

## Avaliação da Distribuição de Velocidades em Uma Bomba Centrífuga Radial Utilizando Técnicas de CFD

Elisa Zampar Cipolla, Fernando das Graças Braga da Silva, Geraldo Lúcio Tiago Filho, Regina Mambeli Barros

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Instituto de Recursos Naturais – IRN

elisazc@yahoo.com.br, ffbraga.silva@gmail.com, tiago@unifei.edu.br, mambeli@unifei.edu.br

Recebido: 30/01/10 - revisado: 08/06/10 - aceito: 28/06/11

### RESUMO

A elaboração do projeto de uma bomba para a construção da mesma envolve um alto custo e longo tempo para alcançar o produto final de alto rendimento. Tecnologias de simulação computacional, como o softwares de Fluidodinâmica Computacional (CFD), é uma forma eficaz de se estudar o comportamento de uma bomba hidráulica, pois fornece um quadro completo do seu funcionamento, permitindo a correção e melhoria do projeto, antes mesmo de o protótipo ser construído. O presente trabalho tem como objetivo validar, através de ensaio experimental, o modelo computacional, criado através do programa de CFD, o comportamento de uma bomba centrífuga através do campo de velocidades. Verificou-se que, os resultados obtidos na simulação física e na virtual foram muito próximos, com diferença média de 5%, comprovando a eficiência da ferramenta CFD para estudos de comportamento hidráulicos, o que contribui com o desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos e processos a um baixo custo e um tempo reduzido.

Palavras-chaves: dinâmica dos fluidos computacional, bomba centrífuga, CFD.

### INTRODUÇÃO

Bombas Hidráulicas são máquinas operatrizes que adicionam energia aos líquidos, tomando energia mecânica de um eixo e a transformando em energia potencial. As formas de transmissão de energia podem ser: aumento da carga de pressão, aumento de velocidade ou aumento de elevação – ou qualquer combinação destas formas de energia.

Conduzir fluidos com máximo rendimento é considerado requisito de grande importância em indústrias, saneamento, irrigação, e em outras diversas áreas que utilizam bombas hidráulicas, já que diminuem os custos com a implantação do sistema de bombeamento, assim como a sua manutenção e os gastos com energia. Para isso, são feitos experimentos em laboratório com a finalidade de estudar o comportamento de uma bomba hidráulica, assim como o seu desempenho.

As simulações numéricas são muito importantes pois eles têm um enorme potencial para prever o desempenho dos equipamentos e processos antes da sua produção e implementação, assim como permitir a redução do tempo de desenvolvimento do projeto de uma empresa, entretanto para confiabilidade dos resultados os ensaios experimentais

são fundamentais para a validação dos modelos testados

Uma forma mais eficaz para estudar o desempenho da bomba é através do CFD, Computational Fluid Dynamics ou Dinâmica de Fluido Computacional.

A tecnologia de CFD (Computational Fluid Dynamic) se tornou uma parte fundamental no projeto e análise de produtos e processos de muitas empresas, devido a sua habilidade de prever o desempenho destes equipamentos e processos antes mesmo de serem produzidos ou implementados e ao baixo custo envolvido na simulação. A simulação numérica realizada através de CFD emprega um esquema numérico baseado em discretização por Volumes Finitos. Nos escoamentos de fluidos, o modelo matemático é estabelecido com base nas equações de conservação da quantidade de movimento, da massa e da energia. Algumas das principais aplicações são: aeroespacial, automotiva, turbomáquinas, petróleo e naval.

A Simulação CFD de uma bomba fornece um quadro completo do seu funcionamento e permite aos engenheiros identificar áreas onde há recirculação, deslocamento de fluxo ou onde a cavitação irá ocorrer. Com tal ferramenta, o engenheiro pode determinar as causas do comportamento e implementar melhorias no projeto de uma bomba

hidráulica otimizando um projeto antes mesmo de o protótipo ser construído.

O CFD depende da solução numérica das equações de Navier-Stokes, que descrevem fluxo do fluido. Os computadores realizam milhões de cálculos necessários para a solução dessas equações, simulando a interação de fluidos com superfícies complexas utilizadas na engenharia. Em um modelo da dinâmica dos fluidos computacional, a superfície complexa de interesse é subdividida em um grande número de células que formam a rede ou malha. Em cada uma destas células, o PDEs pode ser reescrito como equações algébricas que relacionam a velocidade, pressão, temperatura, etc. O conjunto de equações resultantes pode então ser resolvido iterativamente, resultando em uma descrição completa do fluxo ao longo de todo o domínio.

