



## ANÁLISE DA PERDA DE CARGA EM VÁLVULAS UTILIZANDO MÉTODOS EXPERIMENTAIS E COMPUTACIONAIS

Cleomar Maraga, [cleomar.maraga@gmail.com](mailto:cleomar.maraga@gmail.com)<sup>1</sup>

Fernanda Raquel Brand (orientador), [fernanda.brand@farroupilha.ifrs.edu.br](mailto:fernanda.brand@farroupilha.ifrs.edu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul-Câmpus Farroupilha, Av. São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP: 95180-000, Farroupilha/RS

**Resumo:** A obtenção do coeficiente de perda de carga pode ser feita de maneira experimental, através de bancada e instrumentos de medição de vazão e pressão ou pode ser obtido de maneira computacional, através de simulações de dinâmica dos fluidos computacional. Desse modo, o objetivo do trabalho é apresentar a metodologia necessária para calcular tal coeficiente de forma experimental e de forma computacional, fazendo a comparação de ambos os resultados. Para tanto foi utilizada uma bancada de hidráulica com controle de rotação do rotor da bomba, medidor de vazão tipo rotâmetro, medidores de pressão e acessórios do tipo válvula esfera, válvula gaveta e válvula globo. Na parte computacional foi utilizado um software iterativo onde foram realizadas 30 simulações buscando representar as condições do experimento realizado em bancada. Além disso, o trabalho visa ser um material de apoio às disciplinas de mecânica dos fluidos e instrumentação industrial, disciplinas que estudam escoamento no interior de dutos e válvulas, à medida que foram também obtidos, por meio de simulações, os perfis de velocidade e de pressão. Pode ser observado que o comportamento do escoamento ocorreu de modo semelhante ao se comparar resultados experimentais e computacionais, porém em intensidades diferentes. Os métodos experimentais resultaram em um valor médio de  $K$  de 1,78, 1,6 e 63,7 para as válvulas esfera, gaveta e globo, respectivamente, enquanto que os valores obtidos por métodos computacionais foram de 0,45 tanto para válvula esfera e gaveta e de 29,6 para válvula globo. Foi observado que o aumento da velocidade causou o aumento na perda de carga em todas as válvulas estudadas. Apesar disso, o coeficiente de perda de carga se manteve constante nas simulações enquanto que esse parâmetro esteve em ascensão nas atividades experimentais. A discrepância entre os resultados é fruto da impossibilidade de se medir a rugosidade superficial das válvulas e possível falta de acuracidade da geometria interna das válvulas, bem como erros inerentes ao processo de leitura de medidas e ao processo de discretização durante a simulação.

**Palavras-chave:** coeficiente de perda de carga, CFD, válvulas industriais.

### 1. INTRODUÇÃO

Sistemas de distribuição de água, petróleo, e de qualquer tipo de fluido fazem uso de válvulas para proporcionar o controle da vazão com que o fluido é transmitido. A energia utilizada para bombear pode ser elevada caso o sistema de distribuição seja muito longo e possua muitas obstruções, fatores que exercem uma grande influência na perda de energia mecânica, traduzida em perda de carga. Desse modo, para compensar essas perdas, a bomba deve produzir mais energia para suprir a demanda do sistema (Almeida *et al*, 2010). Embora o termo perda menores seja utilizado para nomear as perdas de carga localizadas, as válvulas são responsáveis por grande parte da perda de carga que se observa em sistemas de distribuição, principalmente onde o comprimento da tubulação não é muito longo (Fox, 2010).

O uso de simulações é amplamente utilizado em pesquisas envolvendo perda de carga em escoamentos, sendo que na literatura é possível encontrar variadas aplicações em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês) e, mais especificamente, no estudo da perda de carga. (Angelo *et al*, 2010) investigou a influência da geometria interna das válvulas do tipo globo na perda de carga. Por sua vez (Sehn, 2015) fez o uso de simulações para estudar a perda de carga ocasionada por obstruções geradas pela aglutinação de resíduos sólidos nas paredes de dutos. Já (Mazumber, 2012) simulou diferentes valores de raio de cotovelos para analisar seus efeitos na perda de carga de forma experimental. Visando melhorar a qualidade do crescente volume de estudos realizados na área, (Celik *et al*, 2008) propôs um novo procedimento de estimação de erros e incertezas provenientes de aplicações de CFD.

Sendo assim, o objetivo desse trabalho é fazer um estudo comparativo sobre o coeficiente de perda de carga em válvulas esfera, gaveta e globo obtido por métodos experimentais e computacionais, e calculadas com auxílio de equações analíticas. Para tanto, os coeficientes de perda de carga foram calculados analiticamente utilizando dados obtidos experimentalmente na bancada de hidráulica, localizada no Laboratório de Fenômenos de Transporte do Instituto Federal do Rio Grande do Sul - Campus Farroupilha. Concomitantemente, os mesmos sistemas e condições de processo foram utilizados em simulações computacionais.

O estudo comparativo é a principal motivação do trabalho, porém ele também visa ser um material auxiliar para disciplinas como fenômenos de transporte e instrumentação industrial. Essas disciplinas são a base teórica desse estudo e contam com um complexo referencial de termos e comportamentos que são muitas vezes abstratos aos estudantes que

cursam tais disciplinas, de modo que a utilização de ferramentas computacionais viria a auxiliar no entendimento da teoria relacionada ao escoamento de fluidos, perfil de velocidade, distribuição de pressão e da perda de carga em tubulações, com ou sem válvulas. Dessa maneira, espera-se que esse trabalho possa auxiliar professores e futuros estudantes no desenvolvimento de novas simulações baseadas em semelhantes cenários, mas com diferentes condições. Para isso, serão apresentados também os perfis de velocidade e de pressão desenvolvidos ao longo do escoamento nas válvulas em estudo.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

São muitos os projetos de válvulas comerciais, cada uma com características específicas que tornam o seu uso recomendado para determinadas aplicações. Dentre as válvulas de maior aplicabilidade estão as válvulas gaveta, esfera e globo, que são o foco do presente estudo. Válvula esfera é um tipo de válvula rotativa que é amplamente utilizada para controle de fluxo em sistemas de tratamento de fluido (Branco, 2010), essa válvula é ideal para situações corrosivas e também resistem a elevadas pressões e temperaturas. As válvulas globo, apesar de possuírem um elevado coeficiente de perda de carga, são amplamente utilizadas em operações de abertura e fechamento, ou *on-off* e quando é necessário fazer um controle da vazão e pressão de um fluido (Castro, Eriksson, 2012). Válvulas gaveta, possuem aplicação industrial e doméstica, podendo ser construída por uma gama grande de materiais, como inox, ferro fundido, bronze e outras ligas (Branco, 2010).

Cada válvula é associada com um coeficiente adimensional de perda de carga,  $K$ , esse valor decresce conforme a diminuição do diâmetro do tubo, que coincide com o aumento do número de Reynolds e diminuição da viscosidade relativa (White, 2011).

