

# **METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UMA BOMBA CENTRÍFUGA**

Mayara Almassar – almassar.mayara@gmail.com

Edvaldo Angelo (Orientador) – edvaldoangelo.angelo@mackenzie.br

## **RESUMO**

Dentro de uma grande família de máquinas de fluxo, encontram-se as bombas centrífugas, presentes em várias aplicações práticas e foco de inúmeros estudos, visto que, suas melhorias resultam em grande impacto positivo no desenvolvimento da sociedade. O presente trabalho propõe uma abordagem metodológica para simulação numérico computacional de uma bomba centrífuga radial. Adicionalmente a apresentação da análise analítica e comparação dos resultados com dados experimentais da literatura. Todas as etapas da simulação são descritas, desde a definição da geometria até a extração dos resultados. Durante a construção da geometria, foi apresentada a importância da utilização de um *software* cujas equações matemáticas são consistentes e facilmente identificadas durante a simulação. Para isso, foram apresentados os passos e estratégias adotadas para construção da geometria de uma bomba centrífuga. Somado a isso, os resultados contemplam a curva da bomba nas três abordagens: analítica, numérica e experimental. A conclusão do trabalho demonstra a captura do comportamento da curva de forma numérica e a distância entre os resultados analíticos, numéricos e experimentais.

Palavras-chave: Bomba centrífuga. Simulação computacional. Metodologia.

## **METHODOLOGY FOR COMPUTATIONAL SIMULATION OF A CENTRIFUGAL PUMP**

### **ABSTRACT**

Within a large family of flow machines, there are centrifugal pumps, present in several practical applications and the focus of numerous studies, since their improvements result in a great positive impact on the development of society. The present work proposes a methodological approach for computational numerical simulation of a radial centrifugal pump. Additionally, the presentation of the analytical analysis and comparison of results with experimental data from the literature. All simulation steps are described, from geometry definition to the results extraction. During the construction of the geometry, the importance of using a software whose mathematical equations are consistent and easily identified during the simulation was presented. For this, the steps and strategies adopted for the construction of the geometry of a centrifugal pump were presented. In addition, the results include the pump curve in the three approaches: analytical, numerical and experimental. The

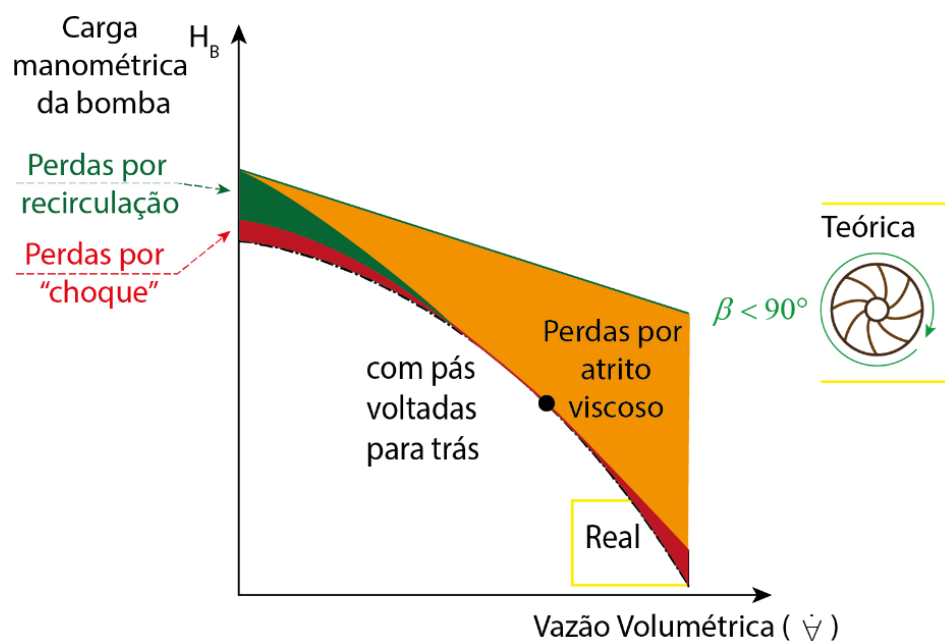


Para estabelecer a relevância quanto ao uso das bombas centrífugas, basta analisar a estimativa de autores citados na literatura clássica (FOX, 2018), na qual, 5% de toda energia elétrica produzida nos Estados Unidos, são consumidos por bombas centrífugas industriais. Desta forma, é de extrema importância conhecer a natureza dos parâmetros que caracterizam o funcionamento da bomba. A curva característica ou curva de desempenho da bomba relaciona duas importantes grandezas que definem a condição de operação da bomba, a altura manométrica (ou carga manométrica da bomba) e a vazão.

Essa curva pode ser obtida analiticamente ao aplicar a equação de Euler para as turbomáquinas (ÇENGEL, 2015), impondo diversas hipóteses simplificadoras, tal como, o escoamento permanente, incompressível, invíscido e radial na seção de entrada da bomba. Na figura 2 há uma representação esquemática simplificada da curva teórica da bomba com pás voltadas para trás. Em uma bomba centrífuga com pás voltadas para trás, a curva que relaciona vazão à carga manométrica da bomba possui o comportamento representado por uma reta descendente. Entretanto, a curva real, determinada experimentalmente, também expressa no gráfico da figura 2, demonstra o distanciamento do resultado do modelo analítico simplificado da condição de operação real.

Esse distanciamento é causado pela adoção de hipóteses simplificadoras no modelo matemático, que desprezam características como perdas por atrito, presença de vazamentos internos, ou descolamento da camada limite e assumem escoamento unidimensional, com entrada radial.

Figura 2 – Carga manométrica da bomba em função da vazão volumétrica



Fonte: Adaptado de Fox (2018).

Além desse problema, representado pela figura 2 e explicitado em epígrafe, existe a dificuldade na obtenção de dados experimentais. Essa dificuldade é de âmbito técnico, pois é relativamente difícil medir alguns parâmetros; e financeiro, devido aos custos de testes, em função de equipamentos necessários aos laboratórios e instrumentação para aquisição das grandezas.

Este estudo objetiva propor uma metodologia, na qual detalha as etapas de uma simulação computacional de uma bomba centrífuga e seus respectivos parâmetros. Tais etapas englobam todas as fases de uma simulação, desde a construção da geometria, até a análise dos resultados. Tal metodologia foi baseada na utilização de um código computacional comercial de emprego em diversos ramos da indústria e da academia, o ANSYS CFX®.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Apresentar uma sequência adequada e boas práticas para simulação numérico computacional de uma bomba centrífuga radial. Ademais, validar os resultados numéricos por meio de uma comparação com resultados analíticos e experimentais.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Determinar os parâmetros necessários, construir um modelo computacional tridimensional e simular uma bomba centrífuga convencional utilizando o *software* comercial ANSYS CFX®.