Atualmente, existem vários softwares comerciais que utilizam a metodologia da CFD, tais como PHOENICS CFX®, STAR-CD®, FLUENT®, FLOW-3D® e o ANSYS CFX®. Este último foi escolhido para a elaboração deste trabalho, por ter sido disponibilizado pelo fabricante da bomba em estudo. O software CFD é uma ferramenta valiosa para auxílio na validação dos modelos computacionais, podendo criar um laboratório virtual, com grande confiabilidade dos resultados obtidos através da simulação, assim como a distribuição da velocidade e pressão, além da possibilidade de visualização do comportamento hidráulico do fluido no interior das tubulações, máquinas de fluxo, etc. A ferramenta de CFD contribui com o desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamento e produtos. Além disso, o software apresenta um pacote robusto e completo de solução, desde a definição do problema, resolução, análise e apresentação dos resultados. Detectou-se poucos trabalhos sobre o assunto na literatura acadêmica sendo muitas aplicações feitas por empresas da área de máquinas hidráulicas. Pode-se destacar um trabalho clássico básico na área de simulação hidrodinâmica computacional de Maliska (2004), e alguns trabalhos atuais tais como: (ANSYS, 2004), Dupont (2006), ANSYS (2006), Dorsch e Keeran (2007).

## OBJETIVO

O presente trabalho propõe estudar o comportamento hidráulico de uma bomba centrífuga, utilizando-se o recurso da dinâmica de fluido computacional (CFD) a partir da análise do perfil de

velocidades, bem como validar os resultados obtidos computacionalmente.

## METODOLOGIA

### Etapas do software CFD

A figura 1 ilustra as principais etapas para uso do software de CFD.

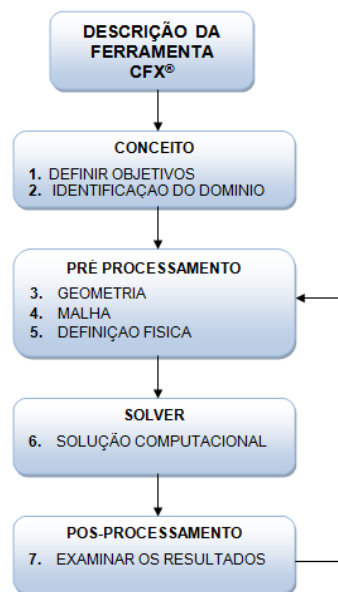


Figura 1 - Descrição da ferramenta CFD.

A dinâmica dos fluidos computacional se baseia em algoritmos numéricos que lidam com escoamento de fluidos. Com isso, todos os programas que a utilizam, por exemplo, o software CFD em estudo, possuem uma interface com o usuário muito sofisticada, tanto para inserção dos parâmetros de entrada quanto para a análise de resultados.

O CFD é um programa de simulação numérica composto por basicamente três etapas: pré-processador, solver, ou processador, e pós-processador. A seguir serão detalhadas as etapas do software CFD, bem como um conceito do mesmo.

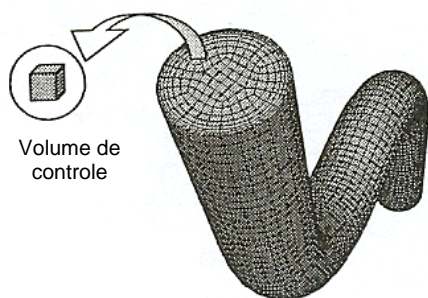
### a) Conceito

O software de CFD fornece poderosa tecnologia de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para simulações de todos os níveis de complexidade, como a simulação do comportamento de sistemas

envolvendo o escoamento de fluidos e transferência de calor, entre outros processos físicos, permitindo a solução das equações do escoamento sobre uma região de interesse, para condições de contorno específicas da região.

As equações da conservação da quantidade de movimento, conservação da massa e da energia, são discretizadas e resolvidas iterativamente para cada volume de controle. Como resultado, uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos dentro do domínio é obtida (ANSYS, 2009).

Para realizar as simulações foram utilizados técnicas numéricas que abrangem o método dos elementos finitos, método das diferenças finitas e, principalmente, o método dos volumes finitos para a solução das Equações inerentes do processo. O último método, que é utilizado pelo CFD, baseia-se na discretização numérica da região do fluido em um conjunto finito de pequenas sub-regiões, chamadas de volumes de controle, ilustrado pela figura 2.



**Figura 2 - Demonstração da discretização de uma região de interesse.**

Este software é composto de quatro módulos, que são ativados no processo de solução de um problema utilizando a metodologia da CFD. O primeiro módulo permite a geração ou a importação da malha e especificação da geometria. O segundo é o pré-processamento, cuja função é detalhar o tipo de escoamento a ser analisado, verificar as condições de contorno, fornecer valores iniciais e parametrizar o problema para o uso do solver. O terceiro módulo vai ativar o solver que, usando as condições específicas no pré-processamento, irá obter a solução do problema. O quarto módulo ativo, o pós-processamento, tem como características principais ferramentas gráficas de última geração para a visualização tridimensional dos resultados, definição das

variáveis pelo usuário, geração de objetos gráficos, nos quais visibilidade, transparência e suavização podem ser controladas.