Valores de  $K$  são encontrados tabelados na literatura e nos manuais de válvulas industriais, servindo como uma primeira estimativa para os cálculos de perda de carga, porém os valores divulgados nem sempre são efetivos, pois dependem de condições do escoamento, da geometria da válvula e do material com que elas são construídas. Sendo assim, para que seja possível chegar a resultados mais precisos, faz-se necessário determinar o valor de  $K$ . Para tal, pode-se fazer o uso de métodos teóricos e experimentais.

A resolução de problemas reais de mecânica dos fluidos pode ser de grande complexidade, principalmente em situações que lidem com geometrias complexas, regimes turbulentos e em estado transiente, de modo que nesses casos a engenharia se alia a meios computacionais para adquirir respostas com um nível de precisão maior. O constante aperfeiçoamento de computadores e softwares permitiu a obtenção de respostas para situações cada vez mais complexas com tempos de cálculos computacionais relativamente baixos. Desse modo, a utilização de softwares de mecânica dos fluidos aliados aos métodos analíticos e experimentais já desenvolvidos se torna uma eficiente ferramenta de obtenção e validação de resultados.

Enquanto que os métodos experimentais obtêm resultados globais, como por exemplo forças de sustentação, quedas de pressão ou de potência, o uso das técnicas de CFD são capazes de fornecer resultados mais detalhados sobre o escoamento, como perfis de velocidade e de pressão. Outro modo de se usar a CFD é validando os resultados obtidos experimentalmente. Além disso, o uso de CFD é vantajoso pois possibilita uma abordagem do problema mais próximo à realidade e muitas vezes com o uso de menos recursos e gastando menos tempo, já que muitas vezes a construção de modelos experimentais é muito complexa, exige calibração de equipamentos e requer custos para rodar os testes (Almeida *et al.*, 2010).

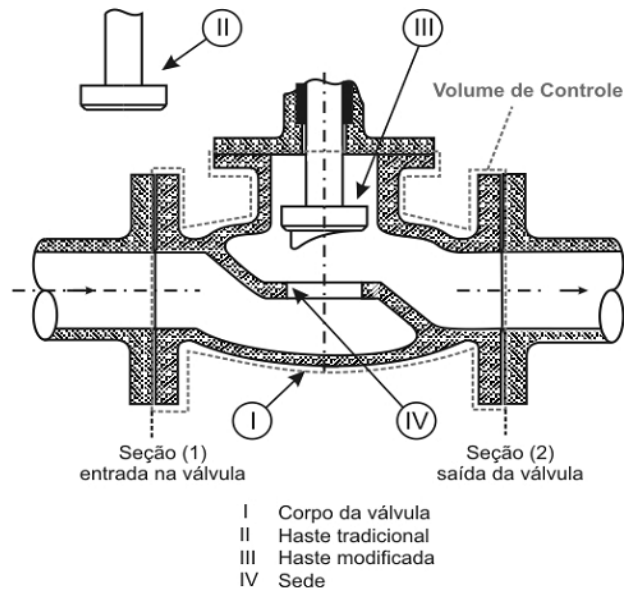
Desse modo, pode ser visto que a aplicação de métodos analíticos e computacionais são de grande utilidade quando usados em conjunto, de modo que cada um dos métodos desempenha uma função que complementa a outra. Usar tais métodos em conjunto é capaz de gerar resultados confiáveis e mais condizentes com a realidade do escoamento.

### 2.1. Método analítico

Para serem feitas as deduções das equações que governam a dinâmica do fluido no interior da válvula é necessário delimitar a região do volume do controle, nesse caso, como não se analisa a influência das características da tubulação anterior e posterior à válvula, o volume de controle será somente a região do interior da válvula onde ocorre a passagem do fluido, como mostra a Figura 1.

A resolução das equações que regem o comportamento dos fluidos é demasiada complexa, de modo que algumas hipóteses simplificadoras podem ser feitas sem resultarem em erro significativo, sendo elas:

- a) O escoamento é unidirecional;
- b) Fluido incompressível;
- c) Áreas da seção de entrada e saída do fluido na válvula são iguais;
- d) Não há trocas de calor entre o sistema e o meio externo;
- e) Escoamento em regime permanente.



**Figura 1: Região de delimitação do volume de controle para uma válvula globo, com duas possibilidades de obturadores, ou haste (Almeida *et al*, 2010)**

A literatura especializada amplamente usa o conceito de perda de carga localizada para se referir as perdas de energia no interior de válvulas (Çengel, 2006; Fox, 2010):

$$h_p = K \frac{V_m^2}{2g} \quad (1)$$

Na Equação 1,  $h_p$  é a perda de carga da válvula, em  $m$ ,  $K$  é o coeficiente de perda de carga, sendo ele adimensional,  $V_m$  é a velocidade média do escoamento e  $g$  é a aceleração da gravidade, em  $m/s^2$ .

A equação da conservação de massa (Fox, 2010) é dada por:

$$-\int_{AC} \rho \vec{V} \vec{n} dA = \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{VC} \rho dV \right) \quad (2)$$

Na Equação 2, o primeiro termo equivale à taxa de variação líquida de massa que passa através da superfície de controle, já o segundo termo é a taxa de variação de massa dentro do volume de controle. Onde  $\rho$  é a densidade do fluido, em  $kg/m^3$ ,  $\vec{V}$  é a velocidade do fluido, em  $m/s$ ,  $\vec{n}$  é o vetor unitário normal à área  $A$ , e  $V$  equivale ao volume,  $m^3$ .

Tendo em vista as hipóteses o segundo termo é nulo, pois o escoamento se encontra em regime permanente, a densidade é constante e a área na saída e na entrada são iguais, a expressão se torna então:

$$\begin{aligned} -\rho_2 V_2 A_2 + \rho_1 V_1 A_1 &= 0 \\ V_1 &= V_2 \end{aligned} \quad (3)$$

A equação de conservação de energia também desempenha um papel importante na estimativa das variações de energia que ocorrem dentro da válvula:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{VC} \rho \left( u + \frac{V^2}{2} + gz \right) dV \right) = - \int_{AC} \rho \left( u + \frac{V^2}{2} + gz \right) \vec{V} \vec{n} dA + \dot{Q} - \int_{AC} p \vec{V} \vec{n} dA \quad (4)$$

O primeiro termo da equação representa a taxa de variação da energia no volume de controle, onde  $u$  é a parcela de energia interna,  $V^2/2$  é a parcela de energia cinética e  $gz$  é a parcela de energia potencial, em  $m^2/s^2$ .

O segundo termo é a taxa em que energia é transportada no volume de controle,  $V$ , através da área,  $A$ .

O terceiro componente é a taxa de calor adicionada ao volume.

O quarto componente é a taxa de trabalho feito ao volume de controle. O trabalho feito em um sistema pode ser realizado por forças de superfície (pressão e cisalhamento) ou por forças de corpo (gravidade, magnética, etc.). No caso em particular somente o trabalho realizado pela pressão foi considerado.