Apresentar as características do escoamento e curva da bomba que podem ser obtidos por meio da simulação computacional.

Comparar as cargas obtidas numericamente com valores analíticos e experimentais disponíveis na literatura.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

As reconhecidas dificuldades na obtenção experimental das características do escoamento no interior de uma bomba centrífuga, enquadram a simulação computacional como uma vantagem estratégica de projeto. Entretanto, para realização da simulação de uma bomba, é comum encontrar dificuldades numéricas que, se não forem devidamente observadas e tratadas, podem trazer resultados inadequados, imprecisos, distantes da realidade.

Ao apresentar a simulação numérico computacional como recurso para obtenção de parâmetros de projeto, acredita-se que este estudo tenha potencial de contribuição para o

desenvolvimento de protótipos e possa auxiliar com boas práticas utilizáveis em outras simulações semelhantes.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Os métodos de obtenção do comportamento das bombas, assim como outros estudos podem ser realizados por três abordagens, a saber: analítica, experimental ou numérica.

Os resultados obtidos pelo método analítico, como apresentados esquematicamente na figura 2, são relativamente distantes da realidade, por adotarem hipóteses simplificadoras restritivas, mas úteis para determinação preliminar de alguns parâmetros, ou ainda para a configuração de um pré-projeto. Desta forma, para construção analítica da curva da bomba, é necessário relacionar em uma expressão a carga (energia mecânica armazenada no fluido por unidade de peso) e a vazão volumétrica.

Essa expressão pode ser obtida ao associar a Equação de Euler para turbomáquinas, equação 1 (ÇENGEL, 2015), com a equação de potência hidráulica, equação 2 (ÇENGEL, 2015). Para um volume de controle fixo e coincidente com o rotor de uma bomba centrífuga de pás voltadas para trás, faz-se necessário a aplicação de algumas hipóteses simplificadoras para obter resultado analítico: fluido incompressível, escoamento unidimensional, geometria axissimétrica, perdas de carga e velocidade axial de entrada desprezíveis, entre outras (FOX, 2018).

Conhecidas e aplicadas às condições citadas em epígrafe, a equação 1 apresenta o torque do rotor ( $T$ ) como a multiplicação dos fatores, sendo os índices 1 para parâmetros de entrada no rotor da bomba e 2 para os de saída: vazão em massa ( $\dot{m}$ ), raio ( $r$ ), e velocidade tangencial ( $V_t$ ). Já a equação 2, apresenta a potência hidráulica recebida pelo fluido ( $\dot{W}_{hidraulica}$ ) obtida pela multiplicação dos termos: peso específico do fluido ( $\gamma$ ), vazão volumétrica ( $Q$ ) e altura manométrica teórica ou carga manométrica da máquina ( $H_m$ ).

$$T = \dot{m}(r_2 V_{2t} - r_1 V_{1t}) \quad (1)$$

$$\dot{W}_{hidraulica} = \gamma Q H_m \quad (2)$$

Para construção da curva da bomba teórica, é necessário combinar as equações 1 e 2 com manipulações algébricas, relações geométricas e condições de operação simplificadas de uma bomba centrífuga (FOX, 2018), além da adoção de velocidade radial na entrada do rotor. A equação 3 apresenta o resultado dessa combinação e, indica a altura manométrica teórica como função da velocidade angular ( $\omega$ ), raio ( $r$ ), aceleração da gravidade ( $g$ ), largura de saída ( $b$ ) e ângulo de saída do rotor ( $\beta$ ). Ao analisar a equação 3, é possível determinar seu comportamento linear e descendente, representado pela reta da figura 2.

$$Hm = \frac{\omega^2 r_2^2}{g} - \frac{\omega}{2 \pi b_2 g \tan \beta_2} Q \quad (3)$$

O método analítico pode ser usado para obter uma previsão e iniciar o pré-projeto de uma bomba centrífuga, resultados mais precisos e que representam melhor a realidade, podem ser obtidos de forma experimental e numérica. A abordagem experimental se faz necessária para que se conheçam as condições reais de operação da bomba. O desenvolvimento de ensaios experimentais exige um aparato específico e um ambiente laboratorial preparado.

Para uma captura experimental adequada dos parâmetros são necessárias instrumentações, o que tem potencial de tornar os estudos mais custosos. A curva da bomba obtida experimentalmente é aplicada estritamente a um único fluido, não sendo possível sua utilização (sem correção e ajuste) para outros casos, além daquele estudado (WHITE, 2018).

Outrossim, existem algumas limitações. Grandes dificuldades em manter a temperatura constante, visão limitada ou parcial para análise do escoamento ou de bolhas de vapor em casos de escoamento bifásico. Igualmente existe uma limitação relacionada a separação da influência de diferentes dados no desempenho da bomba, isso ocorre devido à complexidade da análise experimental em escoamentos turbulentos (PATERNOST, 2013).

Por fim, a tônica deste trabalho, o método numérico, pode auxiliar na obtenção de dados e informações preciosas da bomba centrífuga, estes auxiliarão desde a fase de projetos até as mais diversas aplicações.

O modelo matemático por trás do método é composto pelas equações de Navier Stokes para fluido viscoso, incompressível e escoamento tridimensional em regime permanente. As equações apresentam de forma matemática os três princípios físicos que regem o escoamento de um fluido nas condições citadas, são eles: princípio de conservação da massa, o princípio da conservação da quantidade de movimento e o princípio da conservação da energia.

As equações 4, 5, 6 e 7 são, respectivamente, as equações de conservação de massa e conservação de quantidade de movimento, nas direções x, y, z (ANDERSON, 1995). Neste caso, a equação de energia não se aplica devido a simplificação de escoamento isotérmico. Nelas, o vetor ( $\vec{V}$ ) representa a velocidade decomposta nas componentes cartesianas, ( $\rho$ ) é a densidade do fluido, p a pressão, a letra grega ( $\tau$ ) as tensões normais e de cisalhamento.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (7)$$

Devido a complexidade das equações diferenciais apresentadas, elas não possuem, até o momento, solução analítica conhecida. O modelo numérico utilizado no *software* ANSYS CFX® para solução dessas equações é o Método dos Volumes Finitos (MALISKA, 2012).

Nesta solução, as equações citadas são aplicadas a um volume de controle discretizado, isto é, subdividido em pequenas partes. A esse domínio discretizado dá-se o nome de malha. A cada uma dessas partes é aplicado o conjunto de equações explicitado, e devido a aplicação das condições de contorno em todas as fronteiras do volume de controle, as equações possuem um comportamento matemático elíptico (ANDERSON, 1995).