O pré-processador trabalha com diferentes formatos de malhas, permitindo que geometrias complexas sejam modeladas com a malha apropriada. Na etapa da construção da geometria, os usuários podem utilizar os modelos do pacote do programa, bem como criar e/ou modificar modelos CAD no ambiente de modelagem de sólidos. Esse programa encontra maneiras de melhorar as características de componentes já implementados, criando modificações no projeto que podem ser testadas pela mudança da geometria do modelo e realizar as simulações para verificar os efeitos das mudanças.

O processo de simulação através da ferramenta CFD, detalhando cada etapa, é descrito a seguir.

## **b) Pré-processamento**

No primeiro estágio do pré-processamento será criada a geometria do sólido a ser modelado. A geometria pode ser criada por qualquer ferramenta CAD e o resultado importado para o pré-processador. A partir da geometria, definem-se o fluxo do fluido, regiões sólidas e nomeiam-se as respectivas superfícies. Após a definição e classificação da geometria, gera-se a malha, cujo refinamento está diretamente relacionado com a precisão dos resultados apresentados pela simulação, ou seja, quanto mais refinada a malha, mais preciso será o resultado obtido.

A seqüência do pré-processamento é:

### **b.1) Geometria**

Nesta etapa é usado um módulo do software que é uma ferramenta especializada para o rápido desenho de componentes rotativos de máquinas em 3D. Incorporando um conhecimento extenso em turbomáquinas em um ambiente gráfico, o software pode auxiliar no desenvolvimento de componentes, como lâmina axial, radial e fluxo misto, em aplicações como bombas, compressores, ventiladores, sopradores, turbinas, expansores, turbocompressores, indutores e outros.

A ferramenta de dimensionamento inicial utilizada é o “Vista CPD para bombas centrífugas”, que através de dados iniciais de saída - fluxo de massa, a razão de pressão, etc. - e restrições geométricas, irá configurar a geometria da lâmina, os parâmetros de desempenho dimensional - velocidade específica, vazão específica, etc., que permite ao usuário construir uma voluta e um rotor baseada em uma bomba

já construída. Neste utilizou-se esta ferramenta apenas para a construção de um rotor inicial.

Os principais dados de entrada fornecidos no VISTA – CPD são:

- Carga de pressão = 54,5 mH<sub>2</sub>O;
- Vazão = 61,5 m<sup>3</sup>/s;
- Rotação = 3500 rpm;
- Características do fluido bombeado:
  - Densidade = 1000 kg/m<sup>3</sup>;
  - Viscosidade = 1.10-6 m<sup>2</sup>/s.

## b.2) Malha

Malha numérica é discretização do domínio de interesse através dos nós, onde serão calculadas as variáveis para a simulação do escoamento. A geração de malhas pode ser de dois tipos: estruturada (regular), estruturada por blocos e não-estruturada.

Malhas não-estruturadas são utilizadas para configurações complexas e são discretizadas pelo método de elementos finitos ou volumes finitos. As malhas não estruturadas são cada vez mais utilizadas na modelagem de problemas de fenômenos de transporte, devido a sua flexibilidade na discretização de geometrias complexas. Em geral, os elementos que compõem esse tipo de malhas são: piramidal, prismático e tetraédrico.

Após a construção da bomba, a mesma é importada a ferramenta de criação de malhas. Para isso, é necessária a criação de regiões do fluido, regiões sólidas e superfícies com os seus respectivos nomes. Estas superfícies são importantes porque são usadas como referência para uma próxima etapa da modelagem.

Em ambas as figuras são apresentadas regiões de superfície e de sólido, sendo a primeira a seleção da superfície de cada região (região 2D) e a segunda, a seleção do sólido (região 3D).

As interfaces são as áreas de transição entre duas regiões distintas, nomeadas para a entrada e saída do fluido. A região de sólido da interface são todas as interfaces juntas.

Para gerar a malha, inicialmente deve-se configurar a mesma, realizando a setagem do número de elementos da malha da superfície de interesse. Quanto mais refinada a malha, melhores serão os resultados, porém, maior será o esforço computacional. Por esse motivo, deve-se encontrar o nível de refinamento que ofereça dados confiáveis com um tempo de simulação computacional coerente.

Para cada domínio foram definidos os comprimentos máximos e mínimos das arestas dos ele-

mentos a serem formados, os quais definem a malha a ser gerada. O mesmo foi feito para o corpo e superfície padrão, que é a configuração do volume e da superfície da bomba que não foram definidas nos domínios. Além disso, é configurada a espessura máxima dos elementos a serem gerados.