Devido às condições do escoamento o primeiro termo será anulado, ao se fazer a integração, e aplicar-se o conceito de vazão mássica (Equação 5), obtém-se:

$$\dot{m} = \rho VA \quad (5)$$

$$0 = g(Z_2 - Z_1) + \frac{1}{2}(V_2^2 - V_1^2) + e_2 - e_1 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} + \frac{p_2}{\rho} - \frac{p_1}{\rho}$$

$$\left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1\right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2\right) = \frac{1}{g}(e_2 - e_1) + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}g} \quad (6)$$

Na Equação 6 o termo após a igualdade é a perda de carga (Crowe, 2009) e pode ser entendida como a conversão de energia mecânica útil em resíduo através da ação viscosa das partículas de fluido. Devido a condição de inexistência de troca de calor com o meio externo o último termo da Equação 6 é nulo. Combinando a Equação 6 com a Equação 1 e considerando entrada e saída na mesma altura, obtém-se:

$$\left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g}\right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g}\right) = K \frac{V_m^2}{2g} \quad (7)$$

Finalmente, combinando a Equação 7 com a Equação 3:

$$k = \frac{2\Delta p}{\rho V_m^2} \quad (8)$$

Desse modo é possível fazer a estimativa do coeficiente de perda de carga localizada tendo as informações das pressões de entrada e saída, e da velocidade do fluido.

## 2.2. Método numérico

A dinâmica de fluidos computacional (CFD) gera aproximações numéricas que governam o movimento de fluidos. O processo de resolução de problemas que aplica a CFD pode ser representado de maneira simples (Saleh, 2002 & Çengel, 2006): primeiramente as equações que governam o fluxo de fluido são selecionadas, essas geralmente são compostas por equações diferenciais parciais. Essas equações são então discretizadas para produzir um análogo numérico das equações. O domínio então é dividido em pequenos segmentos de elementos, esses segmentos são conhecidos como células e o conjunto dessas células é chamado de malha. Após, as condições iniciais e condições de contorno são introduzidas para possibilitar a resolução do problema. Para fazer a resolução do problema, o código computacional resolve as equações discretizadas de maneira iterativa para cada uma das células. Um erro é sempre associado com as respostas geradas pelo método, porém esse erro pode ser reduzido através do aumento do número de iterações e com a diminuição do tamanho das células.

Os códigos computacionais funcionam em três etapas:

1. Pré-processamento: nesta etapa é inserida a geometria do problema e as condições iniciais e de contorno, é também nessa etapa que a malha formada pelos pequenos segmentos da geometria é gerada.

2. Processamento: é quando ocorre a resolução das equações governantes sob as condições impostas pelo problema. Diferentes métodos podem ser utilizados nessa etapa: o método das diferenças finitas, o método de elementos finitos, o método dos volumes finitos, métodos espectrais, entre outros (Saleh, 2002).

3. Pós processamento: é a etapa de análise dos resultados, os resultados obtidos pelo processador são então organizados em gráficos e imagens de escala para facilitar o processo de visualização e interpretação dos resultados gerados.

Os códigos de resolução numéricos utilizam um modelo matemático que resolve equações diferenciais que modelam o escoamento de fluidos, essas equações já foram apresentadas em sua forma integral, devendo então ser representadas em suas formas diferenciais:

A equação de conservação de massa é dada pela Equação (9).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (9)$$

Onde  $\vec{V}$  é a velocidade do fluido, sendo ela a combinação de suas componentes, de modo que:

$$\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k} \quad (10)$$

Por sua vez, os componentes da equação da conservação da quantidade de movimento nas direções x,y e z são dados pelas Equações (11), (12) e (13), respectivamente:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (12)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (13)$$

Onde  $\tau$  representa as tensões normais e de cisalhamento e  $f$  representa as forças de campo em cada uma das direções.

A resolução das equações é realizada aplicando-se métodos de solução de equações diferenciais parciais. Os cálculos realizados pelo *software* utilizam as características do escoamento (material e propriedades, condições de contorno) e retornam então os valores desejados, velocidade e pressão para os elementos do sistema.

### 3. METODOLOGIA

A validação de resultados numéricos requer que seja feita a comparação com resultados experimentais, de modo que embora os códigos computacionais gerem respostas, se o modelamento da geometria e das condições de escoamento não estiverem coerentes com o escoamento que ocorre na realidade, os resultados não serão satisfatórios.

Desse modo a etapa prática do estudo está dividida em duas partes, na primeira é feita a construção prática do modelo estudado, manipulando as variáveis de interesse a fim de se obter as medidas necessárias para o cálculo analítico do coeficiente de perda de carga nos componentes. Na segunda parte o modelo prático é simulado em *software* a fim de se obter as mesmas variáveis que foram medidas experimentalmente. Tendo tanto os resultados práticos e experimentais é possível então avaliar o quão coerentes os resultados dos dois métodos se apresentam.

#### 3.1. Experimental

O modelo experimental foi idealizado através da bancada de hidráulica da Hidro didática, Figura (2) localizada no Laboratório de Fenômenos de Transporte do Instituto Federal do Rio Grande do Sul - Campus Farroupilha. Esse equipamento faz a movimentação de fluido em um tanque através de bomba centrífuga, permitindo a passagem de fluido por diferentes caminhos.