O método numérico é muito utilizado em estudos comparativos, os quais analisam a influência de determinadas variações, sejam elas geométricas ou físicas, no desempenho da bomba centrífuga.

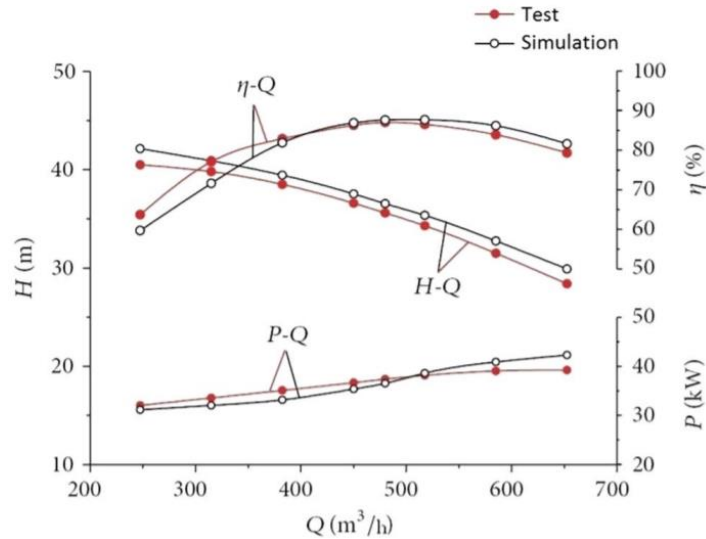
Ding, H et al. (2019) analisaram a influência do ângulo de saída na performance de uma bomba operando a uma elevada velocidade específica. O método numérico foi utilizado para verificar a altura manométrica alcançada, o rendimento, a cavitação, entre outros parâmetros com cinco diferentes ângulos de saída. Para validar a eficácia da simulação e reforçar os resultados encontrados, análises experimentais para esses ângulos também foram utilizadas.

Já Weidong et al. (2017) expuseram em seu artigo a influência da excentricidade do rotor nos parâmetros de uma bomba centrífuga. Naquele estudo, os autores analisam também de forma numérica quatro diferentes assimetrias do rotor e de forma experimental duas delas. Além da curva da bomba, foi possível examinar a variação na distribuição de pressão, cavitação, velocidade relativa, energia cinética, forças radiais, entre outros parâmetros, e obter a influência deles, de forma independente, no resultado de operação da bomba

Além desses, Xu (et al. 2021) estudaram a intervenção da rugosidade da parede da bomba na cavitação e sua influência na performance da bomba. Em seus estudos numéricos, foi possível detectar quatro estágios progressivos da cavitação e suas respectivas consequências para o desempenho da bomba.

Além de tudo, é possível observar na figura 3, a precisão da análise numérica quando comparada com testes experimentais realizados para validar o modelo matemático. No gráfico apresentado destaca-se o comportamento da carga manométrica (H), potência (P) e rendimento da bomba ( $\eta$ ) em função da variação da vazão (Q).

Figura 3 – Gráfico comparativo entre resultados numéricos e experimentais



Fonte: Xu et al. 2021

Devido a frequência de casos de cavitação em bombas centrífugas, Liu (et al. 2013) estudaram a aplicação de diferentes modelos de turbulência nas análises de cavitação nas bombas. Esse estudo assinala a importância da simulação computacional para estudo da cavitação, já que este fenômeno é de difícil mensuração experimental.

A similaridade das metodologias empregadas destaca pontos importantes a se considerar na simulação de bombas centrífugas. É importante observar que os estudos citados fizeram algum tipo de validação experimental nos casos estudados, isso reforça a validade dos dados obtidos numericamente e, com isso, seu grande potencial de contribuições para projetos de bombas.

Dentre a metodologia das simulações, pode-se destacar procedimentos comuns como o estudo da independência da malha, realizado para que se tenha resultados numéricos críveis. Ademais, destaca-se a divisão do domínio computacional pelos autores em um domínio estático (voluta, entrada e saída da bomba) e um rotativo (rotor). E por fim, a obtenção unânime da curva da bomba relacionando a vazão com altura manométrica, o que reforça a reconhecida importância desses parâmetros em um estudo de performance da bomba.

Sem dúvida, esses e muitos estudos numéricos podem contribuir de forma significativa para os projetos de bomba centrífuga. Com eles, projetistas podem tomar, com mais segurança, as decisões relacionadas a geometrias e condições de operação, tendo uma previsão assertiva do comportamento da bomba e sua resposta durante a utilização.

### 3 METODOLOGIA

Para cumprir o objetivo proposto, a metodologia percorrida teve como alvo a exposição das etapas necessárias para um estudo numérico do funcionamento hidrodinâmico de uma bomba centrífuga. Adicionalmente, a abordagem analítica também foi realizada para evidenciar



simplificadamente as etapas de um pré-projeto, somado a isso, para que fosse possível demonstrar a ordem de grandeza de cada resultado, quando comparados com o experimental.

A primeira etapa do procedimento é a definição de uma geometria e das condições de operação da bomba. A proposta foi simplificar a geometria de uma bomba centrífuga com comportamento já relatado na literatura, possibilitando assim, uma análise comparativa dos resultados das simulações. Por se tratar de uma análise comparativa, as condições de contorno foram as mesmas utilizadas no estudo experimental (AYAD, A. F. et al, 2015). Determinações analíticas foram obtidas na sequência, pela utilização da equação 3.

A análise numérica seguiu logo após a determinação analítica, e consistiu em cinco partes: construção da geometria (domínio computacional), divisão do domínio computacional (discretização ou definição da malha), configuração das condições de contorno, processamento dos dados, e análise dos resultados.

O domínio computacional foi construído no *software* DESIGN MODELER®, parte integrante do pacote utilizado. Como estratégia de abordagem a geometria foi dividida em 4 partes: entrada, saída, voluta e rotor. O rotor foi definido como uma parte móvel, enquanto as outras partes, como fixas.

A literatura é clara quanto a vantagem da utilização de malhas estruturadas na solução de modelos pelo método dos volumes finitos (ÇENGEL, 2015), todavia, geometrias complexas dificultam ou impossibilitam essa construção. A geometria relativamente complexa do domínio computacional necessário para a simulação pretendida não impossibilitou que a malha fosse obtida por meio da utilização majoritária de elementos hexaédricos, mais regulares, entretanto, a malha final não pode ser considerada estruturada em todas as regiões.

