associada com os dados disponíveis na literatura, que é muito útil para os estudantes no entendimento de detalhes complexos, tais como os efeitos das variações de geometria e estrutura de turbulência dentro de um rotor da bomba, o que também é útil para a aprendizagem de anteprojeto e dimensionamento das bombas. Os resultados finais foram também comparados com os resultados experimentais obtidos pelos autores, fornecendo também uma visão sobre a validação de todo o processo.

Palavras-chave: Simulação numérica, Bomba centrífuga, CFX/ANSYS, Modelagem matemática, Aprendizado por meio do CFD.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento tridimensional no interior de uma bomba centrífuga é um fenômeno complexo que envolve aspectos tais como turbulência, escoamentos secundários, instabilidades, etc. Além disto, a geometria em questão é complexa e assimétrica, fazendo como que o movimento relativo do rotor introduza instabilidades entre o rotor e a voluta que comprometem o desempenho do equipamento, e também introduzem flutuações de pressão. Estas flutuações de pressão não influenciam somente no balanço da quantidade de movimento, mas também devem ser consideradas no projeto mecânico do sistema. Portanto é muito importante utilizar de ferramentas de anteprojeto tais como o CFD (*Computational Fluid Dynamics* ou Dinâmica de Fluido Computacional).

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) tem sido uma ferramenta muito útil na análise de escoamento em turbomáquinas, tanto do ponto de vista de predição de projeto quanto de desempenho. Algumas pesquisas foram realizadas (BLANCO et al. 2000, GONZÁLEZ et al., 2002, STICKLAND et al. 2000 e HEDI et al. 2010), mas porém pela complexidade da tarefa, estes estudos possuem muitas simplificações no

modelo, principalmente resultantes da geometria complexa e das características de escoamento.

O objetivo desta simulação numérica é conhecer a variação de pressão e da velocidade no interior de uma máquina de fluxo, o que permite analisar em que condições este equipamento está trabalhando, seu rendimento e sua vida útil.

As dificuldades habituais na simulação numérica de escoamento em bombas centrífugas resultam principalmente da correta representação da turbulência, do ponto de separação e da camada limite. Porém outros fatores particulares podem dificultar o problema tais como:

- Geometria complexa: um grande número de células deve ser utilizado, devido à assimetria, lembrando que, geralmente, malhas não estruturadas convergem mais rapidamente do que as estruturadas.

- A interface entre o rotor e voluta no modelo discretizado ou na simulação numérica é o fator que causa mais instabilidade no processo de solução do problema, pois uma parte do domínio é considerada fixa e a outra móvel. Isto significa que parte da malha ocupa posição diferente ao longo da simulação, e o software deverá ser capaz de solucionar esta instabilidade no intervalo de tempo simulado.

A Figura (1) ilustra os componentes básicos de uma bomba típica radial. A bomba utilizada é uma bomba de água comercial de baixa eficiência utilizada no laboratório de Hidráulica da UFOP.