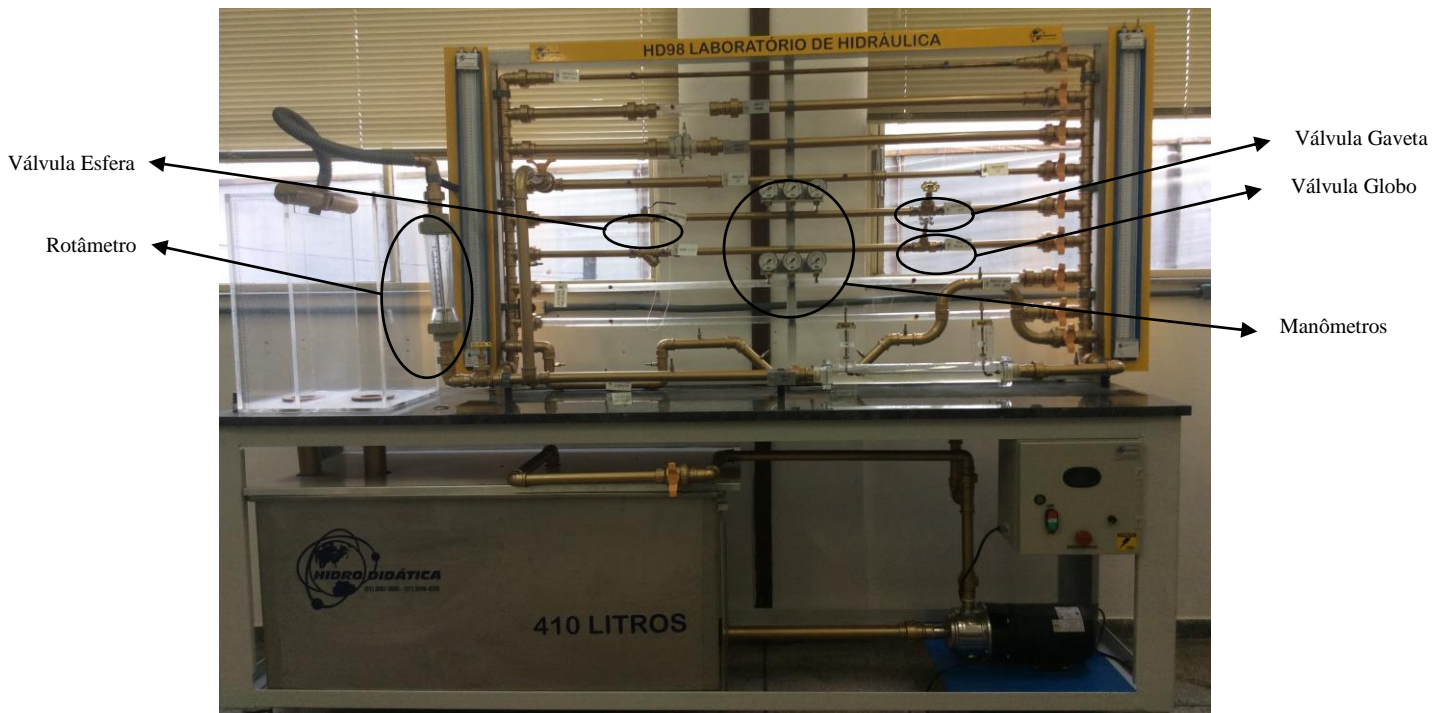


Figura 2: Bancada de hidráulica, onde foram realizadas as atividades experimentais.

Os caminhos utilizados no experimento foram os segmentos contendo as válvulas gaveta, esfera e válvula globo. Para fazer o controle da vazão de fluido passante pelas válvulas foi feita alterações na rotação do rotor da bomba. É importante ressaltar que todos os experimentos foram realizados com as válvulas totalmente abertas, tendo em vista que os valores do coeficiente de perda de carga seriam diferentes caso as válvulas estivessem parcialmente fechadas. De posse então da vazão volumétrica ( $Q$ ) de água, medida através de um rotâmetro acoplado na tubulação, e das características da tubulação foi possível calcular a velocidade do fluido na entrada das válvulas a partir da Equação 14.

$$V_m = Q/A \quad (14)$$

Onde a área interna ( $A$ ) é de  $366,44 \text{ mm}^2$ , tendo em vista que a tubulação  $\frac{3}{4}$ " possui um diâmetro interno de  $21,6 \text{ mm}$ .

A pressão na entrada e na saída pôde ser medida com a ajuda de dois manifolds com três manômetros de Bourdon, cada um com escalas diferentes. Para fazer as medições foram utilizados os manômetros com escalas menores, de  $0$  a  $2 \text{ kgf/cm}^2$ , para assim medir as pressões com maior precisão.

Foram realizadas medições para aproximadamente  $10$  valores de vazão diferentes, para cada uma das válvulas. De posse das informações de diferença de pressão, densidade do fluido ( $997 \text{ kg/m}^3$  para água a  $25^\circ\text{C}$ ) e velocidade foi possível calcular  $K$  a partir da Equação 8.

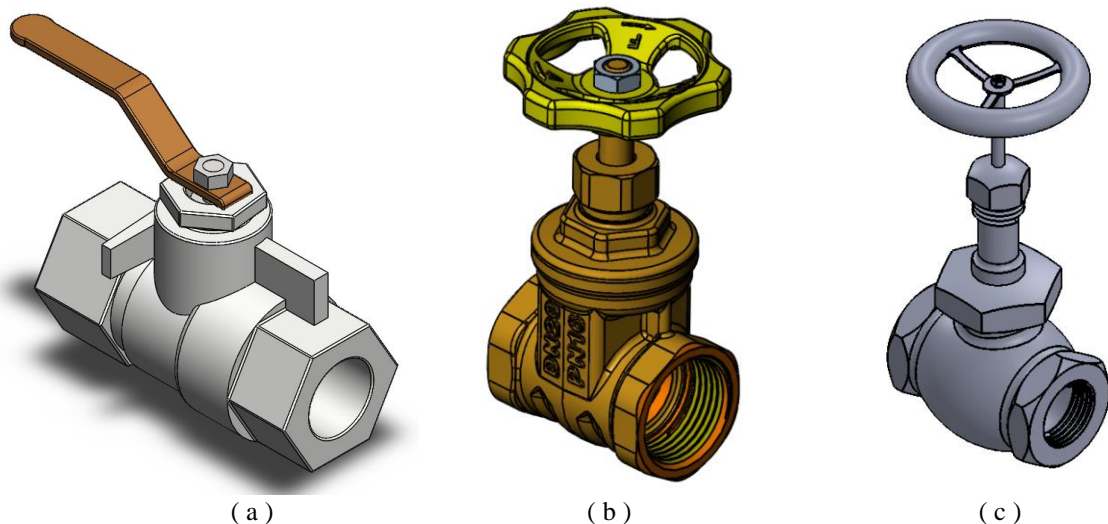
### 3.2. Numérico

Para desenvolver as soluções numéricas foi utilizado um *software* que faz uso do método de volumes finitos como forma de resolução, isso significa que a geometria utilizada na simulação é dividida em pequenas partes (células) que se interceptam em pontos chamados de "nós". O *software* é alimentado então seguindo a sequência de passos: definição da geometria; criação da malha, configuração do problema, e solução.