Após definição da malha foram escolhidos: o fluido de bombeamento (água em escoamento isotérmico de 25°C), o modelo de turbulência, impostas as condições de contorno ao domínio computacional e os alvos dos resíduos máximos do processo de simulação numérica iterativa. Após o processamento, os resultados foram analisados.

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

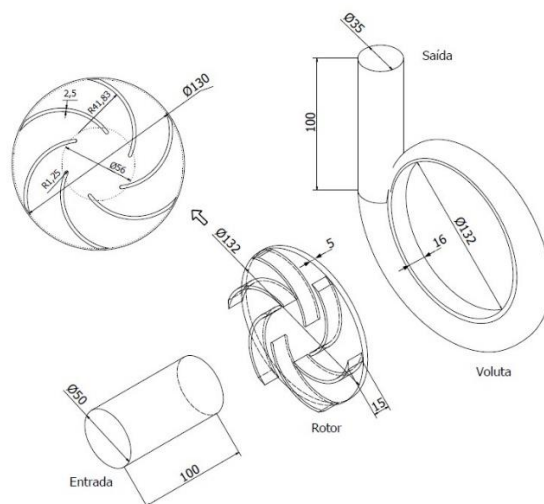
O principal resultado deste estudo consiste na metodologia para uma simulação computacional de uma bomba centrífuga. Desta forma, as etapas serão detalhadas desde a construção do domínio computacional até a extração dos resultados. Além disso, são apresentadas a análise analítica e as comparações dos resultados obtidos em três abordagens diferentes: analítica, numérica e experimental.

Sendo assim, a primeira etapa consiste na definição da geometria e condições de contorno a serem utilizadas. Em seguida, inicia-se a construção do domínio computacional. A geometria e

condições de contorno deste artigo foram retiradas da literatura (AYAD, A.F. et al, 2015) para que fosse possível a comparação com os resultados experimentais.

O artigo base é omissivo sobre algumas características geométricas, desta forma, algumas cotas foram estimadas para construção. A figura 4 representa a geometria simulada.

Figura 4 – Geometria do domínio computacional



Fonte: Autoral

A geometria de uma bomba centrífuga é, em geral, complexa e detalhada; para realizar uma simulação computacional, simplificações muitas vezes são necessárias e existem algumas análises preliminares e passos que podem ajudar a decidir quais simplificações podem ser realizadas sem impactar de forma significativa no resultado.

A primeira análise está relacionada com o domínio computacional. Selecione para seu domínio, partes da bomba que estão em contato com o fluido ou que influenciam de forma significativa o mesmo. As outras partes podem ser ignoradas ou simplificadas, isso reduz a possibilidade de problemas com a simulação.

Ademais disso, alguns detalhes construtivos, tais como pequenos raios de arredondamento e chanfros, podem ser desprezados, pois, podem dificultar a geração da malha, criando densidade de elementos em regiões em que não são necessários, por exemplo.

Isso posto, para construção da geometria existem dois possíveis caminhos. O primeiro é realizá-la em um *software* com uma tecnologia mais avançada para construção do modelo e importá-lo no pacote ANSYS®. Este caminho pode parecer mais simples num primeiro momento, pois a construção da geometria pode ser facilitada com ferramentas do *software* de CAD (sigla em língua inglesa, para desenho assistido por computador, ou *Computer Aided Design*).

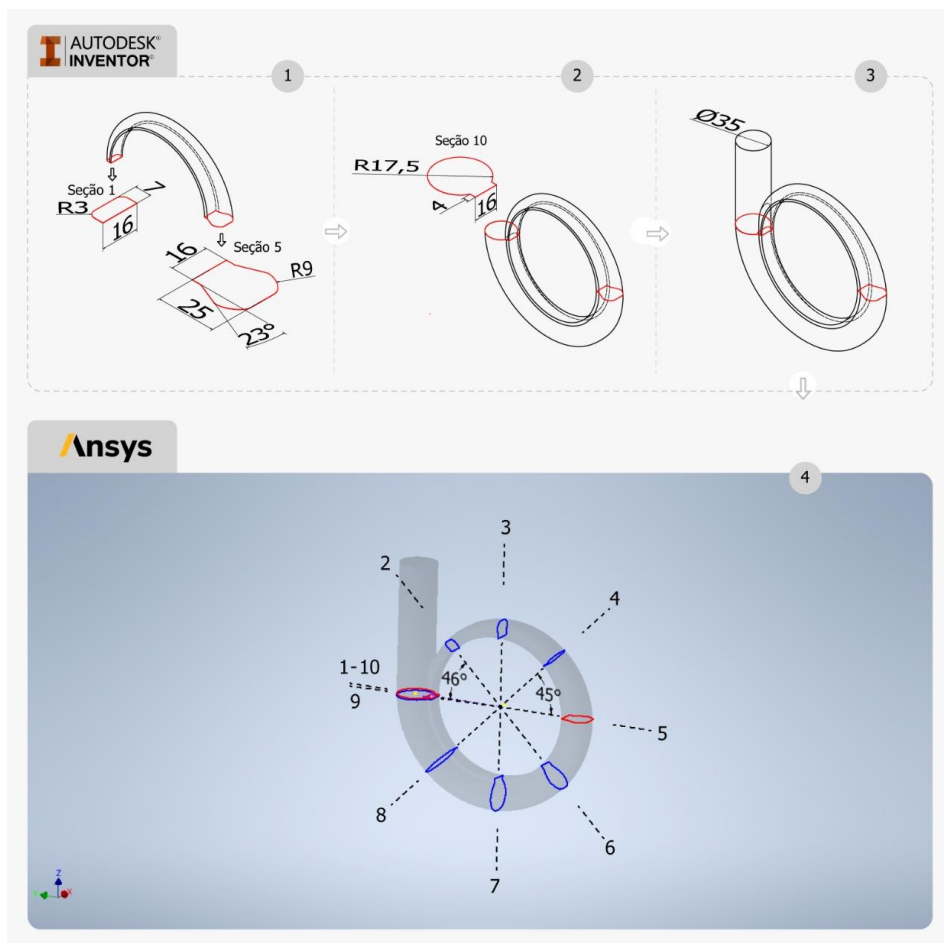
O segundo caminho é a utilização do modelador presente no pacote ANSYS®, denominado DESIGN MODELER® para construção da geometria. Este percurso pode parecer mais complexo no primeiro momento porque o *software* não possui ferramentas de CAD de última geração. Contudo,

deve-se lembrar que, todas as construções de geometrias em *softwares* CAD são compostas por equações matemáticas. Tendo isso em vista, o *software* DESIGN MODELER® é um *software* que apresenta equações matemáticas consistentes para os próximos passos necessários na construção da malha.