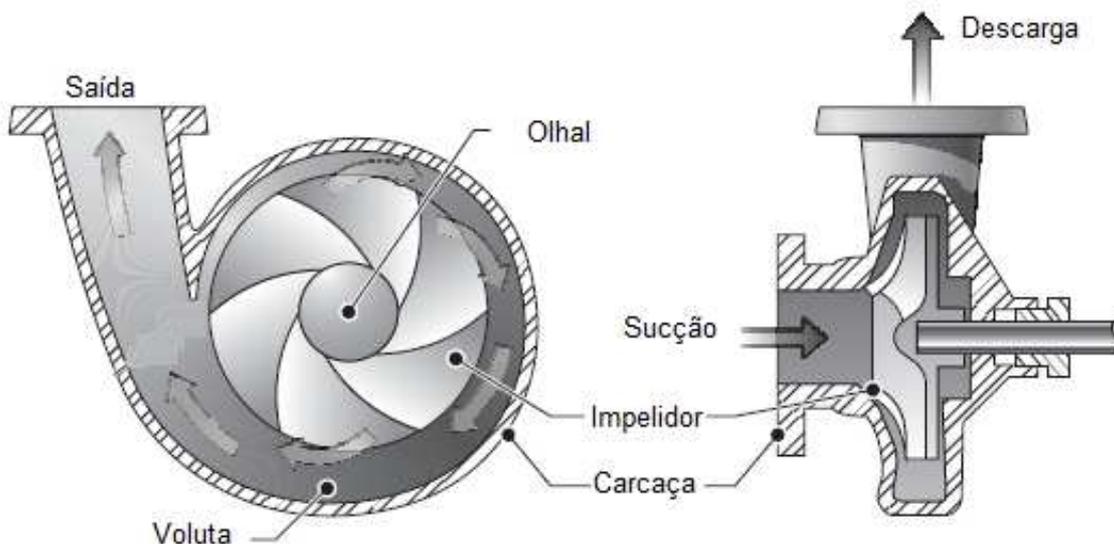


Figura 1 – Componentes de uma bomba centrífuga típica.

Neste estudo apresenta-se a seguir uma ferramenta para analisar e entender melhor o funcionamento de uma bomba centrífuga. O objetivo é encontrar uma metodologia numérica para análise de parâmetros dos fenômenos que ocorrem durante seu funcionamento, considerando uma geometria tridimensional com a interação rotor-voluta, por meio da utilização do software comercial CFX como nova ferramenta de aprendizado. Utilizando-se esta metodologia os alunos aprendem a fazer modelos, assimilam a teoria de Máquinas de Fluxo e aprendem os conceitos de projeto em conjunto com a utilização de pacotes computacionais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades desenvolvidas durante o estudo consistem em simular as condições de funcionamento da bomba do laboratório de hidráulica. Para tanto, o trabalho é dividido em uma parte experimental e a outra de metodologia numérica.

2.1. Metodologia Experimental

Para realizar a prática foi utilizada montagem do laboratório de Hidráulica/UFOP conforme Figura (2) e com os seguintes componentes:

1. Bomba centrífuga;
2. Placa de orifício;
3. Manômetro;
4. Inversor de frequência.

Utiliza-se um inversor de frequência para variar a rotação da bomba centrífuga com o intuito de se obter uma variação de pressão e da vazão do sistema. O manômetro instalado na saída da bomba fornece a pressão de recalque e a placa de orifício permite conhecer a vazão bombeada conforme ilustra a Figura (2).



Figura 2 – Esquema da montagem experimental.