Por fim, gera-se a malha (figura 4) a partir do sólido. A malha gerada totalizou 1.140.237 elementos, assim como é informado na figura 3. Os detalhes são visualizados também na figura 4.

| Mesh statistics            |         |
|----------------------------|---------|
| Total number of nodes      | 299618  |
| Total number of tetrahedra | 899101  |
| Total number of pyramids   | 7085    |
| Total number of prisms     | 234051  |
| Total number of elements   | 1140237 |

Figura 3 - Informações da malha gerada.

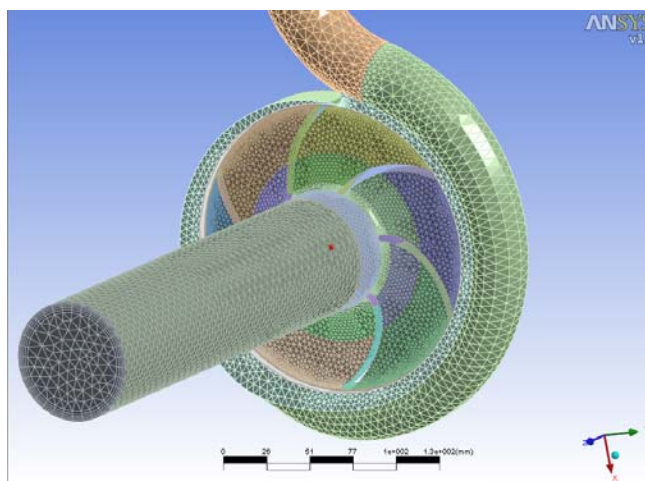


Figura 4 - Detalhes da malha (frontal/sucção)

Deve-se ressaltar que as superfícies de maior interesse, como na região das pás e as regiões de maior velocidade, devem ser mais refinadas, pois são regiões onde se deseja estudar o fenômeno (campo de pressões, perfil de velocidades etc.) com maior precisão ou regiões que devem ser refinadas para diminuir os erros que podem surgir devido à alta velocidade na região. O maior refinamento nos permite verificar as mudanças do escoamento com uma maior precisão.

**Condição de contorno:**

As condições de contorno são as características do escoamento (velocidade, pressão, temperatura, etc.) atribuídas aos limites do domínio de interesse. Elas são peças essenciais para o fechamento do sistema de equações e para a obtenção dos resultados corretos.

Os tipos de condições de contorno a serem definidas dependem dos seus respectivos propósitos na simulação. Os tipos são:

#### Condições de contorno para fluidos:

- Entrada (inlet): fluido escoa somente para dentro do domínio;
- Saída (outlet): fluido escoa somente para fora do domínio;
- Aberto (opening): fluido pode escoar para fora ou para dentro do domínio, simultaneamente;
- Parede (wall): contorno impenetrável pelo escoamento;
- Plano de simetria (symmetry plane): plano de simetria tanto geométrica como do escoamento.

#### Condição de contorno para sólidos:

- Parede (wall);
- Plano de simetria (symmetry plane).

#### Interface sólido-fluido

#### Interface sólido-sólido

### **b.3) Definição física do problema - Construção da bomba**

Para a construção da bomba simulada no programa de CFD, foi utilizado um programa específico que o fabricante possui.

Tal programa é um sistema de manufatura auxiliado por computador (CAM) utilizado pela empresa para a usinagem das peças componente da bomba. O programa tem uma biblioteca completa de tecnologias de usinagens e um banco de dados extenso de ferramentas. Oferece ainda o melhor na classe de usinagem prismática combinados com a poderosa ferramenta de sólido em 3D e estratégias de usinagem de superfície, além de uma flexível comunicação máquina-ferramenta.

O programa de construção da bomba tem ligação direta com a máquina CNC da empresa, usada para a usinagem. O sistema CAM é operado por meio de um conjunto de instruções estabelecidas previamente. No caso específico de uma máquina CNC o programa é desenvolvido com frequência

para usinagem de um componente ou peça. As instruções são apresentadas ao comando da máquina na ordem em que o programador precisa delas para realizar o trabalho. O programa CNC transmite à máquina a geometria da peça e as informações relativas à movimentação das ferramentas necessárias a execução do trabalho.

No programa, é feita a seleção de ferramentas e operação de usinagem para a realização da simulação da usinagem no computador. Assim todas as ferramentas e operações foram escolhidas corretamente e a simulação realizada com sucesso, ou seja, sem erros, colisões e sobre metais, o computador gera códigos para a máquina CNC, que lê os códigos e realiza a usinagem da peça bruta da mesma maneira como foi observado na simulação do programa utilizado para esta finalidade, na mesma ordem de ferramentas e processos. Depois de usinadas, as peças são montadas, formando a bomba para ser simulada no laboratório físico.

