



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA



ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

VALIDAÇÃO DE MODELO PARA PREDIÇÃO DO COEFICIENTE DE DESCARGA DE UM
TANQUE ESFÉRICO POR DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

MATHEUS DANIEL PIEROZAN

Orientador: Prof. Dr. Pedro Rafael Bolognese Fernandes

Coorientador: Eng^oM.Sc. Cleiton Bittencourt da Porciúncula

Porto Alegre, Julho de 2011

Agradecimentos

Inicialmente gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Pedro Rafael Bolognese Fernandes pela orientação neste trabalho, pois seu apoio foi indiscutível para o bom andamento desse trabalho. Agradeço também, a Eng. M. Sc. Cleiton Bittencourt da Porciúncula pela co-orientação e ao Dr. Luiz Muniz pelo suporte técnico prestado. Com certeza este trabalho foi concluído com êxito devido ao auxílio técnico desse pessoal.

Agradeço muito a meus pais, Nereu e Helena, pela educação de qualidade que sempre me proporcionaram e, agradeço também, a meu grande irmão Tiago. Sem dúvida, o apoio incondicional prestado pelos meus familiares durante o curso de graduação em Engenharia Química foi fundamental para a conclusão do mesmo.

Não poderia deixar de agradecer a todos os professores aos quais fui aluno durante o curso de graduação, especialmente os professores do Departamento de Engenharia Química. Sou muito grato por eles terem me proporcionado um ensino de qualidade e sempre me incentivar pela busca do conhecimento. Dentre os vários professores que marcaram minha carreira acadêmica, gostaria de agradecer, em especial, ao Prof. Dr. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo.

Gostaria de agradecer também aos meus colegas de curso que me acompanharam durante toda a graduação e proporcionaram um ótimo ambiente. São eles: Allan Morcelli, Ígor Cadore, Jonas Granada, Júlia Frick, Péricles Pavoni, Rafael Wagner, Rodrigo Corsetti e Ulisses Pereira. Agradeço também aos meus amigos que dividiram apartamento comigo durante o curso de graduação, Evandro Perondi e Gustavo Pelisser. Sem dúvida, não posso esquecer-me de mencionar meus amigos-irmãos que ficaram em Caxias do Sul, minha terra natal, que mesmo de longe me apoiaram nessa conquista. São eles: Augusto Domingues, Márcio Pozzebon e Tiago Sbabo. Sem dúvida, essas pessoas ficarão marcadas em toda minha vida pela amizade e companheirismo.

Enfim, gostaria de agradecer a todos aqueles que sempre acreditaram no meu potencial e que de alguma forma colaboraram para eu chegar onde estou.

Sumário

Capítulo 1 – Introdução.....	1
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica e Fundamentos Teóricos.....	4
2.1 Estudos de Caso Similares.....	4
2.2 Cálculo do Coeficiente de Descarga.....	6
2.3 Escoamentos.....	8
2.4 Descrição da Ferramenta Computacional.....	9
2.5 Descrição dos Modelos Empregados.....	9
Capítulo 3 – Desenvolvimento do Modelo.....	12
3.1 Geração das Geometrias.....	12
3.1.1 Geometria Simplificada.....	12
3.1.2. Geometria Real.....	14
3.2. Testes com os Modelos de Regime de Escoamento.....	16
3.3. Testes de Malha.....	18
3.4. Determinação do CD na Geometria Real.....	19
Capítulo 4 – Resultados.....	22
4.1. Resultados dos Testes dos Modelos de Escoamento e de Malha.....	22
4.2. Cálculo do CD Real.....	26
4.2.1. Obtenção Experimental do CD.....	27
4.2.2. Resultados para Modelo de Turbulência Low Reynolds Number k-ε.....	27
4.2.3. Resultados para Modelo de Turbulência k-ε.....	29
Capítulo 5 – Conclusão e Sugestões de Trabalhos Futuros.....	34
Referências Bibliográficas.....	35

Lista de Figuras

Figura 1.1: Imagem da <i>Planta de Seis Tanques</i> localizada no Departamento de Engenharia Química da UFRGS.....	2
Figura 2.1: Tanque representando um escoamento não-viscoso.....	6
Figura 3.1: Representação da geometria simplificada gerada no software COMSOL Multiphysics.....	13
Figura 3.2: a) Detalhamento do joelho de 90° nas dimensões reais. b) Tanque H1 na sua geometria completa nas dimensões reais.....	14
Figura 3.3: Calota representando um nível arbitrário de água durante o escoamento em estado estacionário.....	15
Figura 3.4: Esquema representando os tipos de simulação possíveis de serem elaboradas utilizando a interface do COMSOL para escoamentos de fase única.....	16
Figura 3.5: Imagem mostrando em hachurado as superfícies de entrada e de saída da água no tanque H1 da <i>Planta de Seis Tanques Esféricos</i> . a) Porta de entrada; b) Porta de saída.....	17
Figura 3.6: Imagens comparando os tamanhos extremos de malha disponibilizadas no COMSOL: a) Malha “Tipo 1”; b) Malha “Tipo 9”.....	19
Figura 4.1: Imagens da geometria simplificada utilizando o modelo Turbulento k- ϵ em malha “Tipo 9”. a) Vetores de tamanho normalizado representando as direções do fluido durante o escoamento simulado; b) Linhas de corrente formadas durante o escoamento; c) Perfil de velocidades na superfície da parede; d) Secção transversal feita na região central do tanque representando o perfil de velocidades durante o escoamento.....	26
Figura 4.2: Comportamento do CD com o nível (modelo de escoamento de turbulência Low Reynolds Number k- ϵ).....	29
Figura 4.3: Comportamento do CD com os níveis (modelo de escoamento de turbulência k- ϵ).....	31
Figura 4.4: Comparativos entre os modelos de escoamento aplicados à geometria real. a) Secção transversal feita na região central do tanque apresentando o perfil de velocidades para o modelo de turbulência Low Re Number k- ϵ ; b) Secção transversal feita na região central do tanque para o modelo de turbulência k- ϵ	32
Figura 4.5: Coeficientes de descarga obtidos experimentalmente, utilizando o modelo de turbulência Low Re Number k- ϵ e k- ϵ em relação ao número de Reynolds.....	33

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Tamanhos de malhas e número de elementos por malha disponibilizadas pelo COMSOL aplicados à geometria simplificada.....	18
Tabela 3.2: Altura dos 5 níveis estacionários, bem como as vazões mássicas e velocidades médias aplicadas nas simulações.....	20
Tabela 3.3: Número de Reynolds calculado para cada nível estacionário.....	20
Tabela 3.4: Número de elementos por malha “Tipo 8” aplicada ao domínio para cada nível estacionário simulado.....	21
Tabela 4.1: Resultados obtidos nas simulações para os testes com os 9 tipos de malha, os 3 modelos de regime de escoamento (compressível e incompressível).....	24
Tabela 4.2: Apresentação dos valores CD obtidos experimentalmente para cada nível estacionário.....	27
Tabela 4.3: Resultados obtidos nas simulações utilizando o modelo turbulento k- ϵ para os 5 níveis estacionários. (Malha “Tipo 8”).....	28
Tabela 4.4: Valores de CD obtidos através das simulações para cada nível estacionário.....	28
Tabela 4.5: Resultados das simulações utilizando o modelo turbulento k- ϵ para os 5 níveis estacionários. (Malha “Tipo 8”).....	30
Tabela 4.6: Valores de CD simulados para cada nível estacionário.....	30

Resumo

Neste trabalho foi possível avaliar o desempenho do software COMSOL Multiphysics em representar o escoamento de água em um dos tanques esféricos da *Planta de Seis Tanques Esféricos* localizada no Departamento de Engenharia Química da UFRGS. O grande objetivo deste trabalho foi determinar, por meio de Simulação Fluido Computacional, o coeficiente de descarga (CD) do tanque superior desta planta para 5 níveis estacionários obtidos experimentalmente. Além disso, para complementar esse estudo foram feitos estudos adicionais sobre algumas ferramentas padrão que este software dispõe na sua interface.

Antes de calcular o coeficiente de descarga, foram realizadas 54 simulações para analisar 9 tipos de malhas de formato tridimensional tetraédrico e 3 modelos de escoamento para uma geometria simplificada. Dentre as malhas padrão disponíveis no COMSOL, o melhor resultado apresentado foi para malha mais refinada dentre as analisadas. Em conjunto com o teste das malhas, foi verificado qual o modelo de escoamento simulado apresentou resultados mais próximos dos experimentais. Nesse teste foram analisados os modelos de escoamento laminar, turbulento Low Reynolds Number $k-\varepsilon$ e turbulento $k-\varepsilon$. Sendo que para o teste dos modelos, o melhor resultado foi o escoamento turbulento $k-\varepsilon$, pois apresentou menor erro relativo entre a vazão mássica inserida implicitamente no COMSOL e a vazão mássica obtida através da simulação utilizando a malha mais refinada possível, dentre as opções padrão do COMSOL. O erro obtido nesta condição simulada foi de 0,9%.

Para determinar o coeficiente de descarga do tanque superior da *Planta de Seis Tanques Esféricos* foi elaborada uma geometria fiel às dimensões reais do tanque H1. Neste caso, foram avaliados dois modelos de escoamento nas simulações totalizando 10 simulações realizadas para os 5 níveis estacionários obtidos experimentalmente. Os modelos empregados nas simulações foram o turbulento Low Reynolds Number $k-\varepsilon$ e o turbulento $k-\varepsilon$. Os valores médios dos coeficientes de descarga calculados utilizando os resultados das simulações foram comparados com os coeficientes de descarga obtidos experimentalmente. O modelo que apresentou menor erro no cálculo do coeficiente de descarga foi o turbulento $k-\varepsilon$ cujo erro relativo ao valor experimental foi de 0,29%.

Capítulo 1

Introdução

Os fenômenos ocorridos na natureza sejam de maneira espontânea ou através da ação humana, podem ser representados por modelos matemáticos baseados nos princípios de conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento. A ciência dos fenômenos de transporte é muito utilizada para representar os efeitos físicos e químicos, servindo para o homem compreender melhor os processos naturais, tentar prevê-los ou até mesmo manipulá-los. Há diversos modelos matemáticos que descrevem com certa precisão os efeitos como o da gravidade, de radiação térmica, de reação química, de turbulência e etc. Contudo, sem o emprego de muitas simplificações se torna impossível obter a solução analítica das equações de conservação mencionadas anteriormente. Na maioria dos casos práticos, as simplificações efetuadas no modelo não são suficientes para se obter um resultado coerente e aplicável em uma situação real.

Utilizando-se de recursos computacionais, a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) surge como uma ferramenta útil para prever quantitativamente e qualitativamente o comportamento dos diversos fenômenos físicos presentes no dia-a-dia, principalmente, os que envolvem escoamento de fluidos. A Dinâmica de Fluidos Computacional engloba um conjunto de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais empregadas para realizar o estudo preditivo dos fenômenos de transporte no domínio do espaço e tempo. Assim, baseando-se nesses modelos, é possível prever campos de temperaturas, velocidades, pressão, concentração e etc.

A realização de simulações apresenta diversas vantagens quando comparada com a realização de testes reais, pois normalmente o desenvolvimento das simulações computacionais é muito mais barato e mais rapidamente reproduzido. Com o auxílio da simulação CFD é possível fornecer informações mais detalhadas do que as obtidas através de medições ou simular condições difíceis de serem geradas na prática. As principais aplicações das simulações por CFD estão nos campos da aerodinâmica, da hidrodinâmica, da análise de risco, do projeto de equipamentos e estruturas arquitetônicas. (FONTES *et al.*, 2005)

Percebendo as vantagens que a Dinâmica de Fluidos Computacional apresenta, essa ferramenta foi utilizada para compreender melhor o escoamento em um dos tanques da *Planta*

de Seis Tanques Esféricos localizada no Departamento de Engenharia Química da UFRGS. A Figura 1.1 mostra em detalhes a planta mencionada.