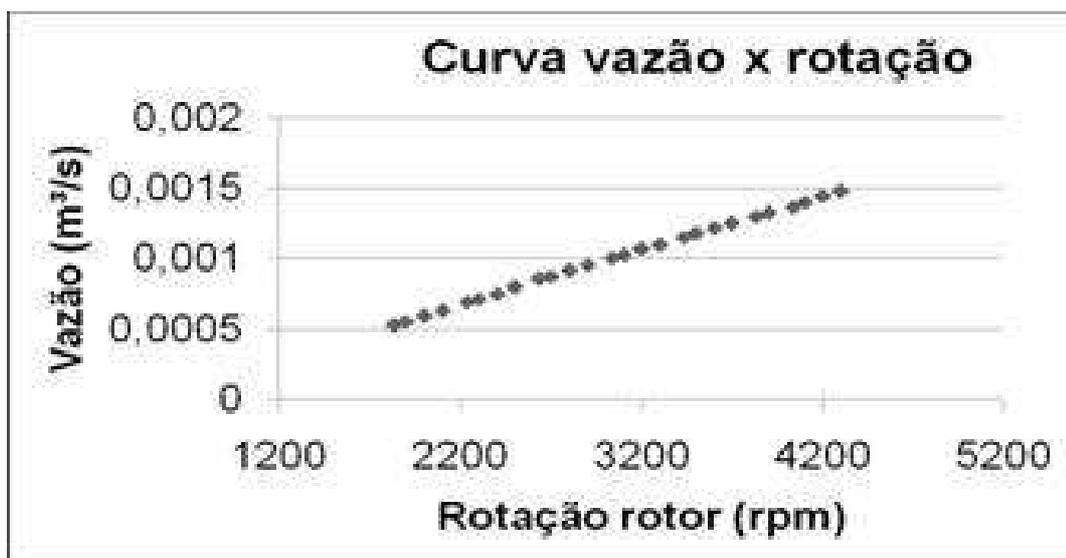
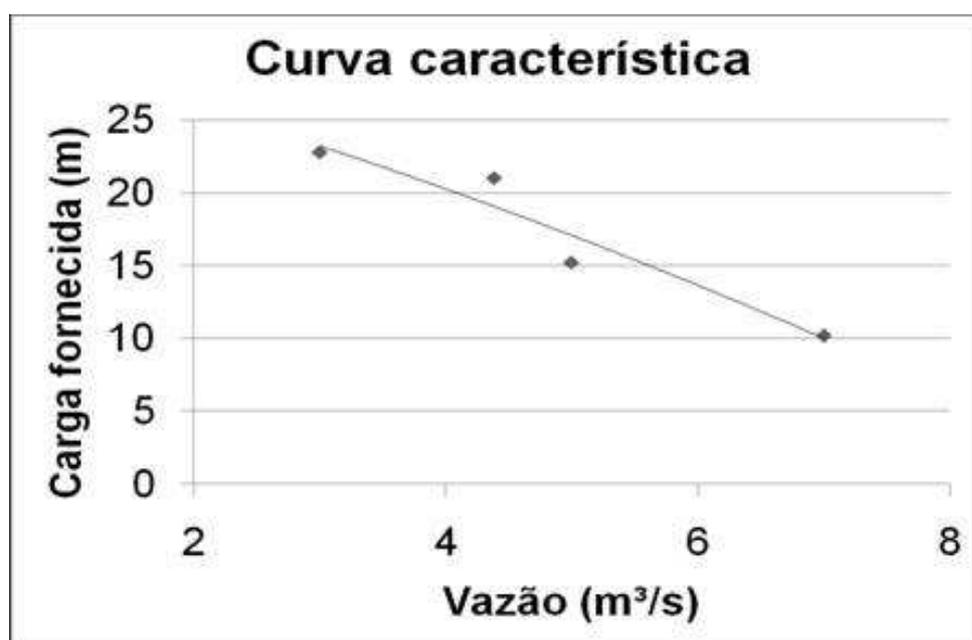


Os resultados experimentais estão na Tabela (1), onde estão relacionadas às rotações medidas e as respectivas vazões. Para obter dados mais confiáveis cada rotação foi ensaiada duas vezes e os dados contidos na tabela são as médias aritméticas dos dados medidos.

Tabela 1 : Rotação (rpm) em que os testes foram efetuados.

Rotação (RPM)	Q (m ³ /s)	Rotação (RPM)	Q (m ³ /s)
1835	0,000528142	3200	0,001069489
2235	0,000690207	3100	0,001029141
2635	0,000852939	2900	0,000952236
3035	0,001002392	2800	0,000916313
3435	0,001158208	2700	0,000876411
3835	0,001302761	2500	0,000796364
4035	0,001371911	2400	0,000750278
4200	0,00144568	2300	0,000713813
4300	0,001478155	2100	0,000627772
4100	0,001404454	3300	0,001104592
3900	0,001326773	3200	0,001069489
3700	0,001251594	3100	0,001029141
3600	0,001216931	2900	0,000952236
3500	0,001177467	2000	0,000591443
3300	0,001104592	1900	0,000552792

Os dados medidos durante os ensaios, conforme tabela 1, também é mostrado no gráfico de vazão versus rotação da Figura (3) e a curva característica de carga versus vazão foi efetuada e está ilustrada na Figura (4).