#### **Etapas do Laboratório físico**

Para o desenvolvimento das equações, baseado nas grandezas lidas e calculadas, e para o estabelecimento de métodos de ensaios e maneiras de medir as grandezas envolvidas na determinação de desempenho da bomba hidráulica em estudo, foram utilizadas as seguintes normas:

- ISO 9906 (1999) - Rotodynamic pumps - Hydraulic performance acceptance tests - Grades 1 and 2;
- NBR 6400 (1989) - Bombas hidráulicas de fluxo (classe C) - Ensaios de desempenho e de cavitação, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT.
- NBR 6397 (1975)- Bombas hidráulicas de fluxo - Ensaios, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT;

#### **Equacionamento**

O equacionamento apresenta as equações básicas utilizadas pelo trabalho:

- Altura total de elevação (H):

$$H = \left( \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} \right) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + z_2 - z_1 \quad (1)$$

Onde:

H = Altura total de elevação, em [m];



$p_2$  = Carga de pressão na linha de recalque, na saída da bomba, em [mH<sub>2</sub>O];  
 $p_1$  = Carga de pressão na linha de sucção, na entrada da bomba, em [mH<sub>2</sub>O];  
 $g$  = Aceleração da gravidade, em [m/s<sup>2</sup>];  
 $\rho$  = Massa específica do líquido que está sendo bombeado, em [kg/m<sup>3</sup>];  
 $v_1$  = Velocidade do líquido na tubulação de recalque, em [m/s];  
 $v_2$  = Velocidade do líquido na tubulação de sucção, em [m/s];  
 $z_1$  = Altura vertical do ponto de medida da pressão de recalque, em [m];  
 $z_2$  = Altura vertical do ponto de medida da pressão de sucção, em [m].

- Velocidade do líquido (v):

$$v_1 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_1^2} \quad v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_2^2} \quad (2)$$

Onde:

$Q$  = Vazão na bomba, em [m<sup>3</sup>/s];  
 $D_1$  = Diâmetro da tubulação de recalque, em [m];  
 $D_2$  = Diâmetro da tubulação de sucção, em [m].

- Potência hidráulica (Ph):

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

Onde:

$P_h$  = Potência hidráulica, em [kW];  
 $\rho$  = Massa específica do líquido que está sendo bombeado, em [kg/m<sup>3</sup>];  
 $g$  = Aceleração da gravidade, em [m/s<sup>2</sup>];  
 $Q$  = Vazão na bomba, em [m<sup>3</sup>/s];  
 $H$  = Altura total de elevação, em [m].

- Rendimento do conjunto  $\eta(C)$ :

$$\eta_C = \frac{P_h}{P_{el}}$$

Onde:

$\eta_C$  = Rendimento do conjunto moto-bomba;  
 $P_h$  = Potência hidráulica, em [kW];  
 $P_{el}$  = Potência elétrica, em [kW].

- Rendimento total  $\eta(T)$ :

$$\eta_T = \frac{P_h}{P_s} \quad (4)$$

Onde:

$\eta_T$  = Rendimento total da bomba, [1];  
 $P_h$  = Potência hidráulica, em [kW];  
 $P_e$  = Potência de eixo, em [kW].

### Simulação Física

Para simular o comportamento hidráulico da bomba no laboratório físico, foram utilizados vários equipamentos para a realização do teste de bancada completo, mas os principais, que serão utilizados para este trabalho foram os seguintes:

- Transdutor de pressão, modelo PSI-420 da Zürih. Faixa de indicação: 0 a 160 m.H<sub>2</sub>O.
- Medidor de vazão digital, Faixa de indicação: DN50 – DN150.

O estudo físico foi feito através de experimentos no laboratório físico da empresa, para validar o experimento virtual. O presente estudo tem a finalidade de realizar uma análise visual qualitativa e comparativa entre os dois experimentos, verificando a proximidade da simulação virtual para uma simulação real.

A seguir, a figura 5 ilustra a bancada de teste do laboratório do fabricante da bomba, onde foi realizado o experimento.



Figura 5 - Espaço físico do laboratório do fabricante de bombas

## RESULTADOS

### Distribuição das velocidades

Para vazões muito baixas, de começo de curva, as áreas de recirculação são mais frequentes, tanto no rotor quanto na tubulação de sucção, fenômenos normais para esta bomba normalizada, projetada para maiores vazões. Este fenômeno ocorre devido à pré-rotação, que induz a formação de vortex nas regiões mencionadas. A distribuição longitudinal da velocidade na bomba para a vazão de 10 m<sup>3</sup>/h é representada na figura 6 e detalhada nas figuras 7 e 8. Mesmo com estas áreas de recirculação presentes no interior da bomba, conseguiu-se enxergar através de uma animação que ilustra o caminho do fluido entrando e sendo expulso do rotor pela tubulação de recalque, que tais recirculações não prendem a água no seu interior. Porém, uma bomba funcionando com uma vazão mais baixa, mas com a rotação normal de funcionamento (3500 rpm), gera recirculação no interior da mesma, podendo superaquecê-la e danificá-la.