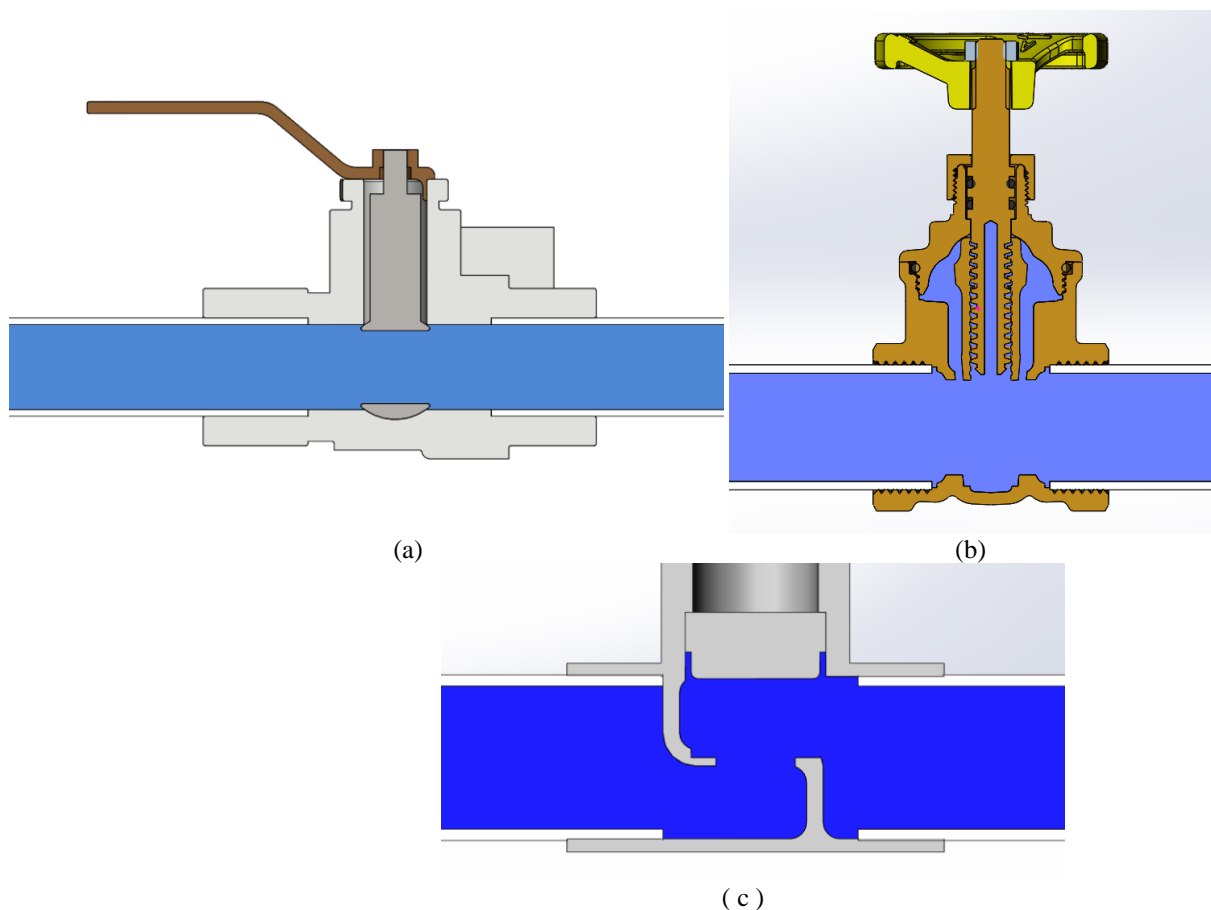
A obtenção da geometria é o primeiro passo na resolução dos problemas numéricos. Uma vez que é a geometria interna da válvula que vai interferir nas propriedades do perfil de escoamento interno e, conseqüentemente, na perda de carga, é de extrema importância que a mesma esteja representada da maneira mais fiel possível à sua real geometria.

Detalhes da geometria das válvulas podem ser encontrados em catálogos de fabricantes de válvulas, porém raramente são encontrados os detalhes construtivos internos em sua totalidade. Deste modo, os modelos tridimensionais utilizados nas simulações foram criados a partir de arquivos CAD, ou os detalhes geométricos em 2D, obtidos com os fabricantes das válvulas utilizadas no experimento.

Na Figura 3 é possível visualizar as válvulas utilizadas na simulação, enquanto que na Figura 4 é mostrada a seção transversal das válvulas com a representação do fluido passante.



**Figura 3: Vista isométrica da parte externa das válvulas: a) Esfera; b) Gaveta e c) Globo**



**Figura 4: Vista seccionada das válvulas a) esfera; b) gaveta e c) globo com representação do volume interno do fluido passante.**

Na Figura 4 pode ser visualizada a construção interna das válvulas, com a representação do duto e do volume interno da válvula. É importante notar que a área azul da Figura 4 representa o espaço vazio dentro da válvula e tubulação, significando que é nesse espaço que a água tem possibilidade de passagem. Para garantir que o perfil de velocidade ao chegar na válvula fosse totalmente desenvolvido, foi previsto na geometria um duto de 400 mm na região anterior da válvula e outro do mesmo tamanho na saída, deste modo poderá ser feita a análise do comportamento do fluido tanto antes da abertura da válvula, bem como a maneira com que o líquido se comporta após a sua passagem no interior da válvula.

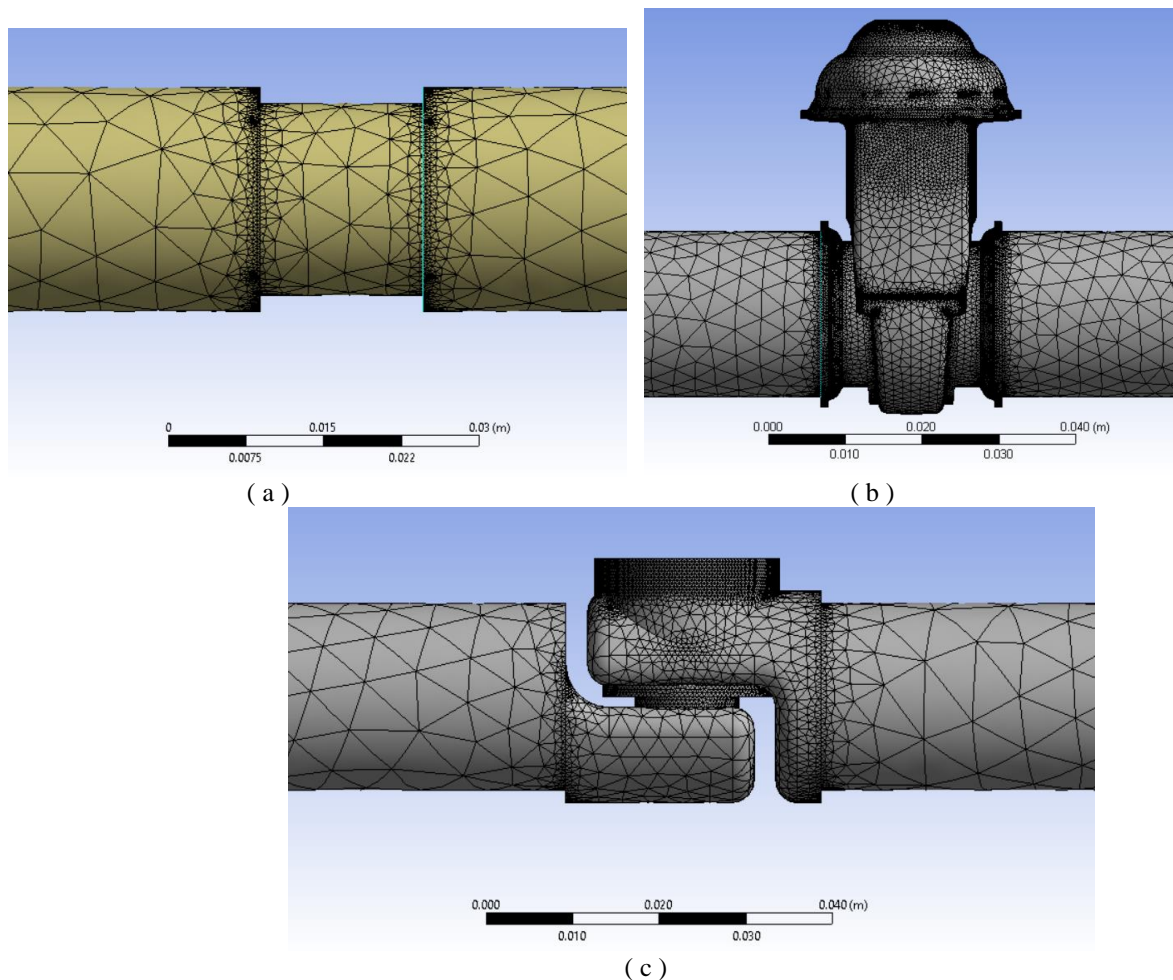
Na configuração de passagem de água com a válvula totalmente aberta é possível verificar, nas válvulas esfera e gaveta, que o obturador não interfere significativamente na área de passagem do fluido, e seus corpos não alteram a direção de passagem. No caso da válvula globo o corpo interno faz com que a sentido do fluido passe de horizontal para vertical (durante a passagem no orifício) e para horizontal novamente, após ser obstruído pelo obturador.