Quando a geometria é importada, algumas equações matemáticas podem não ser reconhecidas. Isso resulta em uma estimativa realizada pelo *software* na importação de uma possível forma que possa ser substituída pelo erro encontrado, ou ainda na divisão da geometria em partes menores, o que pode gerar ângulos ou pontos não existentes e dificultar o trabalho computacional no passo seguinte, o qual consiste na construção da malha ou divisão do domínio computacional em volumes menores.

No presente estudo, a construção da geometria, especialmente a voluta, está detalhada na figura 5. Inicialmente, foram retiradas do artigo (AYAD, A. F. et al, 2015) a seção transversal inicial, final e uma seção intermediária, respectivamente as seções 1,10 e 5. Com estas seções, utilizando o *software* INVENTOR®, e a função *Sweep*, foi criada a voluta da bomba. A criação da voluta da bomba seguiu os passos de 1 a 3 expostos na figura 5

Figura 5 – Processo de construção da voluta



Fonte: Autoral

Em seguida, iniciou-se a construção da geometria no *software* DESIGN MODELER®, etapa 4 da figura 5. Para construção da voluta nesse *software*, as dimensões de 10 seções transversais foram retiradas da geometria já construída anteriormente para que fosse possível interligá-las com o uso da ferramenta *Skin*. A figura 5, apresentada abaixo ilustra esquematicamente o processo.

À partir da figura 5, nota-se que das 10 seções retiradas, as seções de 2 a 8 estão espaçadas equidistantemente  $45^\circ$ . Já as seções 9 e 10, distanciam-se apenas em  $1^\circ$ . Essa foi uma estratégia adotada para garantir o formato interno circular da voluta.

A estratégia mencionada é necessária pois a ferramenta utilizada no programa DESIGN MODELER® não permite a configuração de um caminho que interligue as seções desejadas, de tal forma, que ao distanciar a mesma seção transversal em  $1^\circ$  garante-se que o interior da voluta apresente a forma circular de diâmetro 132 mm, conforme geometria da figura 4.

É importante destacar que, para que a função *Skin* do programa DESIGN MODELER® possa ser usada, todas as 10 seções ilustradas na figura 5 precisam ser divididas na mesma quantidade de segmentos. Esses segmentos são responsáveis pela interligação das seções transversais e formação da voluta, apresentada na etapa 4.

Após finalizar a geometria, inicia-se a construção da malha com o auxílio do *software* CFX-MESHING®. Para assegurar que a malha não promova divergências no resultado final ela precisa ser estudada. Sugere-se um refinamento em simulações consecutivas, até que se obtenha uma variação, no parâmetro escolhido para monitoramento, menor ou igual a 1% em pelo menos três simulações consecutivas.

Esse refinamento deve objetivar uma malha estruturada. Entretanto, caso não seja possível, elementos predominantemente hexaédricos formam uma malha mais concisa e regular. Em algumas simulações, ainda que não seja possível utilizar estes elementos de forma majoritária, uma alternativa pode ser a ferramenta *inflation*, que permite adensar camadas próximas às superfícies sólidas, buscando capturar o efeito de camada limite.

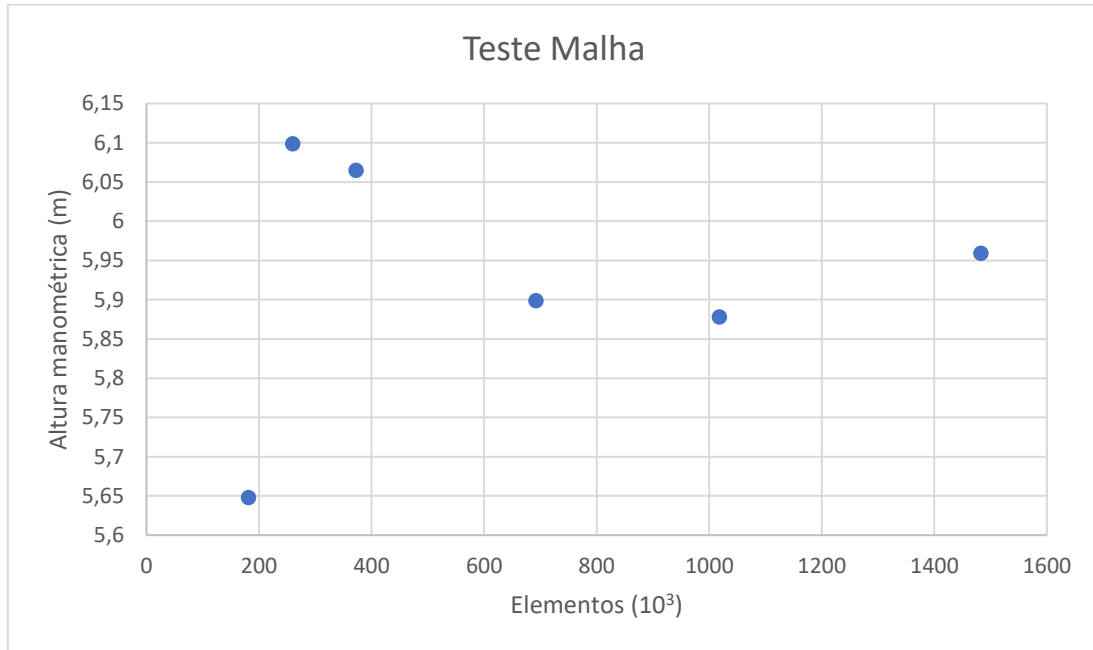
Após definidos os tipos de elementos que compõem a malha, o refinamento pode ser realizado no tamanho dos mesmos. É importante que os elementos tenham um tamanho suficiente para divisão do domínio computacional de forma quase homogênea. Além disso, existem regiões que necessitam de um refinamento especial, em geral em partes da geometria mais detalhadas, com maiores gradientes de propriedades do escoamento. É recomendado de modo prático que os elementos possuam dimensões com até aproximadamente 20% de diferença, para que a solução numérica das equações não seja prejudicada.

O refinamento da malha pode ser realizado de forma distinta entre as partes da geometria. No caso da bomba, o rotor não necessita de uma qualidade de malha elevada, já que o mesmo representa

um meio perturbador do fluido e não é um objeto de estudo.

Neste trabalho, a figura 6 apresenta o gráfico resultante do estudo de malha. Neste estudo o parâmetro utilizado para avaliar a qualidade da malha foi a carga manométrica na condição de bloqueio. O gráfico da figura 6 apresenta a carga da bomba, em metros no eixo x e a quantidade de elementos, em milhares de unidade no eixo y.