As maiores velocidades observadas na simulação para 10 m<sup>3</sup>/h encontram-se na garganta da voluta e em algumas regiões da interface do rotor com a voluta. A escala de velocidade observada no canto das figuras não é totalmente confiável, pois depende do refinamento da malha, ou seja, as velocidades máxima e mínima podem variar com uma malha com elementos maiores ou uma malha mais refinada. Além disso, estes valores representam a velocidade média do conjunto todo, ou seja, a média de todos os domínios, nas direções x, y e z.

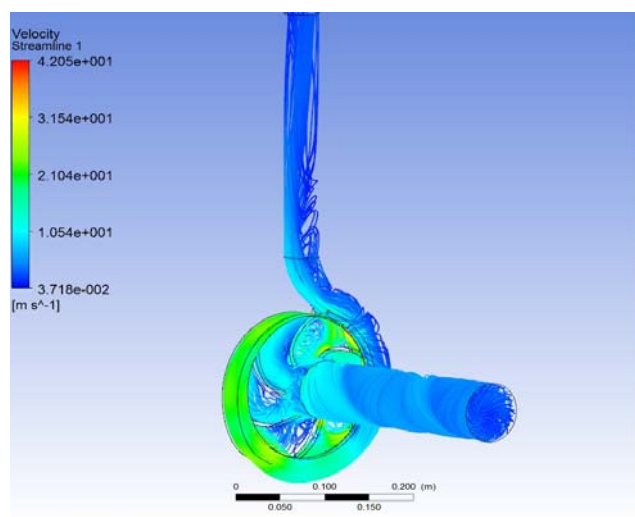


Figura 6 - Linhas de direção analisando a velocidade no interior da bomba para uma vazão de 10m<sup>3</sup>/h.

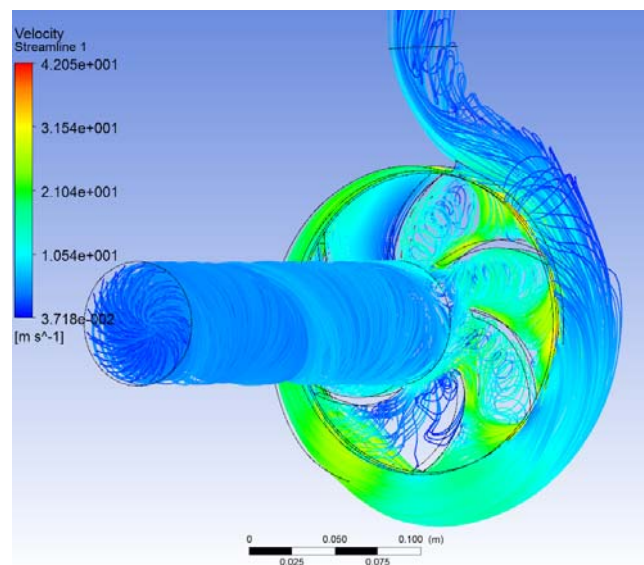


Figura 7 - Detalhe do rotor, para a vazão de 10m<sup>3</sup>/h.