Figura 3 - Curva vazão (m^3/s) x rotação (RPM)Figura 4 - Curva característica de bomba centrífuga carga (m) versus vazão (m^3/s).

A Figura (5) ilustra o modelo de rotor utilizado e o conjunto rotor – voluta discretizado para realização das simulações.

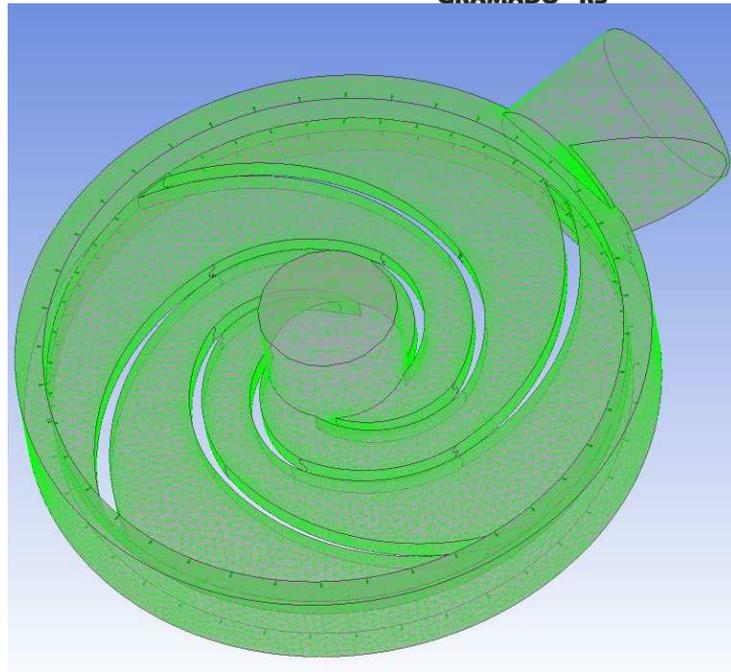


Figura 5 – a) Modelo físico do rotor da bomba centrífuga, b) Rotor e voluta da bomba discretizada.

2.2. Equações governantes:

As equações que descrevem os fenômenos que ocorrem no escoamento no interior da bomba são a equação da conservação da massa, a equação do momento da quantidade de movimento juntamente com a equação do modelo de turbulência. A equação do momento da quantidade de movimento para um volume de controle inercial é dada por:

$$\vec{r} \times \vec{F}_s + \int_{V_c} \vec{r} \times \vec{B} dV + \vec{T}_{eixo} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \vec{r} \times \vec{V} \rho dV + \int_{V_c} \vec{r} \times \vec{V} \rho \vec{V} dV \quad (1)$$

onde T é o torque gerado por uma força F a uma distancia radial r , F_s é a força de superfície e $r \times B$ a força de campo.

Para analisar as reações de torque se escolhe um volume de controle fixo envolvendo o elemento de fluido em rotação, junto com o rotor. O rotor está girando com uma velocidade angular constante (ω).

Considerando as velocidades tangenciais atuando no rotor: $U = \omega r$ ou

$$U = \frac{\pi D n}{60} \quad (2)$$

Onde

U velocidade periférica ou tangencial do rotor, (m/s)

ω velocidade angular do rotor (rad/s)

D, r Diâmetro e raio do rotor respectivamente (m)

n rotação do rotor (RPM)

As considerações efetuadas no modelo são: escoamento incompressível tridimensional, regime permanente; temperatura constante do fluido; e modelo de turbulência SST – Shear Stress Transport.

A bomba utilizada na simulação é uma bomba centrífuga comercial de pequeno porte disponível no Laboratório de Hidráulica/UFOP.

Condições de contorno:

Como parâmetros de entrada foram considerados a rotação do rotor e a vazão. Adota-se a condição de não deslizamento nas superfícies do rotor e voluta. O fluido utilizado é a água à temperatura ambiente. A interface rotor-voluta considerada foi *frozen rotor*.