Figura 6 – Gráfico do teste da malha



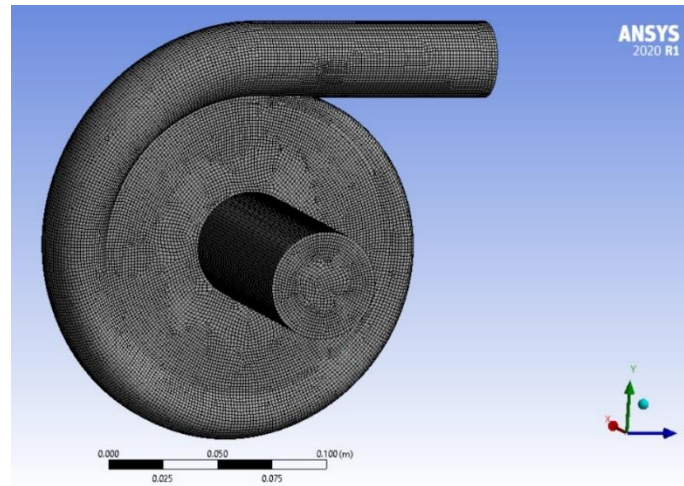
Fonte: Autoral

A condição de bloqueio é utilizada para determinar o ponto de *shut off*. Esta condição foi escolhida pois captura a máxima carga alcançada pela bomba e representa uma das condições mais críticas do escoamento no interior da bomba (com elevadas perdas de carga, recirculações e vazamentos internos).

Ao analisar o gráfico da figura 6, a malha obteve alterações menores ou iguais a 1% em duas simulações consecutivas. Entretanto, por conta da uniformidade da malha, predominantemente formada por elementos hexaédricos, e considerando o objetivo metodológico do artigo, não foram realizadas mais simulações.

A malha pode ser observada na figura 7. Formada por aproximadamente 700 mil elementos, a distribuição dos mesmos e as dimensões são capazes de dividir de forma uniforme o domínio computacional. Somado a esses fatores, os elementos hexaédricos contribuem para captura do escoamento sem grandes distorções.

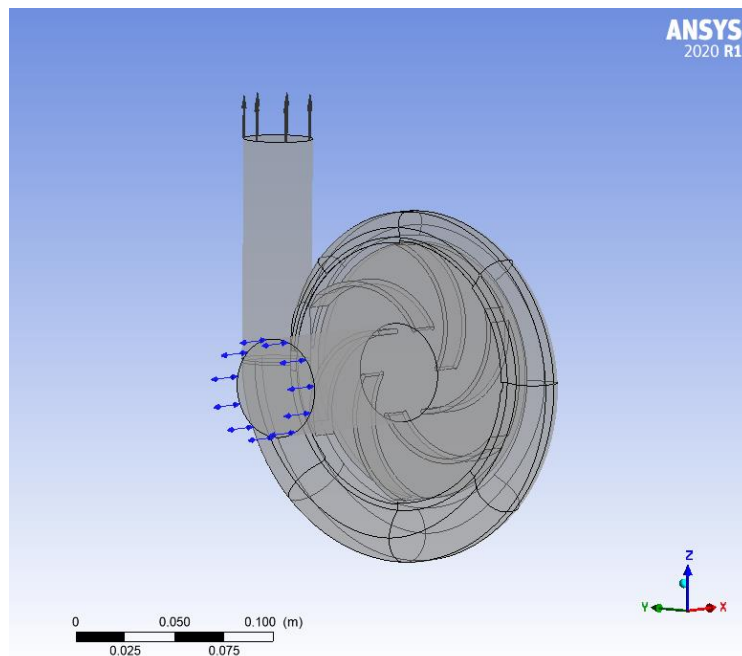
Figura 7 – Malha da bomba



Fonte: Autoral

O passo seguinte é a configuração das condições de contorno, sendo estas, nos casos estudados, retiradas do artigo cujos resultados foram utilizados para comparações (AYAD, A.F. et al, 2015). O domínio computacional foi dividido em 4 partes (entrada, saída, voluta, rotor) e pode ser observado na figura 8. Nele, o rotor é definido como um sólido imerso com movimento rotativo. A rotação do rotor corresponde a 1500 rpm.

Figura 8 – Domínio computacional



Fonte: Autoral

A seção de entrada foi definida como uma abertura, para que o *software* não se limitasse a capturar apenas escoamentos na direção da entrada, mas, caso as condições de contorno permitissem, capturar possíveis recirculações. Além disso, nessa seção foi determinada a pressão de 0 Pa na escala

efetiva, o que representa a pressão atmosférica local

À seção de saída, inicialmente foi imposta a condição de bloqueio, para que pudesse ser capturado o ponto de *shut off*. Para que isso acontecesse, a seção foi definida como uma parede, desta forma, o *software* não trabalha com possíveis passagens de fluido nesta região. Com isso, é possível calcular a pressão aproximada de saída na condição de bloqueio e a máxima carga da bomba.

Já a voluta, foi configurada como parede lisa sem escorregamento. Após definidas as partes do domínio computacional, adiciona-se características do fluido. Neste caso como o fluido em análise é a água em temperatura ambiente, o *software* já dispõe em sua biblioteca de todas as propriedades necessárias.

Caso a simulação contemple algum fluido não existente na biblioteca do *software*, as propriedades do mesmo podem ser inseridas manualmente. Esta é uma das vantagens da simulação computacional, a versatilidade que ela permite nas simulações.

Outrossim, o modelo de turbulência utilizado foi o *Shear Stress Transport (SST)*, o número máximo de iterações foi definido como 1000 e o alvo de resíduos máximos do processo foi estipulado como 0,0001.

Após definidas a malha e as condições de contorno do conjunto, inicia-se a coleta de dados para construção da curva da bomba. Nesta etapa, altera-se as condições de contorno da saída. Esta seção deixará a condição de bloqueio e passará para uma condição de saída, neste momento, é necessário inserir um parâmetro do escoamento, considerando que na entrada foi inserida a pressão, da-se preferência a vazão na saída.

Para a construção da curva da bomba, é necessário obter a carga manométrica alcançada em diferentes vazões. A estratégia adotada para eliminar a necessidade de alterar esses parâmetros manualmente, foi utilizar a ferramenta de parametrização. Desta forma, define-se na saída uma vazão em formato de expressão, assim, seus valores podem ser alterados de forma direta, fora do programa CFX PRE®.

A parametrização então ocorre em uma aba separada diretamente dentro do ANSYS®. Nela, é possível inserir todos os valores de vazão em que deseja-se simular em uma única etapa. Além disso, é possível selecionar todas as expressões desejadas e seus valores serão exibidos nesta mesma aba, de forma automática.