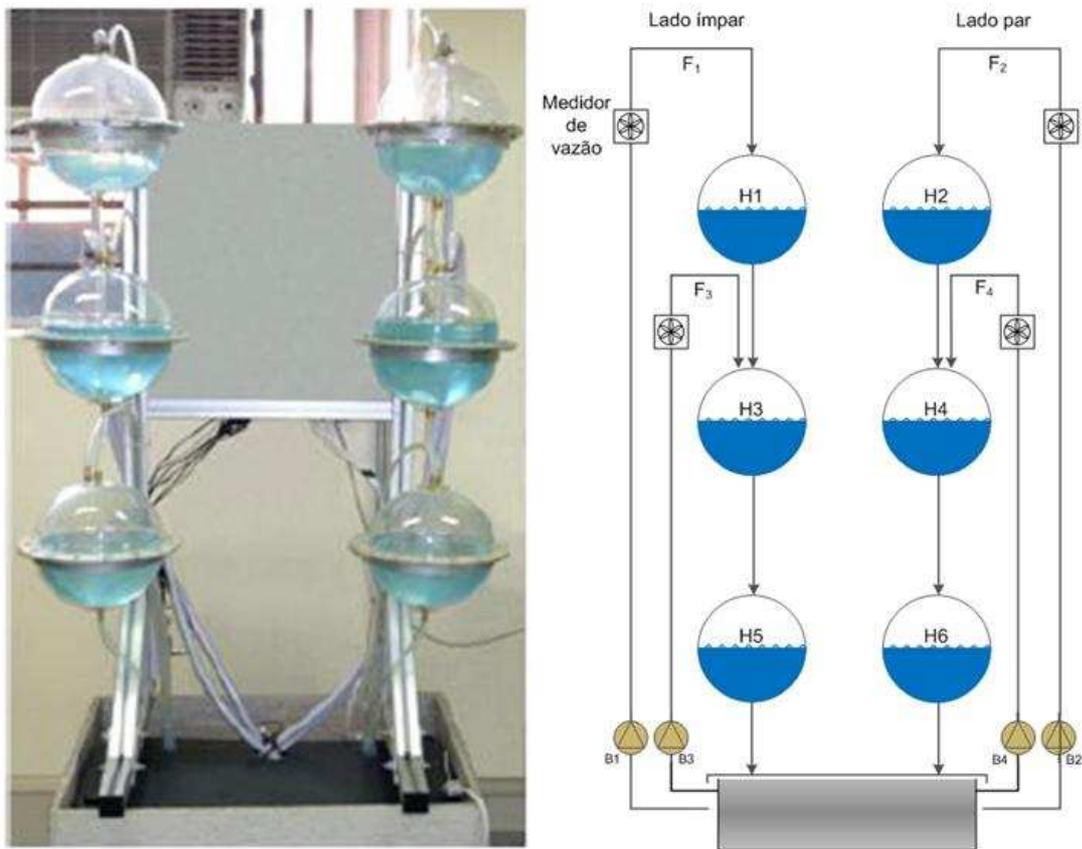


Figura 1.1: Imagem da *Planta de Seis Tanques* localizada no Departamento de Engenharia Química da UFRGS.

Para realizar a modelagem fenomenológica dessa unidade e, conseqüentemente, controlar os níveis dos tanques da planta representada pela Figura 1.1, é necessário obter os coeficientes de descarga (CD) dos tanques. Uma maneira de se obter esses parâmetros é através da equação do balanço de massa aplicada na condição de estado estacionário, assim os coeficientes de descarga podem ser obtidos experimentalmente relacionando níveis e vazões estacionárias (Paim, 2009). Cabe salientar que o coeficiente de descarga (ou vazão) é de interesse prático em muitas outras situações envolvendo fluxo através de uma restrição, por exemplo, no escoamento em válvulas, placas de orifício, bocais, etc...

Em função da importância do coeficiente de descarga e da dificuldade na obtenção de medidas precisas, foram realizadas simulações CFD do tanque H1 apresentado na Figura 1.1. O objetivo principal deste trabalho foi construir e validar um modelo que represente o

coeficiente de descarga do tanque H1 para os diferentes níveis estacionários. Para a determinação deste parâmetro através de simulações foi utilizado o software COMSOL Multiphysics. Além disso, foram realizados testes complementares, envolvendo condições mais simples, para auxiliar a compreender melhor o funcionamento desta ferramenta computacional.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica e Fundamentos Teóricos

2.1 Estudos de Caso Similares

A determinação precisa do coeficiente de descarga é importante e, em alguns casos, imprescindível no estudo de escoamentos de fluidos. O objetivo deste Capítulo é apresentar alguns casos em que este coeficiente foi determinado experimentalmente e verificado por modelagem computacional.

Um caso interessante de aplicação de CFD para o cálculo do CD foi a avaliação feita foi com relação à eficiência de um equipamento. Galerias pluviais são comumente empregadas nas linhas de esgoto em cidades dos Estados Unidos e sua operação depende do volume de esgoto que é gerado pelas residências, bem como pela quantidade de água que é gerada pelas chuvas ou pelo derretimento de neve. Durante a época de seca ou de poucas chuvas, praticamente toda água consegue ser captada pela rede de esgotos e é enviada à estação local de tratamento. Contudo, quando as chuvas se tornam mais intensas, a rede de esgoto não comporta o volume de água gerado e envia parte do esgoto pluvial para o afluente mais próximo. Essa medida faz com que a estação de tratamento não seja sobrecarregada de efluentes e possa trabalhar dentro da faixa de operação a qual foi projetada. Entretanto, antes de ser enviado à rede de esgotos, o efluente gerado pelas residências é destinado aos tanques de captura das próprias casas e prédios, para assim, ser enviado às tubulações de esgoto públicas. É nesses reservatórios onde são instalados os chamados reguladores de vazão, que são dispositivos que atuam sobre a vazão de esgoto com o intuito de controlar a quantidade de água que é destinada das residências para as galerias pluviais. A aplicação deste tipo de equipamento é feita para evitar sobrecarga sobre a rede de esgoto quando ocorrem chuvas intensas ou rápido derretimento de neve. Esse dispositivo é importante, pois caso haja sobrecarga de efluentes líquidos nas tubulações públicas ele pode evitar o refluxo do esgoto para as residências. No mercado há basicamente dois tipos de reguladores de vazão: o primeiro tipo de regulador de vazão funciona basicamente como uma câmara que retém o líquido por um curto período de tempo e, após, libera fluido por pequenas aberturas que tem como função controlar sua vazão; o segundo tipo é regulador de vazão do tipo vórtice e como

o nome já diz, o fluido entra em uma câmara helicoidal seguido de repentinas expansões e contrações fazendo com que o fluido perca energia de pressão. (LEÓN *et al.*, 2009)

Segundo León *et al* (2009), a ação do regulador de vazão tipo vórtice é mais eficiente do que os orifícios do outro regulador de vazão mencionado, justamente por ser menos suscetível a entupimento e, por esse motivo, é o mais utilizado nos centros urbanos americanos. Entretanto, não se tinha nenhuma informação sobre o escoamento no interior desse regulador de vazão, muito menos sobre limite máximo de vazão que este equipamento suportava e por esses motivos, foi objeto de estudo. O alvo da pesquisa era a obtenção do coeficiente de descarga desse dispositivo em diferentes condições, para assim, esse fator ser aplicado em modelos hidráulicos e hidrológicos para realizar a predição das vazões apresentadas pelo regulador de vazão tipo vórtice. Para validar o modelo de León *et al* (2009), foram realizados experimentos em um tanque de captura apresentando dimensões reais e ao mesmo tempo foi modelado o mesmo sistema usando CFD para confirmar os dados obtidos nos experimentos.

Além do caso mencionado anteriormente, o emprego do coeficiente de descarga também é importante em válvulas de alívio que são muito utilizadas em tubulações industriais, pois seu uso é fundamental para que uma linha de transporte de fluidos possa operar em segurança. Esses dispositivos são utilizados nas situações de escoamentos de líquidos ou gases conduzidos sob altas pressões nas tubulações. Quando o fluido é um gás ou vapor de água, as válvulas projetadas para controlar a pressão são referidas como *safety valves* (PSV). Entretanto, quando a aplicação dessas válvulas é feita para líquidos, são chamadas de *relief valves* (PRV). Há também, as válvulas de segurança que podem ser aplicadas para os dois tipos de fluidos, compressíveis e incompressíveis, e esse dispositivo de segurança comumente é chamado de *safety relief valves*. Esse último dispositivo pode ter dois tipos de abertura: repentina e total ou proporcional ao aumento da pressão. Na segunda categoria da *safety relief valves*, encontram-se as válvulas com alívio proporcionado por mola, as quais o acionamento é realizado automaticamente pela ação do próprio escoamento do fluido. A mola funciona como um dispositivo controlador de pressão nos dutos, pois abre conforme excesso de pressão projetado para a linha, descarregando o fluido, e se fecha quando a pressão é reestabelecida à condição de trabalho. (ORTEGA *et al.*, 2008)

No trabalho de Ortega *et al* (2008), foi possível confirmar a estreita relação entre as características do escoamento dos fluidos que passam pela válvula de alívio de mola e o coeficiente de descarga para as diferentes aberturas da mesma. Entendo melhor essa sinergia, é possível aumentar o rendimento dessas válvulas, aperfeiçoando os projetos de

$$Q = U_m A_m = U_n A_n \quad (1)$$

$$Z_m + \frac{U_m^2}{2g} + \frac{P_m}{\rho g} = Z_n + \frac{U_n^2}{2g} + \frac{P_n}{\rho g} \quad (2)$$

Q é a vazão, A_m e A_n são as seções transversais, U_m e U_n são as velocidades dos escoamentos sobre a linha de referência, Z_m e Z_n são as distâncias verticais até o nível de referência, P_m e P_n são as pressões externas em ambos pontos de referência, ρ é a massa específica do fluido e g é a aceleração da gravidade.

A partir da Equação 2 serão apresentados os passos para a definição do coeficiente de descarga, conforme apresentado por Daugherty e Franzini (1965). Nesta equação, P_m e P_n apresentam o mesmo valor de pressão que é a pressão de 1 atmosfera e U_m como foi descrita anteriormente pode ser considerada próxima de zero (consideração de nível constante). Além disso, pode-se definir a distância H_o pela Equação 3.

$$H_o = Z_m - Z_n \quad (3)$$

Então, fazendo as simplificações mencionadas na Equação 2 e agrupando as Equações 2 e 3, chega-se à Equação 4.

$$\frac{U_n^2}{2g} = H_o \quad (4)$$

O resultado da Equação 4 pode ser aplicado em todos os pontos da *vena contracta*. Então, a notação da velocidade no ponto N pode ser alterada para U_o que é a velocidade ideal no plano da *vena contracta* obtendo-se a Equação 5.

$$\frac{U_o^2}{2g} = H_o \quad (5)$$

Entretanto, para o escoamento real deve ser considerada a energia perdida devido ao atrito com as paredes do tanque e devido à passagem do fluido pelo orifício. Com isso, percebe-se que a verdadeira velocidade é menor do que U_o . Chamando de U_c a velocidade real no plano da *vena contracta*, pode ser gerada a Equação 6.

$$\frac{U_c^2}{2g} = H_c \quad (6)$$

Assim, a vazão ideal de descarga pode ser definida como a velocidade ideal sem nenhuma redução de área, conforme expresso na Equação 7.

$$Q_o = U_o A_o \quad (7)$$

A Equação 8 apresenta a definição do coeficiente de descarga C_D o qual é a razão da vazão volumétrica real de descarga do jato pela vazão volumétrica ideal de saída sem nenhum efeito de perda de energia cinética durante seu escoamento.

$$C_D = \frac{Q}{Q_0} = \frac{U_c A_c}{U_0 A_0} \quad (8)$$

Substituindo a Equação 5 na Equação 7 e, após realizado esse passo, substituindo na Equação 8, tem-se a Equação 9, que é forma mais usual de apresentação do C_D .

$$C_D = \frac{Q}{A_0 \sqrt{2gH_0}} \quad (9)$$

2.3. Escoamentos

Para definir qual é o regime de escoamento que o fluido apresenta quando está em movimento, é necessário calcular o número de Reynolds (Re). Este parâmetro é obtido a partir da análise dimensional do problema de escoamento de fluidos que leva em consideração algumas propriedades dos fluidos como: massa específica ρ , velocidade do fluido U , viscosidade μ e o comprimento característico L , que varia conforme a geometria do campo de escoamento. Fazendo uma análise sobre as propriedades descritas anteriormente, o número de Reynolds pode ser representado pela Equação 10. (FOX e McDONALD, 2001)

$$Re = \frac{U\rho L}{\mu} \quad (10)$$

Fazendo uma análise mais detalhada sobre o número de Reynolds, pode-se perceber que ele representa a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas atuando sobre um elemento de fluido. Quando Re calculado para tubos for baixo, ou seja, apresentar valores menores que 2300, as forças viscosas dominam o escoamento e tendem a amortecer as perturbações geradas, por exemplo, por irregularidades na superfície do tubo. Esta condição determina o escoamento como sendo laminar. Quando o número de Reynolds apresentar valores acima de 7000 há o predomínio das forças de inércia, ou seja, o campo de escoamento está submetido há um estado caótico e o escoamento é denominado turbulento.