2.3 Simulação Numérica

O software comercial ANSYS/CFX é utilizado para realizar a simulação numérica. Esta análise permite conhecer os campos de velocidade e pressão no interior da máquina de fluxo do fluido em escoamento. As técnicas numéricas dos pacotes comerciais consistem basicamente nos seguintes passos:

- 1) Definição do problema e conceitos físicos e hipóteses de simplificações;
- 2) Pré-processamento: onde é confeccionado o modelo, criação da malha e entrada de dados e propriedades dos fluidos;
- 3) Solver: as equações diferenciais são resolvidas por meio de métodos numéricos. Estabelece critérios de convergências, coeficientes de relaxação, etc.
- 4) Pós-processamento: onde é realizada a análise de resultados, os campos de pressão velocidade, etc.

Para o modelo ilustrado na Figura (5), que representa o conjunto rotor-voluta utilizado, a discretização da malha é composta por 282.329 elementos no rotor e 163.309 elementos tetraédricos na voluta. Foram realizados quatro estudos com dados retirados do experimento prático em laboratório, estes dados representam a variação da vazão da montagem (bomba e sistema) com a variação da rotação do rotor.

Os dados obtidos em laboratório serviram para validar a metodologia adotada quanto à coerência com o desempenho do equipamento. Isso foi realizado comparando-se o resultado experimental com o resultado do mesmo quando simulado numericamente (Tabela 2).

Tabela 2 - Dados simulados numericamente para uma rotação de 3600RPM.

Casos	Vazão (m ³ /h)
1	3
2	4
3	4,38
4	5
5	7

Os dados obtidos das simulações numéricas foram as componentes do vetor velocidade e o perfil de pressão no interior do rotor/voluta. Neste trabalho apresenta-se os resultados para uma vazão de 1,22 kg/s (caso 3 da Tabela 2).

3. RESULTADOS

Os resultados da simulação numérica são mostrados nas Figuras (6 a 8). A Figura (6) mostra a vista frontal (plano x-y) do perfil de pressão ao longo do rotor e voluta da bomba. Percebe-se que a pressão não está distribuída de modo uniforme ao longo do raio do rotor, na região próxima a saída da voluta e próxima a saída do rotor a pressão é menor, no entanto quando se trata apenas da saída do rotor a pressão é maior. Quanto à entrada do fluido no rotor uma região apresenta maior concentração do escoamento, ocorrendo nesta porção maior velocidade e, portanto, menor pressão estática (faixa azul). Na Figura (6) a região de menor pressão logo após a entrada do rotor, citada acima, combina com a região de maior velocidade, o que respeita as leis da dinâmica de fluidos, menor pressão, maior velocidade.

Pode ser visto que há uma região de depressão próxima à região de entrada, devido à mudança da direção do escoamento que deixa de ser axial para se tornar radial, que neste caso é justificado pela baixa eficiência da bomba. Pode-se observar o aumento radial da pressão, apresentando apenas uma diminuição no canal saída no sentido horário da rotação, de repente, aumentando quando o canal concide com a borda. Essas diferenças são maiores para as limites inferiores e superiores de vazões, já previsto no trabalho de STICKAND et al, 2000.

Do ponto de vista de projeto, a distribuição do vetor velocidade interna é muito importante para a análise da distribuição ao longo da curvatura das pás e a eficiência do equipamento vide Figura (7). No entanto, quando há separação no fluxo desenvolvido do bordo de ataque devido às condições não tangenciais do fluxo na entrada do rotor, haverá formações de vórtices que podem ser observados. A recirculação será forte do centro da passagem do rotor em direção radial. Além do bloqueio da passagem do fluxo na região da borda. Neste caso, o efeito de rotação também é um fator importante a ser considerado, pois a pressão aumenta gradualmente ao longo das linhas de corrente como ilustrado na figura 6.

A Figura (8) representa as linhas de corrente no rotor–voluta para o caso de rotação a 3600 RPM e vazão mássica 1,22 kg/s. Percebe-se que existe uma região com maior concentração do fluido e também com maior velocidade, conclui-se que o fluido não escoou de forma uniforme em todas as regiões do rotor.