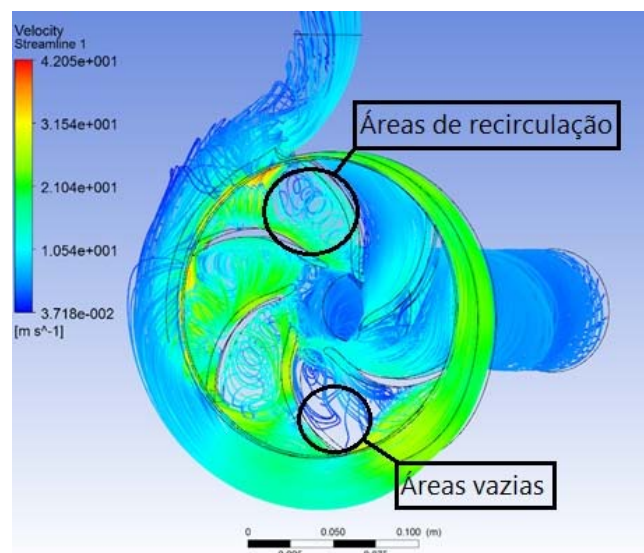


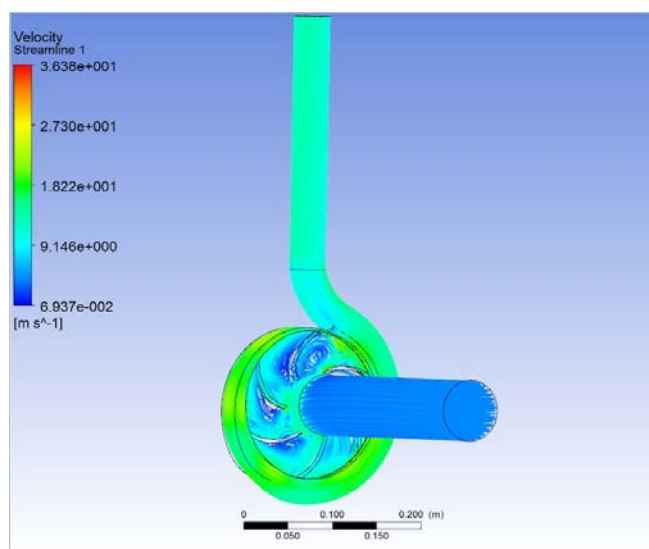
Figura 8 - Detalhe da parte posterior do rotor, para a vazão de 10m<sup>3</sup>/h.

Para o ponto 15, com vazão igual a 60 m<sup>3</sup>/h (figura 9), nota-se algumas pequenas áreas de recirculação e áreas sem fluxo de água. Estas áreas são áreas de descolamento, ou seja, a água desprende da parede do rotor. Com o deslocamento da massa inicial do fluido do centro do rotor para sua extremidade, formar-se-á um vazio (vácuo), sendo este, o ponto de menor carga de pressão da bomba.

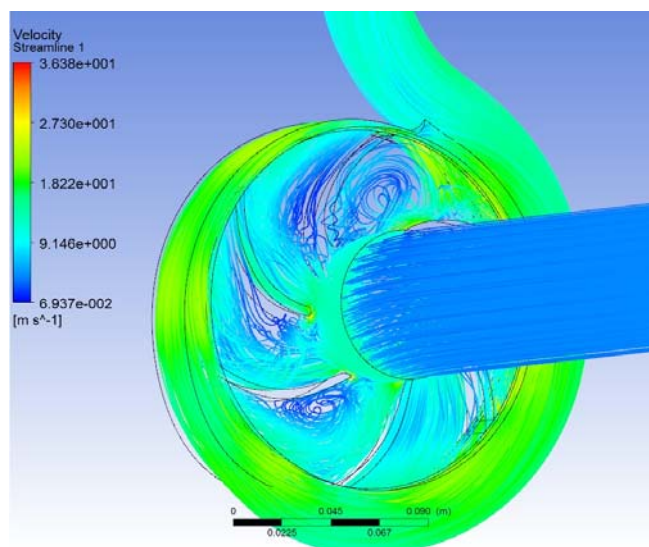
Estas áreas podem ser prejudiciais ao rendimento da bomba.. Esta bomba vem sofrendo modificações em busca da melhoria do seu rendimento. Esta simulação foi a ultima modificação da bom-

ba. Um dos projetos ainda não concluídos nesta mesma bomba é a alteração do ângulo de saída e alguns outros parâmetros da bomba. Essas mudanças ainda estão na fase de projeto, mas já nota-se que melhor direcionam o fluxo no interior do rotor, se comparado com o rotor antigo. Isso eliminará as áreas de deslocamento de água no interior do rotor.

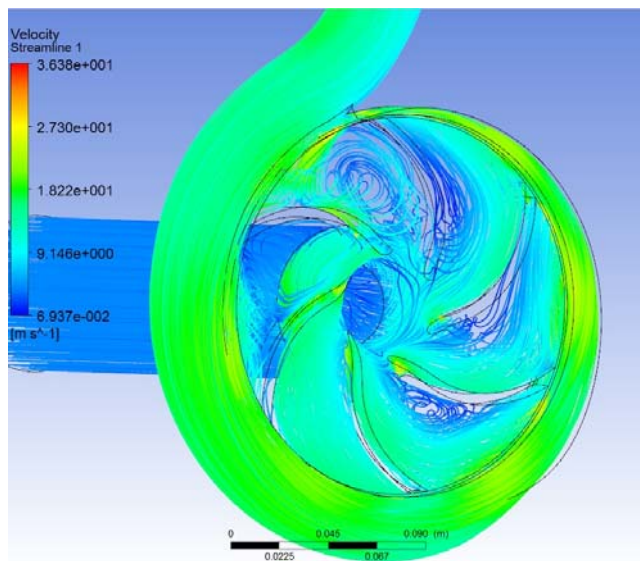
A distribuição da velocidade na bomba é representada pelas figuras 10 e 11, onde se observa a região mais avermelhada na língua da voluta. As maiores velocidades observadas nesta simulação estão na língua da voluta e as menores velocidades são apresentadas na tubulação de sucção, onde o fluido ainda não sofreu influência da força centrífuga.