Na faixa no número de Reynolds entre o regime laminar e turbulento, nesse intervalo considera-se como sendo regime de transição. Esta faixa de transição foi determinada a partir de observações experimentais, resultado da aplicação de diferentes condições de escoamento para uma tubulação com comprimento característico igual ao diâmetro interno do tubo, D . Os resultados obtidos mostraram que para um escoamento completamente desenvolvido, o fluxo laminar ocorre em Re abaixo de 2300 e o fluxo turbulento ocorre quando o número de Reynolds apresenta valores maiores que aproximadamente 4000, embora se aceite usualmente o valor de 7000 como típico. (BATCHELOR, 1967; HOLMAN, 2002)

2.4. Descrição da Ferramenta Computacional

Para a modelagem do tanque H1 da *Planta de Seis Tanques Esféricos* foi utilizado o software COMSOL Multiphysics. Este software de CFD é uma ferramenta “off-the-shelf”, ou seja, que não exige profundo conhecimento matemático ou de análise numérica para modelar e resolver problemas relativos à área de engenharia. A arquitetura deste programa permite sintetizar modelos convencionais que descrevam os fenômenos em um único tipo de modelo físico proposto pelo software, além de resolvê-lo de maneira acoplada e simultânea. Para representar com perfeição um caso real no COMSOL, ele permite determinar os materiais, bem como suas propriedades, além de cargas, fontes, fluxos que estão envolvidos no fenômeno físico. Essas variáveis podem ser aplicadas diretamente aos domínios, fronteiras, bordas, pontos do sólido ou líquido em questão. A exatidão desejada para a solução depende do refinamento da malha aplicada à geometria envolvida no modelo, ou seja, quanto maior o número de malha, mais discretizada será a geometria e mais pontos no domínio serão utilizados para o *solver* realizar os cálculos. Esta medida aumenta a exatidão da solução, entretanto, eleva o esforço computacional. O formato de malha padrão do COMSOL é a geometria tetraédrica, entretanto este software permite ao usuário configurar a malha da maneira desejada. Quando definidas as condições envolvidas na simulação como geometria, variáveis, fenômeno físico e/ou químico e número de malha, este software permite implementar diversos tipos de estudos de caso como: estacionário e transiente, linear e não linear, entre outros. Para resolver as simulações, os diversos *solvers* numéricos do COMSOL utilizam o método dos volumes finitos, que consiste na discretização do domínio em inúmeros volumes de controle sobre os quais serão realizados balanços de massa, quantidade de movimento e energia a partir das equações diferenciais parciais, para a predição quantitativa das características dos escoamentos. A análise dos resultados pode ser feita através da visualização dos perfis obtidos no próprio domínio modelado ou através do valor exato calculado em qualquer ponto, borda ou fronteira da geometria modelada. (COMSOL, *Multiphysics*, 2010)

2.5. Descrição dos Modelos Empregados

O COMSOL disponibiliza modelos para serem aplicados a escoamentos de uma fase: modelo laminar e modelo turbulento. Todos os modelos mencionados e aplicados a escoamentos de fase única são baseados nas equações de Navier-Stokes cuja forma mais geral

pode ser representada pela Equação 12. Já a Equação 11 é a equação da continuidade e representa a conservação de massa total.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (11)$$

O ρ é massa específica do fluido, t é o tempo, p é a pressão e \mathbf{u} é o vetor velocidade (conforme sistema de coordenadas adotadas). A Equação 12 representa a conservação de quantidade de movimento.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}] + \mathbf{F} \quad (12)$$

O $\boldsymbol{\tau}$ é o tensor das tensões viscosas, \mathbf{F} é o vetor de forças de volume e \mathbf{I} é o vetor unitário. Os dois tipos de escoamento citados anteriormente serão descritos de modo qualitativo a seguir, sem detalhamento matemático, pois tal desenvolvimento foge do enfoque do trabalho.

O modelo de escoamento laminar é baseado diretamente na forma compressível da equação de Navier-Stokes, sendo que na configuração básica, este modelo permite simular escoamento de fluidos Newtonianos. Este modelo também pode ser aplicado para escoamentos incompressíveis onde a massa específica do fluido pode ser considerada constante. Na teoria, a mesma equação descreve o escoamento laminar, e a princípio, o escoamento turbulento. Na prática, entretanto, a resolução do número de malha requerido para simular turbulência com o modelo laminar torna essa aproximação impraticável (para computadores com pouca capacidade de processamento).

O modelo de escoamento turbulento também utiliza a equação de Navier-Stokes como base de cálculo para efetuar as simulações. Apesar de ser considerada a mesma quantidade de elementos no número de malha, são requeridas equações complementares para obter um resultado mais preciso quando ocorrem os efeitos de turbulência durante o escoamento. A inserção de equações ao modelo turbulento, com intuito de capturar ampla gama de escalas do escoamento, ocasiona maior número de graus de liberdade a serem resolvidos em relação ao modelo laminar.

Para obter informações sobre os escoamentos foi utilizado um modelo incluso no módulo CFD do COMSOL que é o Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). Quando o escoamento se torna turbulento, todas as quantidades a serem medidas flutuam no tempo e no espaço. Entretanto, a obtenção de cálculos com altas precisões geralmente não compensa o extremo esforço computacional requisitado para se obter informações tão detalhadas sobre essas variações. Uma média dos valores calculados já é suficiente para obter boas

aproximações sobre o escoamento e, por esse motivo, utiliza-se o modelo RANS nas simulações para escoamentos de fluidos incompressíveis em regime turbulento.

Quando o escoamento for considerado compressível e o modelo RANS é aplicado à forma compressível de equação de Navier-Stokes, os termos do produto da massa específica e dos vetores velocidade precisam ser modelados. Neste caso, devem ser consideradas as flutuações das quantidades no espaço e no tempo, logo o esforço computacional é maior e o resultado das simulações nem sempre é satisfatório.

Após determinar se o escoamento é compressível ou incompressível e utilizar o modelo RANS, a interface no COMSOL permite utilizar dois modelos de turbulência padrão: k- ϵ ou Low Reynolds Number k- ϵ .

O modelo de turbulência k- ϵ é um dos mais utilizados em aplicações industriais e introduz duas equações adicionais de transporte e duas variáveis dependentes: a energia cinética turbulenta, k, e a taxa de dissipação da energia turbulenta, ϵ . Este modelo baseia-se em várias premissas, a mais importante é que o número de Reynolds é alto o suficiente. As premissas assumidas por este modelo interferem na sua precisão, contudo, em alguns casos, vale a pena abrir mão de resultados exatos devido aos recursos computacionais necessários para obtê-los.

O outro modelo de turbulência, Low Reynolds Number k- ϵ , é utilizado em casos em que os efeitos de parede são considerados importantes e significativos para se obter bons resultados. Esse modelo de turbulência adapta equações de transporte turbulentas pela inserção de funções de amortecimento, por esse motivo sua solução apresenta grande instabilidade e frequentemente falha em encontrar a solução. (COMSOL, *CFD Module*, 2010)

Capítulo 3

Desenvolvimento do Modelo

Utilizando o software de CFD COMSOL Multiphysics, foi possível modelar o tanque H1 da *Planta de Seis Tanques Esféricos* e obter os resultados necessários para calcular e validar o modelo de predição do coeficiente de descarga, CD. Inicialmente foram realizados alguns estudos preliminares antes de se realizar as simulações com a geometria real do tanque H1 para a realização do cálculo do CD. Essas análises iniciais consistiram em avaliar os resultados dos modelos de escoamentos oferecidos pelo COMSOL e em testes de refino de malha para verificar as diferenças entre os resultados obtidos para a mesma condição de escoamento.

3.1. Geração das Geometrias

O COMSOL permite aplicar à geometria estudada modelos fenomenológicos, condições de entrada e de saída de fluxo de massa, condições de contorno e outros parâmetros necessários para efetuar as simulações. Entretanto, para compreender como são especificados e implementados estes parâmetros é imprescindível compreender a definição de domínio. O domínio é o espaço físico que limita o escoamento do fluido, nele podem ser inferidas todas as condições ambientais ocorridas no caso real como temperatura, pressão, perfil de velocidades, gravidade e etc., além de definir o percurso que o fluido irá escoar. A geração do domínio, ou seja, do sistema pode ser feita a partir de formas geométricas tridimensionais como cilindros, esferas, blocos quadrados, cones, toróides, elipsóides e etc.

As geometrias geradas neste estudo foram feitas para o escoamento de fase única, então é importante compreender que o fluido ocupa todo o espaço do domínio gerado e obviamente só escoar na região interna como um contínuo.

Neste trabalho foram estudadas duas geometrias distintas: a geometria simplificada e a real. Ambas foram geradas de maneira diferente e com propósitos diferentes que serão elucidados nas Seções 3.1.1 e 3.1.2..

3.1.1. Geometria Simplificada

A geometria simplificada foi gerada com o intuito de realizar os testes iniciais para verificar as diferenças apresentadas entre as diversas condições de escoamento disponíveis na interface do COMSOL, além de permitir uma análise sobre o refino de malha. Esses testes serão descritos em detalhes nas Seções 3.2 e 3.3, respectivamente.

A justificativa para a utilização de uma geometria mais simples para realizar os testes mencionados anteriormente é o grande número de simulações, com isso, é possível reduzir o tempo necessário para atingir a convergência e obter o resultado final das simulações. Por esse motivo foi excluído o bocal de entrada feito com um joelho 90° de PVC que está presente no tanque, conseguindo-se com esta estratégia obter os dados necessários para realizar as análises em menor tempo.

Nesta geometria, foi considerado todo o domínio constituído por água, pois o tipo de escoamento implementado foi o de fase única e nesse caso, durante o escoamento do fluido, o efeito de parede considerado foi de não-deslizamento.

A Figura 3.1 mostra em detalhes a geometria do domínio utilizado nas primeiras simulações realizadas.

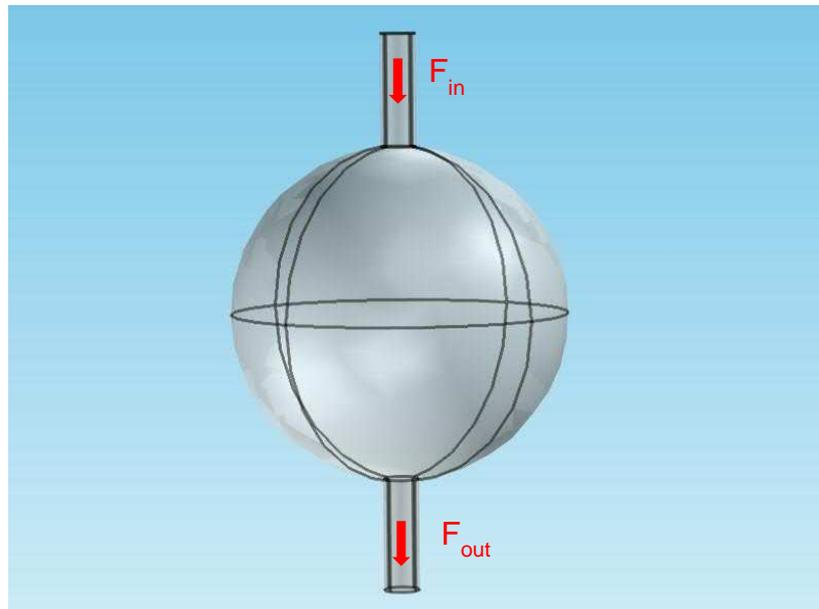


Figura 3.1: Representação da geometria simplificada gerada no software COMSOL Multiphysics.