À medida que o escoamento que entra no olhal do rotor é desviado para a passagem das pás. Devido ao efeito instável desenvolvido no bordo de ataque das pás a entrada do escoamento na passagem não é mais tangencial e sim radial. Parte do escoamento não consegue seguir o sentido radial e há um refluxo que pode ser visto na Figura (8). Esta separação do escoamento geralmente leva a uma perda de energia na bomba e é muito comum em bomba de baixa eficiência.

O uso dos resultados obtidos em laboratório foi útil para verificar a validade dos resultados encontrados no método numérico, para tanto foi calculado a velocidade periférica teórica, fornecida pela equação (2). O escoamento foi simulado utilizando rotação e vazão medidas, conforme ilustrado na Tabela 1. Verificou-se que os dados simulados e os calculados foram próximos.

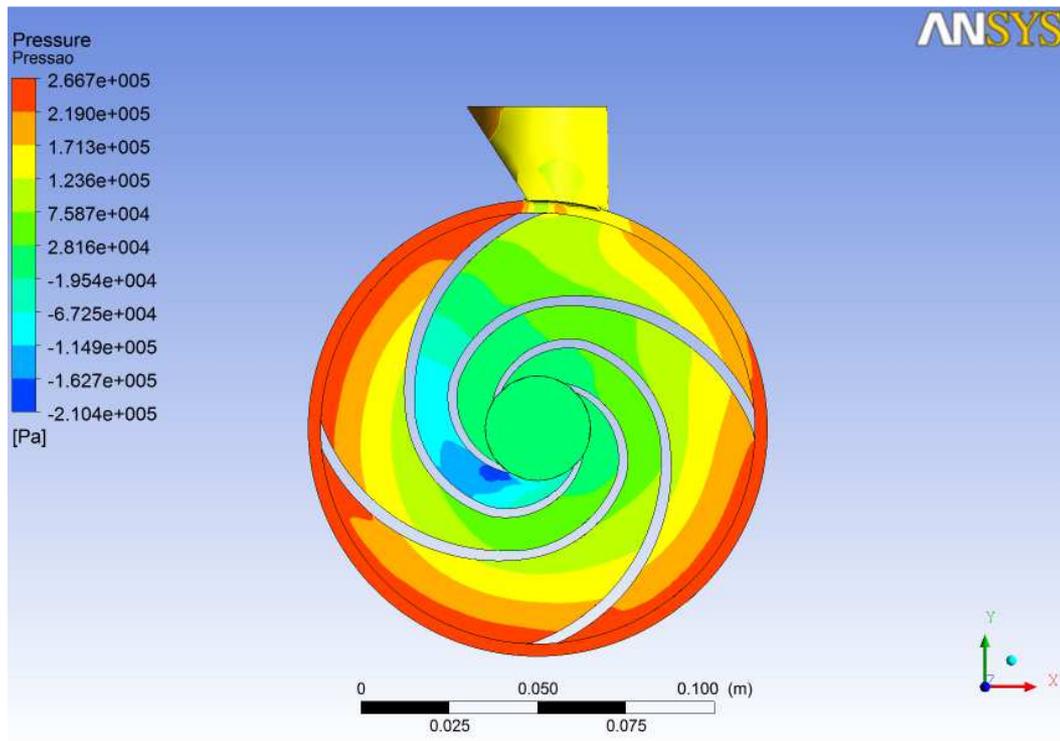


Figura 6 – Campo de pressão no rotor e voluta.