De posse da geometria da válvula e do seu respectivo volume interno há a necessidade de dividir o modelo em pequenas partes. A fase de criação da malha vai determinar o número de pontos e elementos em que as equações de conservação de massa, energia e de quantidade de movimento serão aplicadas.

Uma malha refinada garante resultados pontuais mais precisos, devido ao fato de que um número maior de equações será resolvido, obtendo-se então, mais valores de grandezas como pressão e velocidade. Isso permite que pequenas variações no escoamento, como mudanças de pressão e direção de fluxo, sejam observadas com mais detalhes.

Embora uma malha bastante refinada seja desejada para obter-se melhores e mais resultados, ela interfere também no custo computacional da simulação, uma vez que as equações governantes são de natureza demasiada complexa e tomam tempo para serem resolvidas.

Para garantir um nível de refinamento de malha adequado de uma maneira a não aumentar significativamente o tempo para obtenção de respostas optou-se por utilizar uma malha com refinamento localizado. O refinamento localizado permite que nas regiões de maior complexidade geométrica (no interior da válvula) o número de elementos seja significativamente superior que nas regiões de geometria simples. As malhas criadas para o volume interno das válvulas podem ser vistas na Figura 5.



**Figura 5: Malhas utilizadas no volume interno das válvulas a) esfera, b) gaveta e c) globo.**

Os elementos utilizados na simulação possuem faces de formato triangular, resultando em elementos tridimensionais de geometria tetraédrica. O número total de elementos foram 32.746 para a válvula esfera, enquanto que o número de nós foi de 54.025. Na válvula gaveta foram criados 644.655 elementos e 965.786 nós. Já na válvula globo o número de nós foi de 135.579 e de elementos 87.039. O número de elementos superior nas válvulas gaveta e globo deve-se à geometria de maior complexidade, mais detalhada, e com mais regiões de mudanças abruptas de geometria.

Ao final da etapa de criação da malha dá-se início a fase de configuração do problema. Nessa etapa são definidos os materiais, condições de contorno e condições de obtenção de respostas. As condições do problema utilizadas durante a simulação foram as seguintes:

- Água a 25°C (densidade de 997 kg/m<sup>3</sup>);
- Condição de não escorregamento, isto é, velocidade nula nas regiões mais externas do fluido (regiões de contato);
- Velocidade de entrada compatível com as velocidades medidas no experimento;
- Pressão manométrica nula na saída;
- Escoamento em regime permanente;
- Escoamento incompressível;
- Escoamento turbulento (observado nas medições experimentais).

Para ser possível fazer o comparativo do escoamento experimental com o simulado, foi necessário realizar diversas simulações, cada uma com um valor diferente de velocidade. Desse modo para cada uma das medidas experimentais foi realizada uma simulação, sendo a velocidade na entrada compatível com a velocidade medida no experimento. Desse modo um total de 30 simulações foram rodadas, 10 para cada tipo de válvula.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após serem realizados os experimentos na bancada e rodadas as simulações no *software* de volumes finitos, pode ser feito o comparativo dos resultados de queda de pressão e do coeficiente de perda de carga, além de ser possível analisar a natureza do fluxo no interior do tubo e da válvula a partir da visualização do perfil de velocidade e de pressão. De maneira a melhor interpretar o comportamento do fluido em cada válvula as discussões serão feitas em 3 partes: A primeira mostrando os resultados experimentais da perda de carga e os valores de coeficiente de perda de carga resultante de cada válvula, sendo estes calculados de forma analítica; A segunda parte trazendo o comportamento do escoamento

através da visualização dos perfis de velocidade e pressão resultantes das simulações computacionais; A terceira parte mostrando os valores simulados de coeficiente de perda de carga e sua comparação com o método experimental.

#### 4.1 Resultados experimentais

Para cada tipo de válvula, foram realizadas aproximadamente 10 medições experimentalmente na bancada de hidráulica, cada uma com um valor diferente de velocidade. Os resultados medidos para a válvula esfera, gaveta e globo estão dispostos nas Tabela 1, 2 e 3, respectivamente.

**Tabela 1: Resultados experimentais para número de Reynolds, queda de pressão e coeficiente de perda de carga para válvula esfera.**

Velocidade (m/s)	Reynolds	$\Delta P$ (Pa)	K
1,44	34851	981	0,95
1,82	44022	1961	1,19
2,05	49525	1961	0,94
2,27	55028	4903	1,90
2,43	58696	5884	2,01
2,65	64199	6865	1,96
2,88	69702	7845	1,90
3,18	77039	9807	1,94
3,34	80707	10787	1,95
3,49	84376	11768	1,94
3,71	89878	14710	2,14
3,94	95381	15691	2,03

**Tabela 2: Resultados experimentais para número de Reynolds, queda de pressão e coeficiente de perda de carga para válvula gaveta.**

Velocidade (m/s)	Reynolds	$\Delta P$ (Pa)	K
2,12	51359	2942	1,31
2,43	58696	2942	1,00
2,65	64199	5884	1,68
2,96	71536	7845	1,80
3,26	78873	9807	1,85
3,41	82541	10787	1,86
3,64	88044	11768	1,78
3,87	93547	12749	1,71
3,94	95381	12749	1,65

**Tabela 3: Resultados experimentais para número de Reynolds, queda de pressão e coeficiente de perda de carga para válvula globo.**

Velocidade (m/s)	Reynolds	$\Delta P$ (Pa)	K
0,61	14674	13729	74,89
0,80	19259	21575	68,31
0,91	22011	27459	66,57
1,06	25679	35304	62,88
1,21	29348	45111	61,51
1,29	31182	55898	67,52
1,48	35678	70608	64,82
1,59	38519	80415	63,65
1,74	42188	91202	60,18
1,84	44572	102970	60,87

1,90	45856	107873	60,25
1,97	47690	114738	59,25

Na Tabela 1 pode ser observado que a característica do escoamento é de turbulência, uma vez que o número de Reynolds é significativamente maior que 2300. Devido a dependência do número de Reynolds com a velocidade (Equação 15), o aumento desse parâmetro aumenta proporcionalmente à velocidade.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \quad (15)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do fluido, 997 kg/m<sup>3</sup> para água a 25°C,  $u$  é a velocidade média do escoamento, em m/s,  $D$  é o diâmetro da tubulação, em m, e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica, 0,00089 Ns/m<sup>2</sup> para a água a 25°C.