Nesta geometria foi considerado o diâmetro do tanque esférico sendo de 24 centímetros (cm), os diâmetros dos tubos de entrada da vazão volumétrica de água, intitulada

F_{in} , e da vazão volumétrica de saída, intitulada de F_{out} , sendo de 2,54 cm. Nesta configuração foi utilizado comprimento de ambos os tubos, de entrada e de saída, de 8 cm cada um.

3.1.2. Geometria Real

A geometria real foi empregada para aproximar os dados experimentais com a maior precisão possível. Para a confecção da geometria real do tanque H1, as medidas foram extraídas da *Planta de Seis Tanques Esféricos*. A Figura 3.2 mostra em detalhes na imagem o joelho de 90° e o tanque H1 na forma completa.

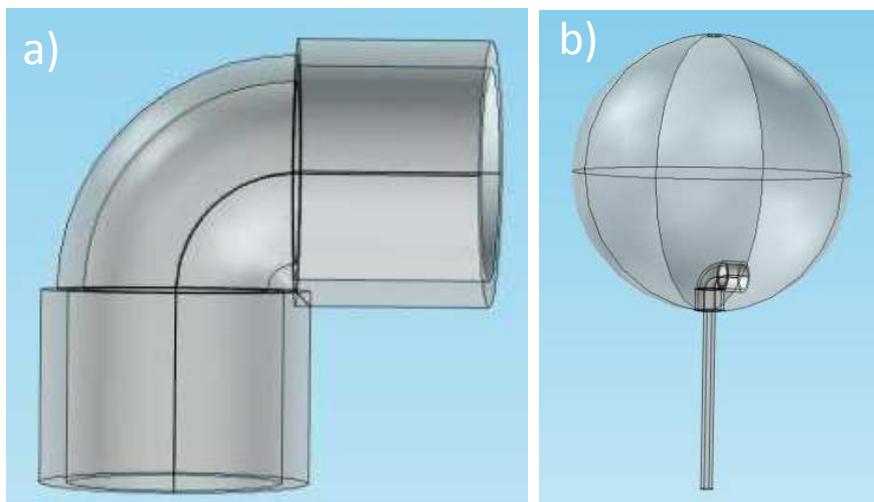


Figura 3.2: a) Detalhamento do joelho de 90° nas dimensões reais. b) Tanque H1 na sua geometria completa nas dimensões reais.

Os parâmetros utilizados para a criação da geometria completa do tanque H1 foram: diâmetro do tanque esférico de 22,5 cm e comprimento do tubo de saída de 14,6 com diâmetro de 1 cm. As dimensões utilizadas para a criação do joelho de PVC de 90° foram obtidas a partir de um joelho comum de PVC de ½ polegada.

Cabe salientar que para a geometria real também foi utilizada a mesma estratégia da geometria mais simples em relação ao domínio ser constituído por água e a velocidade do fluido ser considerada zero nas paredes. A fim de manter essa premissa, há uma peculiaridade na geração da geometria real deve ser elucidada para a compreensão de como ela foi implementada no COMSOL. Essa geometria foi gerada de maneira similar à simplificada, ou seja, pela união geométrica de uma esfera com um cilindro para proporcionar o meio contínuo para o fluido escoar. O joelho de PVC de 90° foi gerado separadamente como mostrado na

Figura 3.2. A partir da união do cilindro com a esfera para formar o meio contínuo formado, foi subtraído o espaço que as paredes do joelho de PVC ocupam na geometria real. Com esse artifício, foi possível gerar o caminho real para o fluido escoar, no entanto, sem a necessidade de gerar um objeto relativo ao joelho de PVC na geometria. O ganho obtido pela implementação dessa estratégia foi diminuir o número de elementos na malha, pois seria necessário definir o material do joelho, bem como a malha que seria obrigatoriamente gerada para efetuar a simulação. Além disso, foi possível manter a mesma condição de contorno em todas as fronteiras, as quais apresentam condição de não-deslizamento.

Como o cálculo do CD foi realizado a partir da vazão volumétrica de saída obtida dos níveis estacionários de água dentro do tanque, para representar o meio contínuo nas simulações foram utilizadas geometrias similares à que está representada pela Figura 3.3.



Figura 3.3: Calota representando um nível arbitrário de água durante o escoamento em estado estacionário.

As mesmas dimensões mencionadas para a Figura 3.2 foram utilizadas para elaborar a geometria apresentada na Figura 3.3. Para representar a entrada do fluido bem acima do joelho de PVC foi utilizada uma superfície (*inlet port*) de mesmo diâmetro do tubo de saída (1 cm). Os detalhes sobre a metodologia utilizada para o cálculo do CD serão apresentados com detalhes na seção 3.4.

3.2. Testes com os Modelos de Regime de escoamento

Os testes com os modelos de regime de escoamento foram realizados com o intuito de verificar os resultados que os diferentes modelos disponibilizados pelo COMSOL podem apresentar para uma mesma condição física. Este software, como foi mencionado no Capítulo 2, dispõe dos modelos laminar e turbulento para escoamentos, além de permitir considerar o fluido como sendo compressível ou incompressível. No caso do escoamento turbulento, ainda há a possibilidade de escolha entre o modelo de turbulência k- ϵ e o Low Reynolds Number k- ϵ . A Figura 3.4 apresenta uma hierarquia dos modelos de escoamento no CFD.

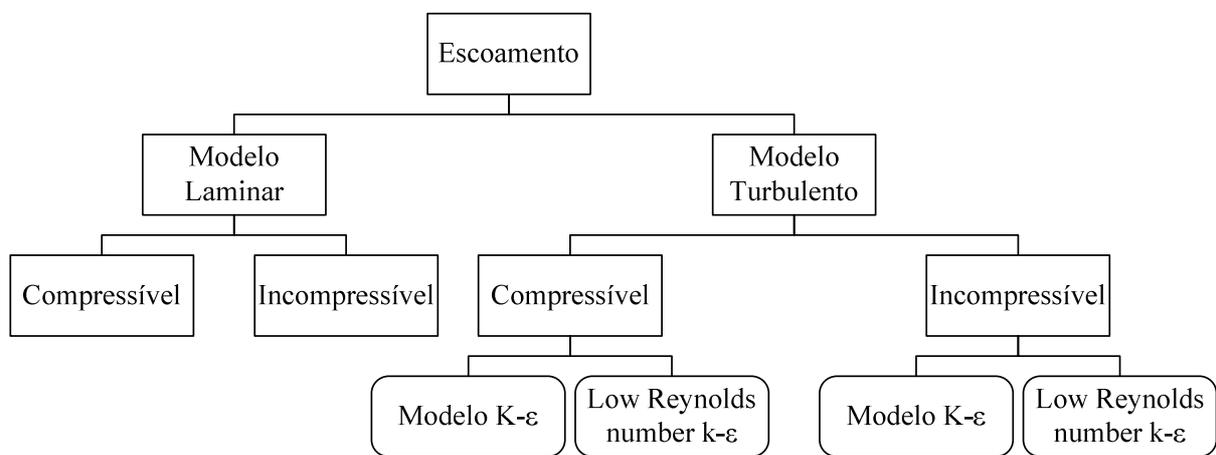


Figura 3.4: Esquema representando os tipos de simulação possíveis de serem elaboradas utilizando a interface do COMSOL para escoamentos de fase única.

Observando a Figura 3.4, percebe-se que para fazer uma avaliação completa dos modelos disponíveis é necessário realizar 6 simulações, ou seja, 3 simulações para escoamentos compressíveis e 3 simulações para o escoamento incompressíveis. Entretanto, para cada modelo pode ser variado número de elementos de malha, assim, o número de simulações realizadas aumenta significativamente. O detalhamento dos testes de malha realizados neste trabalho será mostrado na Seção 3.3.

Todas as simulações realizadas neste teste foram efetuadas com a geometria simplificada cuja representação já foi mostrada pela Figura 3.1. A condição estacionária aplicada para todas as simulações é a de vazão mássica máxima da *Planta de Seis Tanques Esféricos*, ou seja, 70 g.s^{-1} . Esta condição é, em estado estacionário, a situação em que o

tanque H1 está completamente cheio e com isso, justifica o fato do meio contínuo de escoamento da água ser o mesmo da geometria simplificada total do tanque. Sendo que em todas as simulações os escoamentos foram considerados isotérmicos cuja temperatura empregada foi a de 20°C. Além disso, o parâmetro da gravidade não foi empregado com o intuito de simplificar as simulações.

Para definir as condições de contorno do domínio em uma simulação de escoamento é necessário selecionar uma superfície de entrada e uma de saída do fluido. Nessa porta de entrada é necessário informar uma velocidade de entrada, V_{in} , e para a porta de saída (*outlet port*) do sistema é indicado inserir como condição de contorno um valor de pressão. Esse artifício permite ao fluido entrar com uma condição definida, escoar pelo percurso desejado e sair da forma imposta pela condição de pressão, que neste caso é a condição próxima à do ambiente. Por questões computacionais, essa estratégia facilita a atuação do *solver* para a obtenção dos resultados. É importante mencionar que esta estratégia foi utilizada tanto na geometria simplificada quanto na geometria real, a ser descrita em seguida. A Figura 3.5 apresenta as superfícies de entrada e de saída empregadas nas simulações feitas para a geometria simplificada.

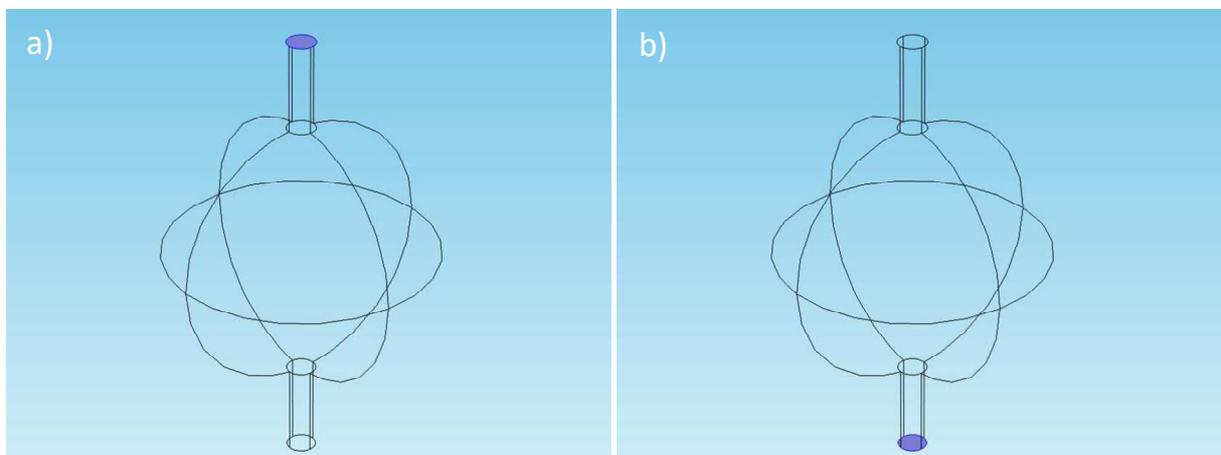


Figura 3.5: Imagem mostrando em hachurado as superfícies de entrada e de saída da água no tanque H1 da *Planta de Seis Tanques Esféricos*. a) Porta de entrada; b) Porta de saída.

Para rodar uma simulação, é necessário inserir o valor de velocidade de escoamento na seção transversal da porta de entrada. Entretanto, o parâmetro obtido experimentalmente foi a vazão mássica de entrada, $W_{in_{set}}$, de 70 g.s⁻¹ de água, então é necessário converter a vazão mássica de água em vazão volumétrica, Fin_{set} , e dividi-la pela área da secção transversal do

tubo de entrada para obter V_{in} . Essa conversão foi realizada, pois nesta versão do software não é permitido informar diretamente a vazão mássica desejada. Feito isso, a condição aplicada à porta de entrada foi a velocidade média, V_{in} , de $0,138 \text{ m.s}^{-1}$ e a condição aplicada à porta de saída foi a de 1 atmosfera. O número de Reynolds calculado para essa condição foi de 3505, o que caracteriza regime de transição.