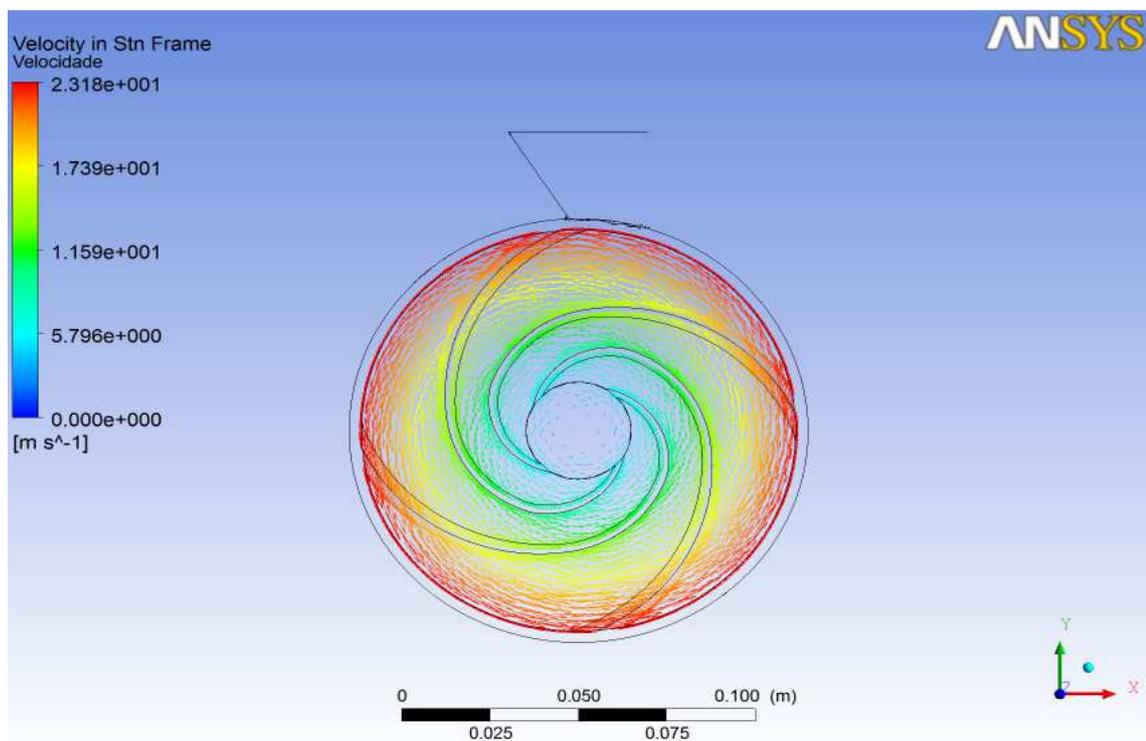


Figura 7 – Velocidade periférica – condições: 3600 RPM e vazão: 1,22 Kg/s.