O coeficiente de perda de carga, resultante da diferença da pressão na entrada da válvula e da pressão na saída pôde ser calculado com a Equação 8. O coeficiente de perda de carga  $K$ , mostra-se altamente dependente da velocidade, uma vez que há um aumento de 124% entre o menor e o maior valor de coeficiente para um aumento de 173% no valor da velocidade para a válvula esfera. Na válvula gaveta o aumento foi menos significativo, correspondendo a um aumento de 63% no valor de  $K$  diante de um aumento de 86% no valor da velocidade. No caso da válvula globo o aumento percentual do coeficiente de perda de carga foi de 26% diante de um aumento de 225% no valor de velocidade, indicando uma menor variação no valor de  $K$ .

Na Tabela 4 pode ser visto que o coeficiente de perda de carga, em seu valor médio para os valores de velocidade utilizados no experimento, é inferior para as válvulas esfera e gaveta. A válvula globo apresenta um valor de  $K$  elevado justamente pelo seu construtivo interno que muda bruscamente a direção do escoamento, enquanto que as válvulas esfera e gaveta, em seu estado totalmente aberto, causam pequenas obstruções ao fluido.

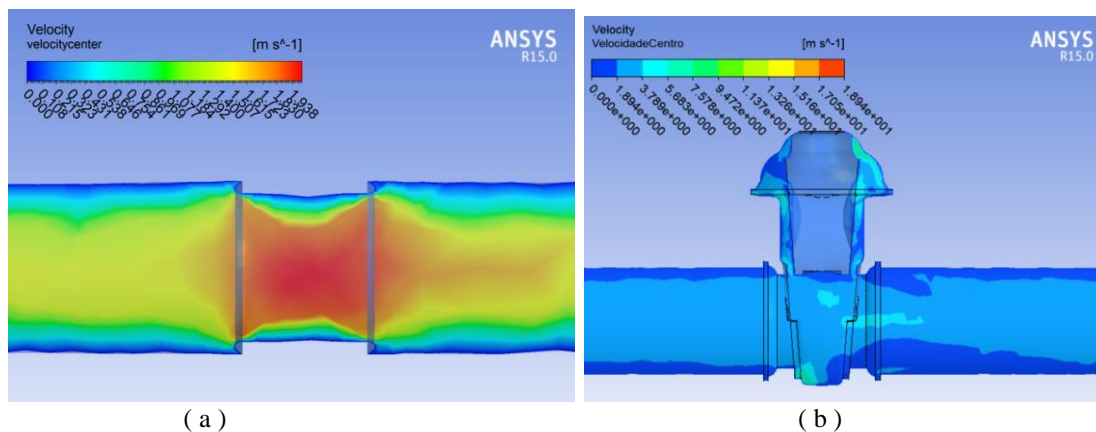
**Tabela 4: Resultados experimentais de média, variância e desvio padrão do coeficiente de perda de carga das válvulas.**

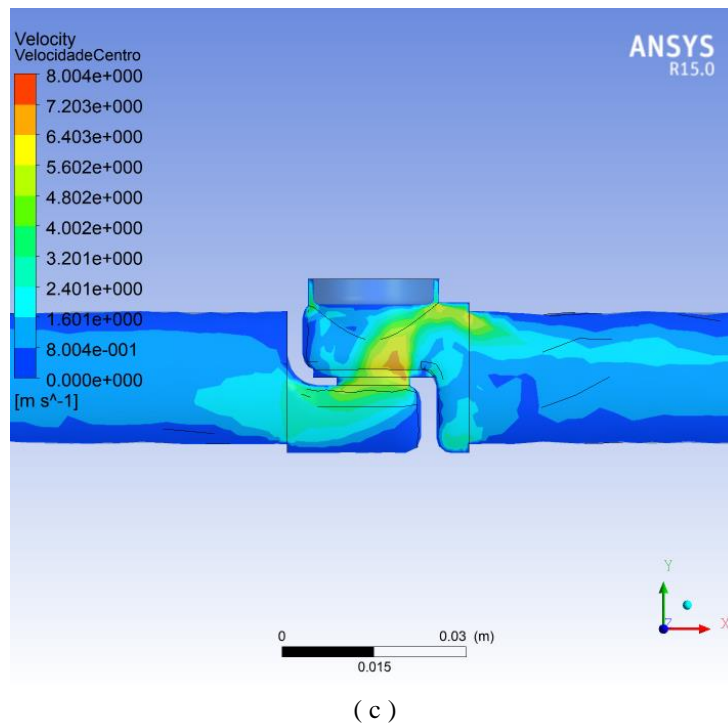
Válvula	Média	Variância	Desvio Padrão
Esfera	1,78	0,14	0,38
Gaveta	1,60	0,09	0,29
Globo	63,66	9,22	3,04

A variância e o desvio padrão são parâmetros que buscam medir a dispersão em uma série de dados. Dessa forma pode se concluir que a dispersão entre os resultados da válvula esfera e gaveta são mais expressivos, já que o desvio padrão corresponde a 21% e 18% do valor da média dessas válvulas, enquanto que para a válvula globo o desvio padrão é menor que 5% do valor da média dos resultados.

#### 4.2. Resultados das simulações: perfil de velocidade e de pressão

Devido ao escoamento turbulento observado nos resultados experimentais a simulação foi realizada sob condições semelhantes, respeitando-se as condições de contorno e aplicando-se as hipóteses simplificadoras da situação real. Na Figura 6 pode ser observado o perfil de velocidades na seção transversal correspondente ao centro da área de escoamento de cada uma das válvulas em estudo e tubulação diretamente anterior e posterior a elas.