3.3. Testes de Malha

Os testes das malhas foram realizados com cada modelo de escoamento mencionados na Seção 3.2, sendo empregadas as mesmas condições de escoamento, ou seja, vazão mássica máxima. O objetivo da realização deste teste é avaliar o desempenho das diferentes resoluções de malha padrão disponibilizadas no COMSOL, para assim, obter os resultados nas simulações. Para cada resolução de malha há um número de unidades geométricas tridimensionais que preenchem a geometria em questão, ou seja, quanto mais refinada a malha, maior é a quantidade de unidades tridimensionais ou “elementos”. Neste trabalho foi utilizada a malha com formato tetraédrico na geometria simplificada, pois é o formato padrão do software. Na Tabela 3.1 são apresentados todos os tamanhos de malha no modo padrão do COMSOL e que foram empregados neste trabalho.

Tabela 3.1: Tamanhos das malhas e número de elementos por malha disponibilizadas pelo COMSOL aplicados à geometria simplificada.

Tamanho de malha	Elementos
Tipo 9	277.458
Tipo 8	59.331
Tipo 7	18.276
Tipo 6	9.139
Tipo 5	4.881
Tipo 4	1.710
Tipo 3	1.232
Tipo 2	845
Tipo 1	223

É interessante ressaltar que a discretização do domínio independe do tipo escoamento que se deseja simular. O que varia é o número de graus de liberdade relativo às equações que os escoamentos empregados se baseiam. Observando-se a Tabela 3.1, percebe-se que para fazer uma avaliação completa de todos os modelos e malhas padrão disponíveis é necessário

realizar, para cada modelo, 9 simulações. Como foram apresentados 6 tipos de modelos que podem representar os escoamentos e 9 tamanhos de malha, percebe-se que foram realizadas 54 simulações.

Os testes de malha foram realizados iniciando pela malha “Tipo 1” até a malha “Tipo 9”. Com esta estratégia, o *solver* utiliza como base para a nova simulação os valores obtidos na simulação anterior. Empregando essa tática foi possível reduzir o tempo computacional e, em alguns casos, foi fundamental para a convergência de malhas mais refinadas. Neste trabalho não foi feita análise sobre o tempo de cada simulação, pois elas foram realizadas em computadores diferentes com processadores diferentes, dessa maneira, não é possível comparar o esforço computacional.

Para se ter uma ideia de como são distribuídos os tetraedros no domínio e a diferença do número de nós que cada malha apresenta, a Figura 3.6 mostra dois tipos de malhas utilizados nas simulações: a malha “Tipo 1” e a malha “Tipo 9”.

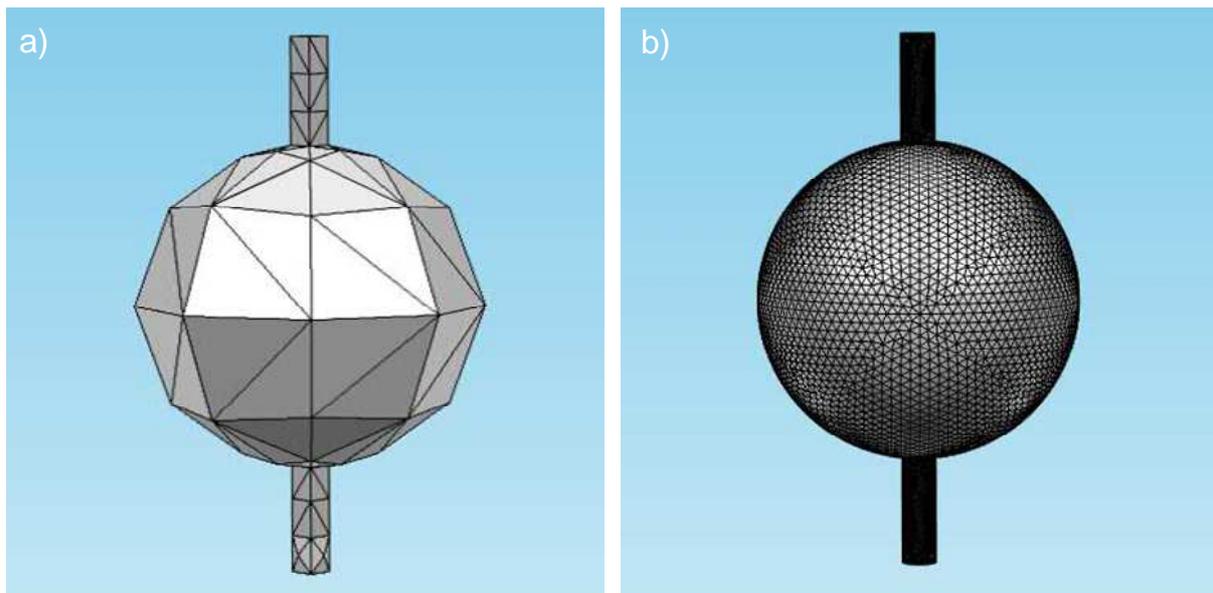


Figura 3.6: Imagens comparando os tamanhos extremos de malha disponibilizadas no COMSOL: a) Malha “Tipo 1”; b) Malha “Tipo 9”.

3.4. Determinação do CD na Geometria Real

A geometria mais próxima da realidade utilizada para calcular o CD foi apresentada, para um nível arbitrário, na Figura 3.3 da Seção 3.1.2. Para a determinação do CD neste trabalho foram feitas simulações para os 5 diferentes níveis estacionários que foram obtidos experimentalmente. Para cada nível estacionário no tanque, há uma vazão mássica de entrada

e, de forma semelhante ao caso da geometria simplificada, é necessário obter e inserir um valor de velocidade média de escoamento de água para a porta de entrada para cada um dos níveis estacionários. E como já foi mencionado, é necessário inserir a pressão na porta de saída, sendo de 1 atmosfera. Os níveis estacionários utilizados como condição de entrada nas simulações foram obtidos a partir dos experimentos realizados na *Planta de Seis Tanques Esféricos*, conforme Paim (2009). Os valores dos níveis estacionários, bem como das respectivas vazões mássicas e velocidades de entrada estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Altura dos 5 níveis estacionários, bem como as vazões mássicas e velocidades médias aplicadas nas simulações.

Nível (cm)	W_{in} (g.s ⁻¹)	V_{in} (m.s ⁻¹)
4,97	28,6	0,37
5,96	35,6	0,46
6,89	38,9	0,50
8,98	40,5	0,52
9,90	44,1	0,57

É importante frisar que a altura dos níveis estacionários apresentados na Tabela 3.2 é medida a partir da base do joelho de 90° até a superfície livre superior da calota esférica. Outra consideração importante de ser lembrada é o fato de se considerar a altura do tubo de saída que é de 14,6 cm para o cálculo dos coeficientes de descarga experimental e simulados.

Os modelos de escoamento empregados nas simulações para representar a vazão de água na geometria real do tanque H1 foram determinados a partir do cálculo do número de Reynolds no tubo de saída. Para o cálculo do Reynolds, a velocidade no tubo de saída foi considerada igual à velocidade de entrada, V_{in} , pois é regime de escoamento em estado estacionário. Além disso, foi considerado o número de Reynolds no tubo de saída devido ao fato da secção transversal ser constante ao longo desse tubo. A Tabela 3.3 apresenta os valores do número de Reynolds calculados a partir das velocidades médias experimentais apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.3: Número de Reynolds calculado para cada nível estacionário.

Nível (cm)	4,97	5,96	6,89	8,98	9,90
V_{in} (m.s ⁻¹)	0,369	0,458	0,501	0,521	0,567
Número de Re	3685	4585	5008	5209	5673

Analisando-se a Tabela 3.3, pode-se concluir que todos os escoamentos estarão compreendidos entre os regimes de transição e turbulento. Assumindo essas premissas e aplicando o escoamento condizente com o número de Reynolds calculado, foram utilizados os modelos de turbulência padrão do COMSOL para determinação da vazão de saída do tanque H1. Então, para simular cada nível estacionário optou-se pelo escoamento incompressível e foram utilizados nas simulações os modelos de Turbulência k-ε e Low Reynolds Number k-ε. Estes modelos foram comparados para observar se os efeitos de parede causados pela restrição são mais bem representados pelo modelo de Turbulência Low Reynolds Number k-ε. Os valores de CD simulados foram comparados com os valores de CD calculados a partir dos dados experimentais obtidos na *Planta de Seis Tanques Esféricos*.

Como são 5 níveis estacionários e 2 tipos de modelos a serem empregados, foram executadas 10 simulações para se determinar o CD do tanque H1. Nessa situação, também foi considerado escoamento isotérmico com temperatura de 20°C. Além disso, foram considerados os efeitos da gravidade de 9.81 m.s^{-2} sobre todo o domínio. Para a malha mais refinada das utilizadas, ou seja a tetraédrica “Tipo 9”, o *solver* padrão do COMSOL apresentou problemas de convergência. Talvez fosse possível encontrar a solução, caso fossem implementadas malhas complementares com maior número de elementos em regiões mais críticas do escoamento, como no joelho. Contudo, essa alteração não foi feita, pois estenderia demais o escopo do trabalho. Sendo assim, para determinar o CD foi empregada a malha padrão “Tipo 8”. Na tabela 3.4 estão apresentadas as discretizações dos 5 domínios empregados para representar os níveis de escoamento da água no tanque H1 em estado estacionário.

Tabela 3.4: Número de elementos por malha “Tipo 8” aplicada ao domínio para cada nível estacionário simulado.

Nível (cm)	Elementos
4,97	65.262
5,96	71.645
6,89	73.868
8,98	86.021
9,90	86.516

Capítulo 4

Resultados

4.1. Resultados dos Testes dos Modelos de Escoamento e de Malha

Para a avaliação conjunta dos modelos de escoamento Laminar, Turbulento k- ϵ e Turbulento Low Reynolds Number k- ϵ , com os diversos tamanhos de malha já mencionados, foram realizados 54 testes. Como salientado anteriormente, os testes se sucederam da malha com o menor até a malha com maior número de elementos. Entretanto, em alguns casos, esse artifício não foi suficiente para o *solver* encontrar a solução, a simulação precisou ser refeita utilizando uma tática diferente. Quando este inconveniente ocorreu, adicionalmente foi inserida uma estimativa inicial no *solver* para obter os resultados desejados. A condição inicial adicionada ao COMSOL foi a velocidade média do escoamento na direção desejada, neste caso na vertical e para baixo. A pressão total do sistema também pode ser inserida como estimativa inicial, no entanto, no modo padrão do COMSOL, esse parâmetro já está implícito no valor de 1 atmosfera. Como o escoamento é em regime estacionário, nas simulações em que o *solver* não encontrou a solução, foi utilizado como estimativa inicial, além da pressão de 1 atm, a velocidade média de entrada, V_{in} , de $0,138 \text{ m.s}^{-1}$. Inserindo essa condição inicial adicional, em um caso, o *solver* do COMSOL conseguiu encontrar a solução para o problema. No entanto, para outros dois casos, nem com este artifício foi possível encontrar a solução.

Os testes dos modelos de escoamento e de malhas tiveram o caráter de avaliar o quão próximo os valores simulados estão dos valores experimentais, bem como verificar o desempenho deste software na obtenção dos resultados simulados. Salientando que as especificações necessárias para efetuar as simulações já foram descritas no final da Seção 3.2. Então, nesse caso, apesar de serem adicionadas condições de velocidade média na porta de entrada e de pressão no tubo de saída para rodar a simulação no COMSOL, o interesse está em encontrar as vazões volumétricas simuladas de entrada e, principalmente, de saída. Estas duas variáveis foram selecionados para verificar se o balanço material é respeitado durante as simulações.