**Figura 9 - Linhas de direção analisando a velocidade no interior da bomba para uma vazão de 60m³/h.**



**Figura 10 - Detalhe do rotor para a vazão de 60m³/h.**



**Figura 11 - Detalhe da parte posterior do rotor para a vazão de 60m³/h.**

Nota-se em todas as simulações que o regime no interior do rotor é turbulento de acordo com cálculos de Reynolds e observação visual.

As figuras 10 e 11 apresentam apenas uma faixa de velocidade, então o rotor apresenta áreas que aparentam não ter circulação de água. O recurso de isovolume do pós-processador é utilizado para demonstrar que essas áreas vazias da figura anterior, contêm circulação, porém com baixas velocidades. As destes resultados foram comparadas com valores de vazões e alturas manométricas. Os valores destes dois parâmetros foram obtidos computacionalmente e experimentalmente (bomba construída). Ressalta-se que os valores de vazões simulados foram obtidos a partir dos campos de velocidades. Observou-se que as diferenças entre valores experimentais e computacionais ficaram no máximo em 5%.

## CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi realizado um estudo do comportamento hidráulico da bomba centrífuga a partir de simulações no laboratório físico e virtual.

A bomba centrífuga foi validada através de ensaio experimental em laboratório. Ao comparar os resultados do experimento físico e virtual para a validação, observou-se uma diferença máxima de 4,6% entre as curvas. De acordo com a norma ISO



9906 são admissíveis valores de incerteza tabelados por grandeza, de forma a obter 95% do nível de confiança global. Isto quer dizer que a incerteza considerada para a curva construída é de  $\pm 5\%$ .

Esta pequena porcentagem de erro encontrada na validação dos resultados comprova a eficiência da ferramenta de CFD. Esta ferramenta é muito promissora para este tipo de análise hidráulica, pois fornece uma análise visual e detalhada de alta qualidade, na medida em que é possível visualizar o comportamento hidráulico da bomba e os fenômenos que ocorrem durante o escoamento do fluido. Assim, a mesma contribui com o seu desenvolvimento e aperfeiçoamento a um baixo custo e em um tempo menor. O baixo custo deve-se a economia na construção de protótipos e o tempo foi reduzido em um sexto do tempo de projetos anteriores à utilização do programa de CFD.

Os resultados obtidos por este trabalho podem ser utilizados como uma idéia inicial para futuros desenvolvimentos, observando a necessidade de executar os cálculos com malhas mais refinadas com maior número, de iterações, como normalmente é feito em projetos industriais. Outra potencialidade do software é o estudo da cavitação em bombas centrífugas através do programa de CFD, a fim de buscar a maior eficiência da bomba com menores danos.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6397 – Ensaio em bombas hidráulicas de fluxo, 1975.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6400 – Bombas hidráulicas de fluxo (classe C) - Ensaio de desempenho e de cavitação, 1989.
- ANSYS, ANSYS® CFX® Robust Cavitation Modeling. 2006. Disponível em: < <http://www.ansys.com>>. Acesso em 11 de Junho de 2009.
- ANSYS, CFX Helps Design More Efficient Diesel Engine Water Pumps, ANSYS Study Cases, 2004. Disponível em: < <http://www.ansys.com>>. Acesso em 11 de Junho de 2009.
- ANSYS, ANSYS, BLADEMODELER™ Tutorial. 2007.
- DORSCH G.; KEERAN K., Chopping Away at Solids, Advantage, Excellence in Engineering Simulation, Volume I, Issue 2, Pages 16-17. 2007. Disponível em: < <http://www.ansys.com>>. Acesso em 14 de Junho de 2009.
- DUPONT, P., CFD expertise improves product design and operational behavior, World Pumps, Volume 2006, Issue 483, Pages 22, 24-25. 2006.

ENGINEERING SIMULATION AND SCIENTIFIC SOFTWARE.

Disponível em: < [www.esss.com.br](http://www.esss.com.br)>. Acesso em 28 de março de 2009.

ISO 9906 – Rotodynamic pumps - Hydraulic performance acceptance tests, Grades 1 and 2, 1999.

MALISKA, C. R., Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. 2ª edição. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2004. 453 p.

## *Evaluation of Velocity Distribution in a Radial Centrifugal Pump Using CFD Techniques*

### ABSTRACT

*The design of a pump construction project involves high costs and takes long time to reach the final high efficiency product. Computer simulation technology, such as the Computational Fluidodynamic Simulation software (CFD), is the most effective way of studying the behavior of the hydraulic pump, since it provides a complete picture of its operation, allowing the engineer to correct and improve the project even before the prototype is built. This study aims to validate, through experimental testing, the computer model, created by the CFD program, of a TH 40-160 centrifugal pump. The results obtained in virtual and physical simulation were very close, with an average difference of 5%, proving the efficiency of the CFD tool to study hydraulic behavior, which contributes to the development and improvement of products and processes at a low cost and in less time.*

*Keywords: computational fluid dynamics, flow meter, Venturi, CFD.*