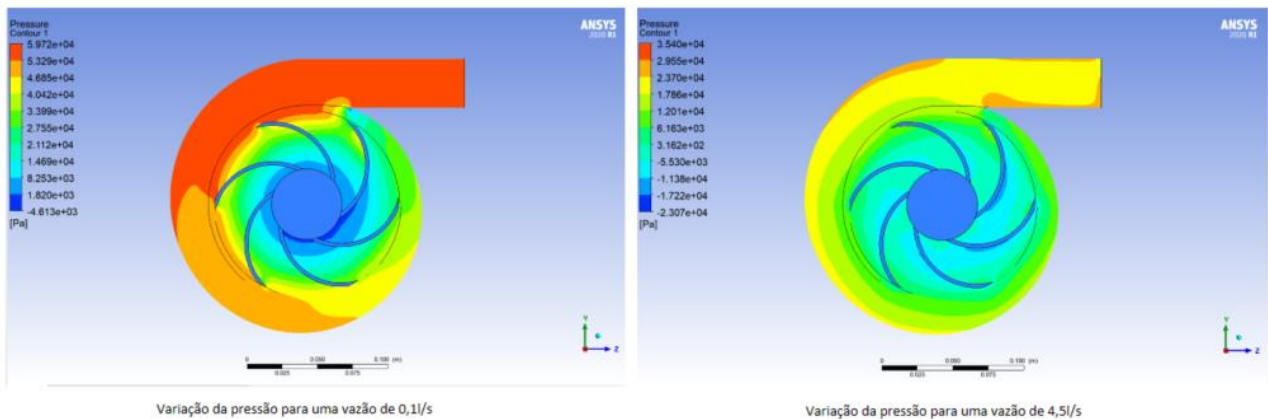
Deste modo, com todos os pontos calculados, a curva da bomba é construída numericamente. Neste estudo, a curva da bomba pode ser observada na figura 10. Somado a estes resultados, é possível extrair imagens e estudar o comportamento do fluido no interior da bomba.

Para isso, determina-se a condição de operação em que se deseja realizar a análise e ao utilizar o *software* CFX POST® obtém-se os resultados. Neste *software*, é possível extrair mapas de cores; distribuição ou valores pontuais de pressão, velocidade, temperatura, entre outras grandezas físicas;

linhas de corrente; animações que representam o escoamento; entre outros.

Na figura 9 observa-se a variação da pressão para uma vazão considerada de baixo valor para a bomba escolhida (0,1 L/s) e para uma vazão mais alta (4,5 L/s). Na imagem, nota-se a heterogeneidade da distribuição de pressão no exemplo de baixa vazão. Em geral, nas vazões mais altas, o *software* tende a capturar de forma mais precisa a variação de pressão pois, as perdas de carga são proporcionalmente menores se comparadas às variações da energia de escoamento (energia de pressão).

Figura 9 – Variação de pressão para duas vazões diferentes



Fonte: Autoral

Apresentadas e detalhadas as etapas de um processo de dinâmica dos fluidos computacional, é importante validar e analisar os resultados obtidos. Para isso, deve-se lembrar que para estudos de engenharia, existem três possíveis abordagens. São elas: a analítica, a numérica e a experimental.

A abordagem analítica, apesar de apresentar resultados distantes da realidade, por conta das simplificações aplicadas, é muito usada para pré-projetos. Neste estudo, a curva da bomba analítica foi construída a partir da aplicação das condições de contorno, apresentadas na tabela 1, à equação 8.

$$Hm = \frac{\omega^2 r_2^2}{g} - \frac{\omega}{2 \pi b_2 g \tan \beta_2} Q \quad (8)$$

Tabela 1 – Dados para construção da curva da bomba analítica

Dados do projeto	Dados utilizados nos cálculos
Rotação = 1500 rpm	$\omega = \frac{1500}{2\pi 60} = 157,08Hz$
Raio de saída = 65 mm	$r_2 = 0,065m$
Ângulo de saída = 20°	$\tan \beta_2 = 0,36$



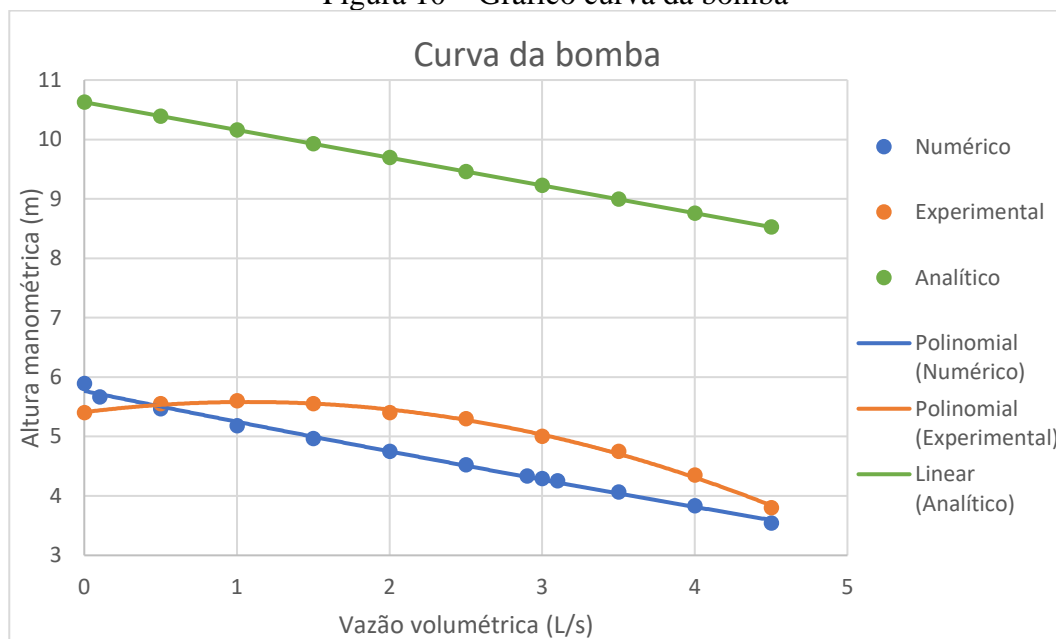
Fonte: Autoral.

A figura 10 também apresenta os resultados analíticos. Nela, é possível observar o distanciamento dos dados analíticos dos resultados numéricos e testes experimentais. Além disso, nota-se que a curva da bomba, quando construída de forma analítica possui o formato de reta descendente (para pás voltas para trás).

Os dados experimentais, apresentados na figura 10, foram retirados da literatura (AYAD, A.F. et al, 2015). É válido ressaltar que existem erros associados à transcrição dos dados da literatura para este estudo, já que o resultado estava apresentado em formato gráfico e desta forma, se fizeram necessárias estimativas dos valores.