Um esclarecimento necessita ser feito para melhorar a análise e apresentação destes resultados. Como foi dito anteriormente, tanto experimentalmente quanto por simulação, os

dados são obtidos sob a forma de vazão volumétrica. Para a obtenção desses dados após a simulação foi realizada a integral das superfícies de entrada e de saída mostradas na Figura 3.5. A exatidão das simulações foi avaliada entre a vazão mássica de entrada inserida implicitamente na interface do programa e a vazão mássica no tubo de saída. A Tabela 4.1 apresenta todas as simulações realizadas nos testes dos modelos e de malhas, bem como as vazões mássicas no tubo de entrada simuladas Win_{sim} , as vazões mássicas no tubo de saída, $Wout_{sim}$, bem como o erro relativo de $Wout_{sim}$ em relação à Win_{set} de 70 g.s^{-1} . Optou-se por analisar o erro relativo à vazão de saída simulada devido à importância desse parâmetro na obtenção do CD. Além disso, pode ser visualizado na Tabela 4.1, que a enumeração das simulações está apresentada conforme a metodologia adotada e mencionada na Seção 3.3. Ou seja, definido o regime e modelo de escoamento foi realizado o refino de malha, iniciando a partir da malha menos refinada até a mais refinada. Para exemplificar: a simulação 1 apresenta os resultados obtidos para o escoamento laminar e incompressível, sendo aplicada à geometria a malha “Tipo 1”. Já para a simulação 2 foi realizada para os mesmos regime e modelo de escoamento, entretanto a malha foi alterada para o “Tipo 2”. E assim, para as demais condições de escoamento aplicadas às simulações foi realizada esta mesma sequência.

Tabela 4.1: Resultados obtidos nas simulações para os testes com os 9 tipos de malha, os 3 modelos de regime de escoamento (compressível e incompressível).

Simulação	Escoamento laminar	Malha	Win_{sim} ($g.s^{-1}$)	$Wout_{sim}$ ($g.s^{-1}$)	Erro: $(Win_{set} - Wout_{sim}) / Win_{set}$
9	Incompressível	Tipo 9*	Falhou em encontrar a solução.		
18	Compressível	Tipo 9*	Falhou em encontrar a solução.		
8	Incompressível	Tipo 8*	61,8	61,6	12,1%
17	Compressível	Tipo 8	61,8	61,6	12,1%
7	Incompressível	Tipo 7	58,0	56,8	18,8%
16	Compressível	Tipo 7	58,0	56,8	18,8%
6	Incompressível	Tipo 6	55,3	53,4	23,7%
15	Compressível	Tipo 6	55,3	53,4	23,7%
5	Incompressível	Tipo 5	54,8	52,2	25,5%
14	Compressível	Tipo 5	54,8	52,2	25,5%
4	Incompressível	Tipo 4	44,8	34,6	50,6%
13	Compressível	Tipo 4	44,8	34,6	50,6%
3	Incompressível	Tipo 3	46,1	30,8	56,1%
12	Compressível	Tipo 3	46,1	30,8	56,1%
2	Incompressível	Tipo 2	46,2	26,4	62,3%
11	Compressível	Tipo 2	46,2	26,4	62,3%
1	Incompressível	Tipo 1	16,7	0,0	100,0%
10	Compressível	Tipo 1	16,7	0,0	100,0%
Simulação	Escoamento Turbulento k-ε	Malha	Win_{sim} ($g.s^{-1}$)	$Wout_{sim}$ ($g.s^{-1}$)	Erro: $(Win_{set} - Wout_{sim}) / Win_{set}$
27	Incompressível	Tipo 9	69,5	69,4	0,9%
36	Compressível	Tipo 9	69,5	69,4	0,9%
26	Incompressível	Tipo 8	69,1	69,0	1,5%
35	Compressível	Tipo 8	69,1	69,0	1,5%
25	Incompressível	Tipo 7	68,1	67,7	3,4%
34	Compressível	Tipo 7	68,1	67,6	3,4%
24	Incompressível	Tipo 6	66,8	65,9	5,9%
33	Compressível	Tipo 6	66,8	65,9	5,9%
23	Incompressível	Tipo 5	66,8	65,8	6,0%
32	Compressível	Tipo 5	66,8	65,8	6,0%
22	Incompressível	Tipo 4	63,0	60,3	13,8%
31	Compressível	Tipo 4	63,0	60,3	13,9%
21	Incompressível	Tipo 3	63,0	62,8	10,3%
30	Compressível	Tipo 3	63,0	62,8	10,3%
20	Incompressível	Tipo 2	63,0	62,8	10,2%
29	Compressível	Tipo 2	63,0	62,8	10,2%
19	Incompressível	Tipo 1	44,5	30,7	56,1%
28	Compressível	Tipo 1	44,5	31,0	55,7%
Simulação	Escoamento Turbulento Low Re number k-ε	Malha	Win_{sim} ($g.s^{-1}$)	$Wout_{sim}$ ($g.s^{-1}$)	Erro: $(Win_{set} - Wout_{sim}) / Win_{set}$
45	Incompressível	Tipo 9	63,8	61,4	12,3%
54	Compressível	Tipo 9	63,8	59,5	15,0%
44	Incompressível	Tipo 8	61,8	58,6	16,3%
53	Compressível	Tipo 8	61,8	56,1	19,8%
43	Incompressível	Tipo 7	58,0	52,4	25,1%
52	Compressível	Tipo 7	58,0	50,1	28,4%
42	Incompressível	Tipo 6	55,3	48,4	30,8%
51	Compressível	Tipo 6	55,3	45,8	34,5%
41	Incompressível	Tipo 5	54,8	48,1	31,2%
50	Compressível	Tipo 5	54,8	46,6	33,4%
40	Incompressível	Tipo 4	44,8	29,3	58,1%
49	Compressível	Tipo 4	44,8	29,4	57,9%
39	Incompressível	Tipo 3	46,1	27,5	60,8%
48	Compressível	Tipo 3	46,1	27,7	60,4%
38	Incompressível	Tipo 2	46,2	24,7	64,7%
47	Compressível	Tipo 2	46,2	24,9	64,4%
37	Incompressível	Tipo 1	16,7	0,0	100,0%
46	Compressível	Tipo 1	16,7	0,0	100,0%

* Adicionada como estimativa inicial o valor de 0,138 m/s de velocidade na direção do escoamento.

Observando as diferenças entre as vazões Win_{sim} e $Wout_{sim}$ apresentadas a Tabela 4.1, percebe-se que a conservação de massa não ocorre em nenhum dos casos. Além disso, nota-se que Win_{sim} em nenhum dos casos é igual à Win_{set} de 70 g.s^{-1} , sendo que esse erro está relacionado à falta de uma malha mais refinada em torno do bocal de entrada. Entretanto, pode-se visualizar que quanto mais refinada for a malha, mais próxima do zero está a diferença entre Win_{sim} e $Wout_{sim}$. Ainda deve ser mencionado que não foi possível obter os resultados para duas simulações, 9 e 18, mesmo utilizando os passos de refinamento de malha e técnica de inserção dos valores iniciais. Essas incoerências provavelmente são ocasionadas em virtude do número insuficiente de elementos na discretização do domínio, pela falta de um formato tridimensional mais adequado dos mesmos e pela não aplicação de um refino maior de malha em regiões mais críticas, como nos tubos de entrada e de saída.

Além disso, percebe-se que o modelo Turbulento k- ϵ é o que apresentou melhores resultados, ou seja, o menor erro relativo entre Win_{set} inserida no programa e $Wout_{sim}$. O erro obtido na simulação 27, que é a condição de malha mais refinada possível, dentro das opções padrão do COMSOL, foi de 0,9%. Além disso, é importante salientar que dentre os três modelos, somente os modelos turbulentos foram os únicos que convergiram para a malha “Tipo 9”.

Observando somente as simulações realizadas para o modelo Turbulento Low Reynolds Number k- ϵ , mais especificamente analisando as diferenças entre as vazões Win_{sim} e $Wout_{sim}$, percebe-se que o escoamento incompressível é o que melhor se adequa a essa condição, pois apresenta menor diferença. No entanto, deve-se salientar que este modelo não o mais indicado para fazer esta afirmação, pois foi o modelo que apresentou maior erro relativo entre Win_{set} inserida no programa e $Wout_{sim}$.

O melhor caso apresentado na Tabela 4.1 é a simulação 27, para o escoamento incompressível utilizando o modelo Turbulento k- ϵ em malha “Tipo 9”, pois apresentou menor erro relativo entre os escoamentos incompressíveis. A Figura 4.1 mostra em detalhes algumas imagens extraídas do tanque H1 de geometria simplificada do COMSOL.

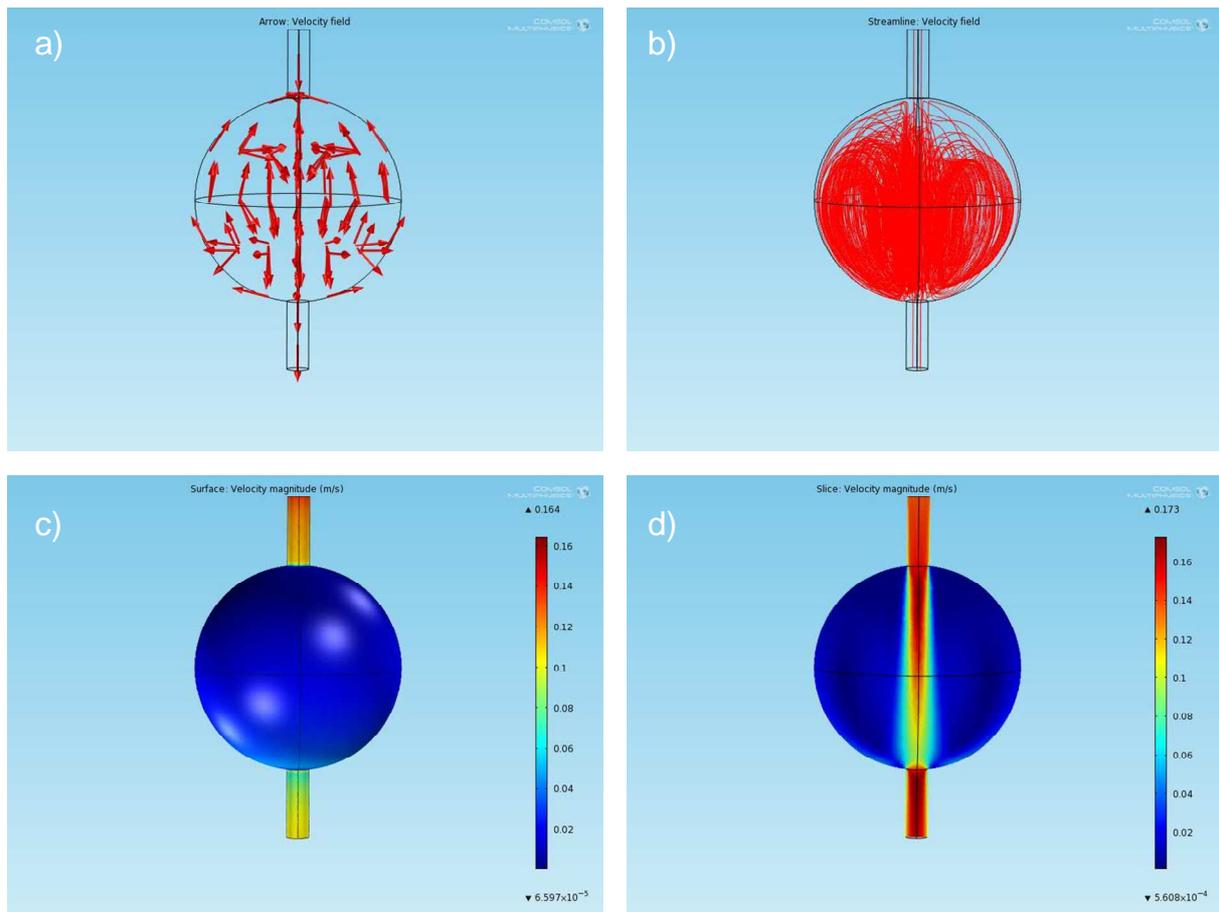


Figura 4.1: Imagens da geometria simplificada utilizando o modelo Turbulento $k-\epsilon$ em malha “Tipo 9”. a) Vetores de tamanho normalizado representando as direções do fluido durante o escoamento simulado; b) Linhas de corrente formadas durante o escoamento; c) Perfil de velocidades na superfície da parede; d) Secção transversal feita na região central do tanque representando o perfil de velocidades durante o escoamento.