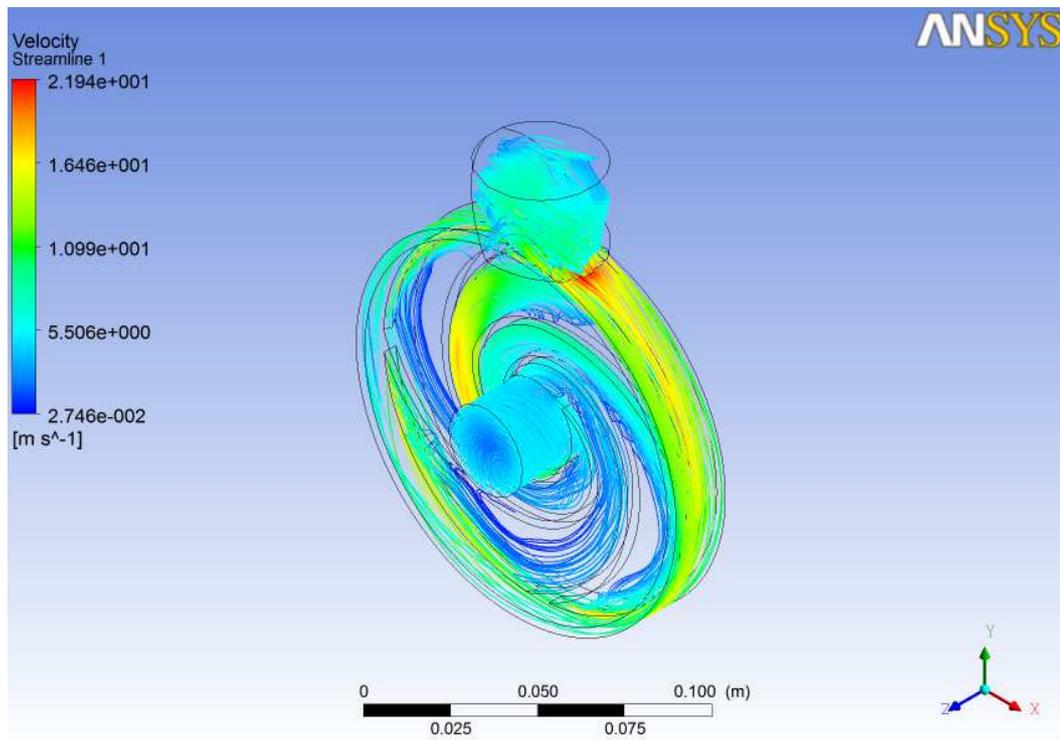


Figura 8 – Linhas de corrente na vista isométrica para uma rotação 3600 RPM e vazão de 1,22 Kg/s.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia estabelecida é muito útil para os estudantes no entendimento de fenômenos tão complexos do escoamento no interior de uma bomba centrífuga, tais como os efeitos das variações de geometria e a estrutura de turbulência dentro de um rotor e voluta, o que também é útil para a aprendizagem de anteprojeto e dimensionamento das bombas. Os resultados finais foram também comparados com os resultados experimentais fornecendo também uma visão sobre a validação de todo o processo. Os resultados apresentados mostram que esta metodologia pode ser utilizada para novos projetos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG e à Fundação Gorceix – FG pelo apoio financeiro. Ao Professor Gilberto Queiroz da Silva por permitir a realização dos experimentos no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da UFOP.

O Grupo de Análise Numérica e Experimental em Fenômenos de Transporte agradece à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP pelo suporte e apoio financeiro.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLANCO-MARIGORTA, E; FERNÁNDEZ-FRANCOS, J; GONNzáLEZ-PÉREZ, J; SANTOLARIA-MORROS, C. Numerical flow simulation in a centrifugal pump with impeller-volute interaction. Proceedings of ASME FEDSM'00, ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting June 11-15, 2000, Boston, Massachusetts.

GONZÁLEZ J., FERNANÁNDEZ, J., BLANCO E., e SANTOLARIA-MORROS C., Numerical simulation of the dynamic effects due to impeller-volute interaction in a centrifugal pump. Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, vol. 124, June, 2002, p.348-355.

HEDI I., HATEM K., e RIDHA Z. Numerical flow simulation in a centrifugal pump. Proceeding International Renewable Energy Congress, November 5-7, 2010, Sousse, Tunisia p.300-304.

STICKLAND, M.T., SCANLON, T.J., BLANCO M, R., FERNANDEZ F, J., GONZALES P, J. e SANTOLARIA M, C. 2000. *Numerical flow simulation in a centrifugal pump with impeller-volute interaction*, ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting.

THE USE OF CFD TECHNIQUES AS A TEACHING TOOL IN THE STUDY OF FLUID MACHINES

Abstract: *The simulation of the fluid flow inside the rotor of a centrifugal pump is presented. The continuity and the moment of momentum conservation equations, together with a turbulence shear stress model (SST) are solved using ANSYS-CFX software. The resulting water pressure and velocity fields are discussed an association with flow machinery theory. This approach is associated with data available in the literature which is most helpful for students to understand complex details such as the effects of geometry variations and turbulence structure inside a pump rotor. This is also helpful in the learning of project design and sizing of pumps. The final results have also been compared with experimental results obtained by the authors, also providing an insight into the validation of the whole process.*

Key-words: *Fluid-Machinery teaching, CFD, water pump, experimental testing.*