Aliás, a curva da bomba experimental, assim como a numérica é construída por meio de uma linha de tendência polinomial de grau 2. Portanto, é possível comparar, considerando os distanciamentos esperados, os resultados analíticos, numéricos e experimentais, ao analisar o gráfico da figura 10.

Figura 10 – Gráfico curva da bomba



Fonte: Autoral

No gráfico indicado na figura 10 pode-se observar os resultados de estudos do comportamento da bomba centrífuga por meio das três abordagens. Para a análise analítica, o distanciamento dos resultados já era esperado, mas a captura do comportamento e ordem de grandeza se cumprem e podem ser úteis para análises preliminares.

Pode-se observar que para baixas vazões, a captura do comportamento de forma numérica se distancia mais da realidade do que em pontos de vazões mais altas. Infere-se que a maior discrepância

entre os resultados numéricos e experimentais na região próxima de vazão nula possa ser causada por recirculações internas não capturadas pelo modelo numérico ou transformação de parcelas úteis de energia mecânica em calor e energia interna do fluido não estejam sendo adequadamente capturadas pelo modelo de turbulência escolhido.

Ao analisar o resultado numérico comparado ao experimental, no caso estudado, nota-se que para o ponto de bloqueio e vazões mais baixas, a captura do comportamento da curva característica da bomba é menos precisa.

Apesar dessas dificuldades, as distâncias percentuais entre os resultados numéricos e experimentais permeiam entre 1,5 e 14%. O que, considerando os erros associados e as dificuldades de captura numérica, são valores dentro do esperado e que podem representar uma análise concisa.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo das bombas centrífugas e a utilização de ferramentas de projeto mais precisas é de fundamental importância porque permitem o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes.

Conhecidas também a distância do resultado obtido analiticamente da realidade e somadas a ela, as dificuldades de medições, custos, aparatos e precisão dos testes experimentais, a simulação computacional torna-se uma grande aliada para aos estudos das bombas centrífugas. Entretanto, para que a simulação computacional possa ser usada em projetos de bombas centrífugas, alguns cuidados durante as etapas de simulação devem ser tomados.

Boas práticas devem ser consideradas ao simular uma bomba centrífuga. Ademais, o resultado computacional é validado quando as três abordagens: numérica, experimental e analítica são comparadas neste estudo.

Os resultados foram apresentados e as etapas da simulação foram detalhadas desde a definição do domínio computacional e a construção da geometria até a extração dos resultados. O detalhamento da construção da geometria, apresentado na figura 5, demonstra a importância da construção da geometria em um *software* cujo conjunto de equações matemáticas formadas seja consistente. Essa construção, apesar de no primeiro momento parecer mais trabalhosa, traz vantagens significativas no decorrer da simulação.

A comparação com os resultados analíticos e experimentais demonstraram a grande distância entre a análise analítica e a realidade. Essa distância é explicada pelas simplificações necessárias para se obter algum resultado analítico, mas não invalida sua utilização em pré-projetos e cálculos preliminares.

Além disso a comparação dos resultados numéricos com os experimentais demonstra que a simulação é capaz de capturar o comportamento esperado da curva da bomba e a ordem de grandeza

dos resultados é próxima e dentro do esperado. Com variações de 1,5% até 14% a distância entre os resultados demonstra a fidelidade da análise numérica.

Um fato interessante e observado durante a pesquisa foi que a captura da altura manométrica da bomba em pontos de baixa vazão é menos precisa e o comportamento de curva não foi precisamente determinado.

A dificuldade observada nesse intervalo de vazões abre portas para pesquisas futuras que possam comprovar o motivo deste comportamento. Ou ainda, conseguir alguma forma de capturar numericamente de forma mais precisa esses e outros comportamentos em baixas vazões.

## REFERÊNCIAS

ANDERSON, J. D. Computational fluid dynamics: **The basics with applications**. New York: McGraw-Hill, 1995.

AYAD, A. F. et al. **Effect of semi-open impeller side clearance on the centrifugal pump performance using CFD**. Aerospace Science and Technology 47. 247 – 255. 2015

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

DING, H et al. **The influence of blade outlet angle on the performance of centrifugal pump with high specific speed**. Vacuum Journal. Volume 159. Pages 239-246, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0042207X18315689?via%3Dihub>. Acesso em 25 out. 2021.

FOX, Robert W et al. **Introdução à Mecânica dos fluidos**. Tradução Ricardo Nicolau Nassar Koury e Luiz Machado; contribuição especial de John C. Leylegian. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

LIU, H et al. **Application of modified k- $\omega$  model to predicting cavitating flow in centrifugal pump**. Water Science and Engineering. Vol 6. No 3, 331-339. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237015302489>. Acesso em 20 out. 2021.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2012. xv, 453 p., 2012.

PATERNOST, Guilherme. **Estudo experimental sobre bomba centrífuga operando com fluido viscoso e escoamento bifásico gás-líquido**. Dissertação de Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo – Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2021.

WEIDONG, C et al. **The influence of impeller eccentricity on centrifugal pump**. Advances in Mechanical Engineering – SAGE Journal. Vol 9. Jiangsu, China, 2017.

WHITE, Frank M. **Mecânica dos fluidos**. 8 ed. Porto Alegre: ArtMed, 2018.

XU, W et al. **Influence of wall roughness on cavitation performance of centrifugal pump**. Journal of Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 43. Article number: 314. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40430-021-03023-3#citeas>. Acesso em 24 out. 2021.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me sustentar e capacitar no decorrer do curso de Engenharia Mecânica, bem como, em toda minha vida. Agradeço aos professores que se dedicaram e em muito contribuíram para enriquecer minha caminhada.

Agradeço à toda minha família que me serviu como base para que eu pudesse concluir esse curso. Em especial aos meus avós, meus grandes incentivadores; minha mãe e meu marido, sempre determinados a cuidar da minha saúde física e mental, para que eu suportasse os desafios dessa fase intensa.

Agradeço à igreja em que sirvo com muita alegria, em especial ao pastor e sua família, que muito contribuem com meu crescimento pessoal e espiritual, e às crianças de Deus, amorosas e com uma alegria contagiante em todos nossos encontros.

Agradeço aos meus colegas de trabalho da Cummins Brasil, em especial meus líderes Rodrigo, Renan e Amanda. Estes, sempre compreensivos com minhas tarefas da faculdade e preocupados com o meu bem-estar.

Por fim, meus sinceros agradecimentos a todos que colaboraram para a conclusão desse trabalho, que representa a conclusão de um curso e de uma importante fase da minha vida.

Que Deus seja glorificado com esse trabalho, e todo o curso de Engenharia Mecânica realizado por mim, com a contribuição dessas pessoas queridas.