4.2. Cálculo do CD Real

Esta etapa do trabalho sem dúvida foi a mais trabalhosa, tanto pela elaboração da geometria real, quanto pelo desempenho computacional necessário para a convergência das simulações. O domínio utilizado já foi descrito na Seção 3.1.2 e a Figura 3.3 apresentou um nível arbitrário empregado nas simulações. Nestes testes, os valores simulados foram comparados com os obtidos experimentalmente na *Planta de Seis Tanques Esféricos*.

4.2.1. Obtenção Experimental do CD

O CD experimental foi obtido a partir da aplicação da Equação 9 para as vazões volumétricas de saída dos 5 níveis estacionários. Os valores do CD obtidos experimentalmente para os 5 níveis estacionários, bem como a média desses números são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Apresentação dos valores CD obtidos experimentalmente para cada nível estacionário.

Nível (cm)	$Q_{ideal} (g.s^{-1})$	$Q_{real} (g.s^{-1})$	$CD_{exp} = Q_{real}/Q_{ideal}$
4,97	152,2	28,6	0,188
5,96	156,0	35,6	0,228
6,89	159,4	38,9	0,244
8,98	167,0	40,5	0,242
9,90	170,2	44,1	0,259
Média CD_{exp}			0,232

Observa-se que o valor do CD obtido a partir dos experimentos situa-se em torno de 0,232.

Nas Seções 4.2.2 e 4.2.3 serão apresentados resultados para os modelos de escoamento de fase única, estacionário, incompressível para os modelos de turbulência Low Reynolds Number k- ϵ e turbulento k- ϵ , respectivamente.

4.2.2. Resultados para Modelo de Turbulência Low Reynolds Number k- ϵ

Para o cálculo do CD simulado para os diferentes níveis estacionários em escoamento incompressível, utilizando o modelo de turbulência Low Reynolds Number k- ϵ , foram necessárias 5 simulações. Como mencionado na Seção 3.4, foi utilizada a malha intitulada “Tipo 8” cujo número de elementos está apresentado por nível na Tabela 3.4. A malha mencionada foi utilizada devido à geometria real ser complexa e serem inseridos os efeitos da gravidade. Para essas simulações foi realizada a substituição do quociente da Equação 9, em outras palavras, trocou-se a vazão volumétrica de saída real obtida experimentalmente pela vazão volumétrica de saída obtida através das simulações. Neste caso, a exatidão das simulações também foi avaliada entre a vazão mássica de entrada inserida na interface do programa e a vazão mássica no tubo de saída. A Tabela 4.3 apresenta os resultados das

simulações para os diferentes níveis estacionários para o escoamento incompressível da água, as vazões mássicas no tubo de entrada simuladas Win_{sim} e no tubo de saída, $Wout_{sim}$, bem como o erro relativo de Win_{sim} e de $Wout_{sim}$ em relação à Win_{set} .

Tabela 4.3: Resultados obtidos nas simulações utilizando o modelo turbulento k-ε para os 5 níveis estacionários. (Malha “Tipo 8”).

Simulação	Nível (cm)	Win_{set} (g.s ⁻¹)	Win_{sim} (g.s ⁻¹)	$Wout_{sim}$ (g.s ⁻¹)	Erro: $(Win_{set} - Win_{sim})/Win_{set}$	Erro: $(Win_{set} - Wout_{sim})/Win_{set}$
55	4,97	28,6	25,6	27,4	10,4%	4,1%
56	5,96	35,6	32,0	34,2	10,0%	3,9%
57	6,89	38,9	34,8	37,2	10,4%	4,4%
58	8,98	40,5	36,3	39,0	10,4%	3,5%
59	9,9	44,1	39,6	42,4	10,1%	3,8%

Analisando a Tabela 4.3, pode-se concluir que o balanço material não é respeitado em nenhuma das simulações realizadas. Entretanto, $Wout_{sim}$ apresenta erro relativo baixo em relação à Win_{set} . A conclusão extraída dessa última análise é a precisão que este modelo apresenta para a parte do domínio que possui bastantes efeitos de parede. Contudo, perde em precisão para a parte da geometria que é livre de obstáculos como é o caso das regiões mais afastadas do joelho de 90°. Essa conclusão pode ser verificada avaliando o erro relativo apresentado entre Win_{set} e $Wout_{sim}$ que é em torno de 3 vezes maior do que o erro relativo obtido entre Win_{set} e $Wout_{sim}$.

Utilizando a vazão volumétrica no tubo de saída foi possível determinar o CD simulado e, como foi mencionado anteriormente, foi utilizado o mesmo procedimento realizado para o cálculo do CD experimental. O CD simulado para cada nível estacionário, bem como a média dos mesmos obtidos a partir do modelo de escoamento de turbulência Low Reynolds Number k-ε está apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Valores de CD obtidos através das simulações para cada nível estacionário.

Simulação	Q_{ideal} (g.s ⁻¹)	Q_{sim} (g.s ⁻¹)	$CD_{sim} = Q_{sim}/Q_{ideal}$
55	152,2	27,4	0,180
56	156,0	34,2	0,219
57	159,4	37,2	0,233
58	167,0	39,0	0,234
59	170,2	42,4	0,249
		Média CD_{sim}	0,223

Verificando a média do CD simulado percebe-se que este valor está próximo do valor médio do CD obtido experimentalmente, sendo o erro relativo de 3,92%. A diferença entre os valores pontuais dos coeficientes de descarga através das simulações e dos experimentos, bem como o comportamento destes parâmetros com o aumento do nível estacionário estão apresentadas na Figura 4.2.

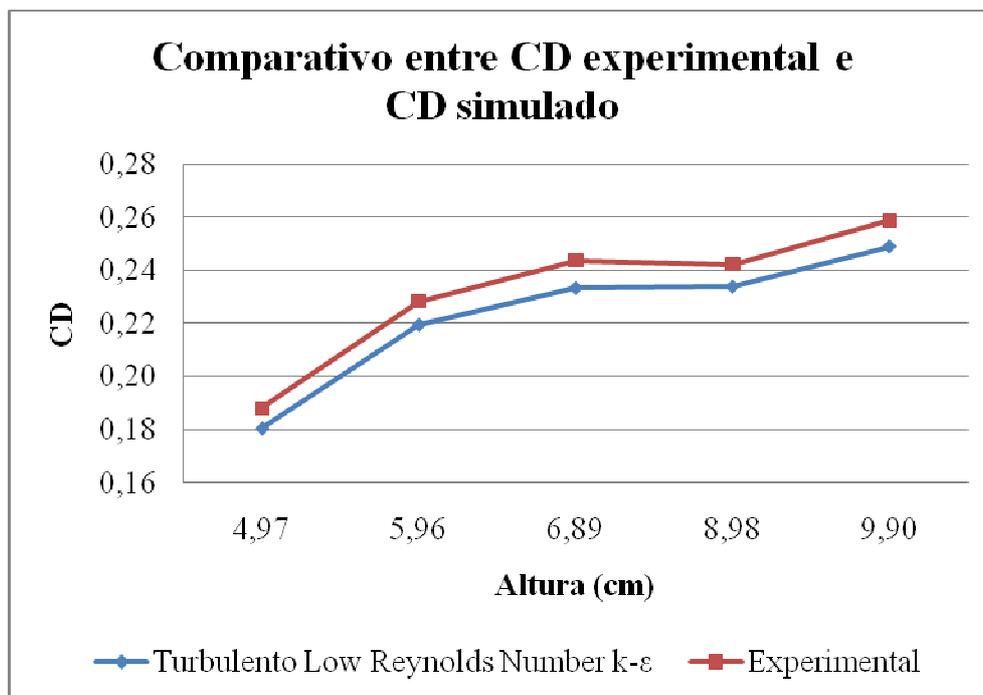


Figura 4.2: Comportamento do CD com o nível (modelo de escoamento de turbulência Low Reynolds Number k-ε).

4.2.3. Resultados para Modelo de Turbulência k-ε

A mesma metodologia utilizada para o cálculo do CD simulado para os diferentes níveis estacionários em escoamento incompressível, utilizados no modelo de turbulência Low Reynolds Number k-ε foi empregada para o cálculo do CD utilizando o modelo de turbulência k-ε. Além disso, também foram necessárias 5 simulações para realizar o estudo desse caso. Como mencionado na Seção 3.4, foi utilizada a malha intitulada “Tipo 8” cujo número de elementos está apresentado por nível na Tabela 3.4. A malha mencionada foi utilizada devido à geometria real ser complexa e serem inseridos os efeitos da gravidade. Também neste caso, a exatidão das simulações foi avaliada entre a vazão mássica de entrada ajustada na interface do COMSOL e a vazão mássica no tubo de saída. A Tabela 4.5 apresenta os resultados das simulações para os diferentes níveis estacionários para o escoamento incompressível da água,

as vazões mássicas no tubo de entrada simuladas Win_{sim} e no tubo de saída, $Wout_{sim}$, bem como o erro relativo de Win_{sim} e de $Wout_{sim}$ em relação à Win_{set} .

Tabela 4.5: Resultados das simulações utilizando o modelo turbulento k-ε para os 5 níveis estacionários. (Malha “Tipo 8”).

Simulação	Nível (cm)	Win_{set} (g.s ⁻¹)	Win_{sim} (g.s ⁻¹)	$Wout_{sim}$ (g.s ⁻¹)	Erro: $(Win_{set} - Win_{sim})/Win_{set}$	Erro: $(Win_{set} - Wout_{sim})/Win_{set}$
60	4,97	28,6	28,6	28,5	0,01%	0,34%
61	5,96	35,6	35,6	35,5	0,00%	0,30%
62	6,89	38,9	38,9	38,8	0,00%	0,31%
63	8,98	40,5	40,4	40,3	0,01%	0,31%
64	9,9	44,1	44,0	43,9	0,00%	0,31%

Analisando-se a Tabela 4.5, percebe-se que o modelo turbulento k-ε utilizado nas simulações representa com ótima precisão o escoamento tanto na questão do balanço de massa e com relação ao erro relativo entre $Wout_{sim}$ em relação à Win_{set} . Comparando com os dados de vazão mássica de saída obtidos através das simulações desse modelo com o modelo de turbulência Low Reynolds Number k-ε, verifica-se que o turbulento k-ε representa com mais consistência o caso estudado. A explicação seria que o modelo turbulento k-ε compensa, de forma global, os efeitos de parede localizados na constrição causados pelo joelho durante o escoamento de água. Por esse motivo, consegue apresentar bons resultados em todas as regiões do domínio representado pela geometria real.

O cálculo do CD simulado aplicando o modelo turbulento k-ε foi realizado da mesma forma realizada para o modelo de turbulência Low Reynolds Number k-ε. A tabela 4.6 apresenta o CD simulado para cada nível estacionário, bem como a média dos mesmos obtidos a partir do modelo de escoamento de turbulência k-ε.

Tabela 4.6: Valores de CD simulados para cada nível estacionário.

Simulação	Q_{ideal} (g.s ⁻¹)	Q_{sim} (g.s ⁻¹)	$CD_{sim} = Q_{sim}/Q_{ideal}$
60	152,2	28,5	0,187
61	156,0	35,5	0,228
62	159,4	38,8	0,243
63	167,0	40,3	0,241
64	170,2	43,9	0,258
		Média CD_{sim}	0,232

Comparando a média do CD simulado com o valor médio do CD experimental percebe-se que este modelo apresenta valores muito próximos do obtido na planta, sendo erro relativo de 0,29%.

A diferença entre os valores pontuais dos coeficientes de descarga através das simulações e dos experimentos, bem como o comportamento desse parâmetro com o aumento do nível estacionário está apresentada na Figura 4.3.

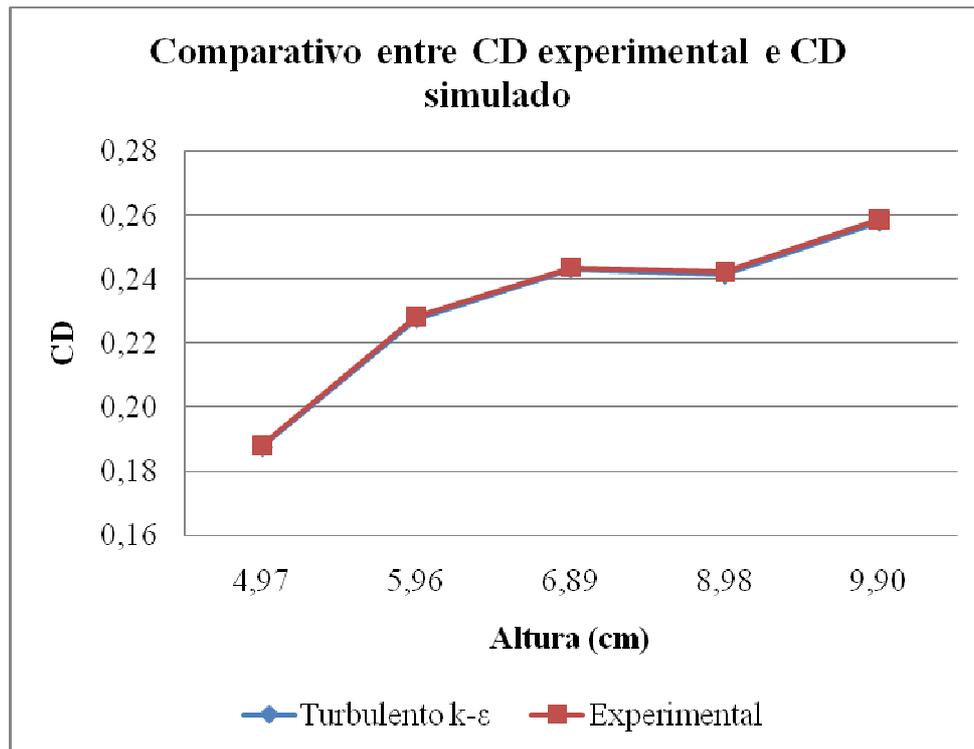


Figura 4.3: Comportamento do CD com os níveis (modelo de escoamento de turbulência k-ε).

As diferenças dos resultados obtidos entre os modelos turbulentos utilizados nesse trabalho e que foram mencionadas anteriormente podem ser visualizadas na Figura 4.4. A Figura 4.4 representa visualmente e qualitativamente as diferenças dos perfis de velocidades para o escoamento simulado em nível estacionário de 9,90 cm utilizando a malha “Tipo 8” (simulações 59 e 64).

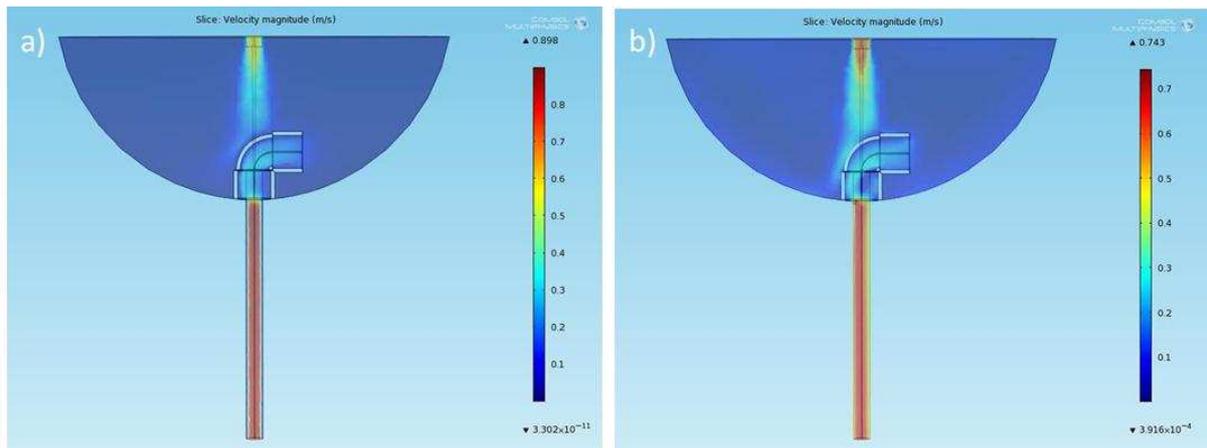


Figura 4.4: Comparativos entre os modelos de escoamento aplicados à geometria real. a) Secção transversal feita na região central do tanque apresentando o perfil de velocidades para o modelo de turbulência Low Reynolds Number k-ε; b) Secção transversal feita na região central do tanque para o modelo de turbulência k-ε.

A Figura 4.4 mostra bem a importância que o modelo de turbulência Low Reynolds Number k-ε aplica para regiões próximas das paredes, contudo perde em precisão para gerar o perfil de velocidades nas outras regiões que estão mais afastadas das paredes. Entretanto, para o modelo de turbulência k-ε, a Figura 4.4 mostra com maiores detalhes e precisão o perfil de maneira global, ou seja, na entrada do fluido, mas perde um pouco da riqueza dos detalhes no interior do tubo de saída.

Outro comparativo que pode ser feito é com relação aos valores de C_D obtidos experimentalmente, utilizando o modelo de turbulência Low Reynolds Number k-ε e o k-ε em um único gráfico. A Figura 4.5 mostra o comportamento destes valores mencionados anteriormente em função do número de Reynolds calculado conforme o nível apresentado.

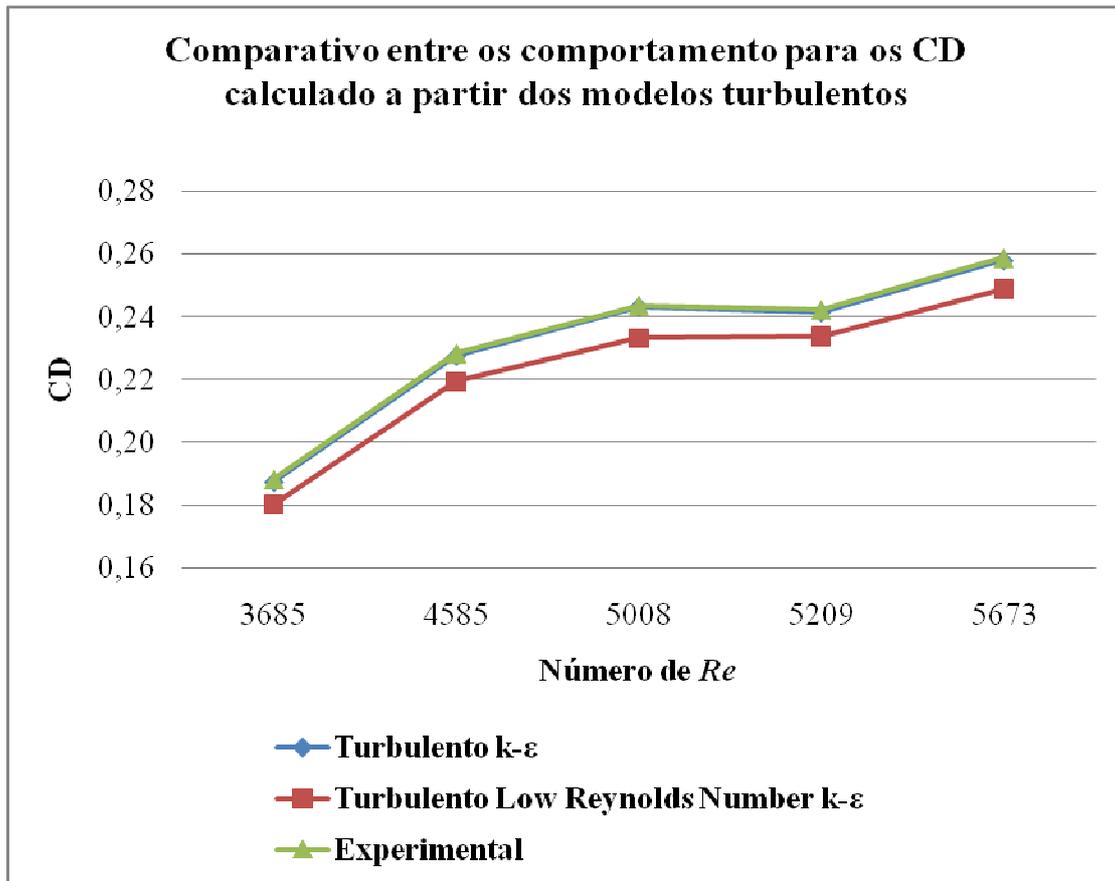


Figura 4.5: Coeficientes de descarga obtidos experimentalmente, utilizando o modelo de turbulência Low Reynolds Number $k-\epsilon$ e $k-\epsilon$ em relação ao número de Reynolds.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

Após avaliar as 64 simulações propostas neste trabalho percebeu-se que o COMSOL é uma excelente ferramenta computacional para representar escoamentos. Para os testes realizados comparando os modelos de escoamento laminar, turbulento $k-\varepsilon$ e turbulento Low Reynolds Number $k-\varepsilon$ para a geometria simples foi possível comprovar que o modelo turbulento $k-\varepsilon$ é o que melhor se aplica a este caso.

Analisando de maneira global os testes empregados para a obtenção do coeficiente de descarga a partir das simulações utilizando os modelos turbulentos propostos, pôde-se garantir de maneira satisfatória que os resultados estão de acordo com os dados experimentais. Entretanto, novamente o modelo turbulento $k-\varepsilon$ apresentou os melhores resultados em representar o escoamento no tanque H1. Além disso, com este modelo de turbulência foi possível observar que o erro relativo da média do parâmetro CD obtido a partir das simulações em relação à média do CD obtido através dos experimentos foi muito pequeno, em torno de 0,3%. É importante salientar que o enfoque principal do trabalho de Paim (2009) não foi obter experimentalmente os coeficientes de descarga, sendo somente um parâmetro utilizado para aquele estudo caso. Sendo assim, em seu trabalho não estão descritos quaisquer informações sobre erros experimentais na obtenção das medidas.

Portanto, percebe-se que é possível empregar esta ferramenta computacional para os mais variados casos da indústria de processos cujos resultados com certeza serão de qualidade. A intenção é dar segmento ao trabalho já iniciado, sendo que os próximos passos serão avaliar o comportamento do CD para a o tanque H1 implementando a condição de escoamento multifásico em estado transiente. Esta situação seria representada pela simulação do enchimento do tanque com água com o passar do tempo e seria possível verificar se os níveis estacionários obtidos pelas simulações seriam os mesmos obtidos experimentalmente. Entretanto, isto só seria possível de ser realizado se forem considerados juntamente o balanço de massa no domínio integral e a equação do movimento.

Este estudo de caso é considerado simples de ser modelado, pois apresenta geometria pouco complexa e de fácil implementação no software. Entretanto, a intenção é futuramente utilizar a mesma ferramenta computacional para a predição de escoamentos em geometrias e condições mais complexas como tanques utilizados em parques industriais e válvulas de controle.

Referências Bibliográficas

- BATCHELOR, G.K., *An Introduction To Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, 1967.
- COMSOL 4.1, *CFD Module, User's Guide*. COPYRIGHT 1998–2010 COMSOL AB.
- COMSOL 4.1, *Multiphysics, User's Guide*. COPYRIGHT 1998–2010 COMSOL AB.
- DAUGHERTY, R. L.; FRANZINI, J. B., *Fluid Mechanics*, 6th ed. New York: McGraw-Hill, 1965. pp. 338-349.
- FONTES, C.E. *et al.*, *Introdução a Fluidodinâmica Computacional*, Escola Piloto Virtual, COOPE/UFRJ. 2005.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. *Introdução à mecânica dos fluidos*. 5ª Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Editora S.A., 2001.
- HOLMAN, J.P., *Heat transfer*. New York: McGraw-Hill, 2002.
- LEÓN, A.S. *et al.*, *Experimental and CFD modeling of a vortex flow restrictor*, World Environmental and Water Resources Congress, Hawaii. May 2008.
- ORTEGA, J. A. *et al.*, *Simulação Numérica de escoamento Incompressível ao Longo de uma Válvula de Alívio de Pressão*, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador. 2008.
- PAIM, A.C., “Controle Preditivo Retroalimentado por Estados Estimados, Aplicado a Uma Planta Laboratorial”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre. 2009.