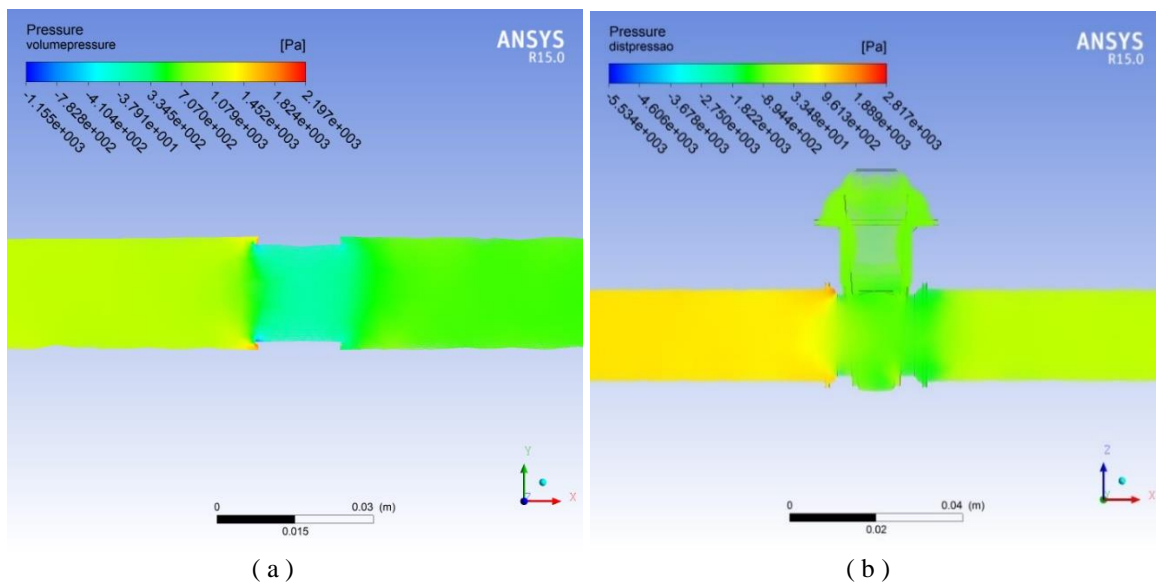


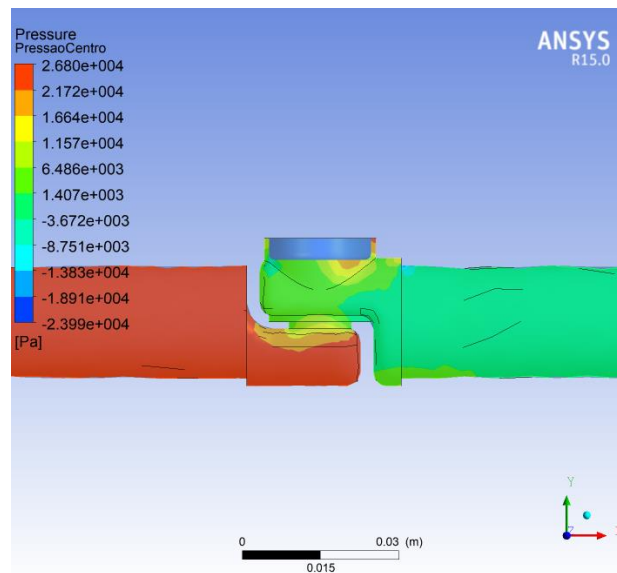
**Figura 6: Distribuição de velocidade no plano central do escoamento na válvula a) esfera; b) gaveta e c) globo.**

A Figura 6 utiliza os resultados computacionais gerados a partir de uma velocidade de entrada de 1,44 m/s no caso de válvula esfera, 2,12 m/s para gaveta e 1,48 m/s para válvula globo. Importante ressaltar que foram realizadas simulações para cada valor de velocidade medido experimentalmente, porém como todas as simulações apresentam comportamento semelhante, optou-se por mostrar apenas a distribuição de apenas uma simulação para cada válvula. Nela pode ser observada os diferentes gradientes de velocidade. Na parte mais externa são observados os efeitos da parede da válvula e da tubulação, nessa região a velocidade é nula, respeitando-se a condição de contorno de parede sem escorregamento, conforme se avança em direção ao centro do perfil se observa um aumento de velocidade, sendo que no meio do perfil desenvolve-se os maiores valores dessa variável.

Ao adentrar na válvula, a magnitude da velocidade aumenta devido a diminuição da área de passagem. Após a passagem na válvula o perfil de velocidade volta ao comportamento encontrado na área anterior à válvula.

O perfil da distribuição de pressão para os três tipos de válvulas, por sua vez pode ser visto na Figura 7.





( c )

**Figura 7: Distribuição de pressão ao longo do volume para a válvula a) esfera; b) gaveta e c) globo.**

Na Figura 7 pode ser visto que a pressão tem seus maiores valores nas regiões onde o fluido sofre obstruções (parede da válvula). Ao longo do eixo x a pressão sofre uma diminuição de magnitude, é a perda de carga, resultante da viscosidade do fluido, fricção, rugosidade da parede e mudanças de geometria ao longo do comprimento.

Na válvula globo, mostrada na Figura 7-c), a diferença é mais marcante. O fluido começa sua passagem pela válvula com uma pressão elevada, e, o bloqueio gerado pelo interno da válvula obriga o fluido a passar pelo orifício superior, mudando a direção e causando uma diminuição expressiva nos valores de pressão.

#### 4.3. Resultados das simulações: coeficiente de perda de carga

Para calcular o coeficiente de perda de carga  $K$  foi criado um plano auxiliar da seção que representa a entrada na válvula e um plano auxiliar na saída da válvula. Com o auxílio do *software* foram calculados os valores de pressão para cada um dos pontos desse plano, e a perda de carga foi calculada com base na média das medidas de pressão da entrada menos a média de pressão na saída.

Para a válvula esfera, os resultados estão dispostos na Tabela 5, onde pode ser visto os resultados da simulação para diferentes valores de velocidade. Nota-se que o comportamento da queda de pressão é proporcional ao aumento de velocidade. Porém, diferentemente dos valores obtidos experimentalmente, os valores encontrados para o coeficiente de perda de carga apresentaram poucas variações entre si. Seu valor médio ficou em 0,45, com um desvio padrão de 0,014.

**Tabela 5: Resultados da simulação para válvula esfera.**

Velocidade (m/s)	$\Delta P$ (Pa)	$K$
1,44	468	0,45
1,81	725	0,44
2,04	986	0,48
2,27	1165	0,45
2,42	1319	0,45
2,65	1503	0,43
2,88	1769	0,43
3,18	2129	0,42
3,33	2482	0,45
3,48	2654	0,44
3,71	3039	0,44
3,94	3351	0,43

Na Tabela 6, por sua vez, são expostos os valores encontrados para perda de carga e K referentes à válvula gaveta. Pode ser visto que, similarmente à válvula gaveta, os valores de K permaneceram praticamente constantes, apresentando um valor médio de 0,45 e com um desvio padrão de 0,0048.

**Tabela 6: Resultados de perda de carga e K da válvula gaveta.**

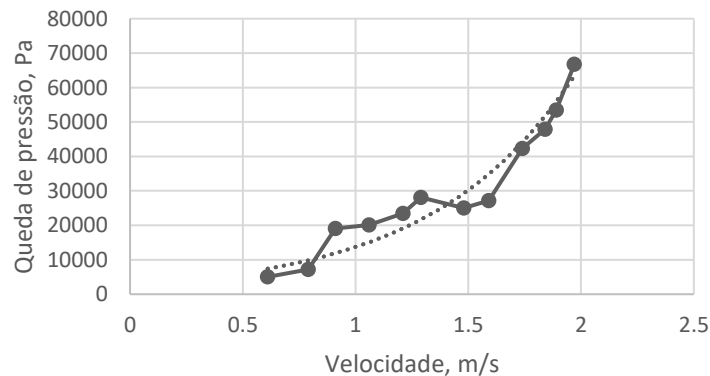
Velocidade (m/s)	$\Delta P$ (Pa)	K
2,12	1000	0,45
2,42	1272	0,44
2,65	1570	0,45
2,95	1940	0,45
3,25	2379	0,45
3,41	2582	0,45
3,63	2907	0,44
3,86	3329	0,45
3,94	3396	0,44

Finalmente, a Tabela 7 exhibe os resultados referentes a válvula globo. Por sua vez, esses resultados refletem em maiores dispersões nos valores de K, que possui uma média de 29,59 e um desvio padrão de 4,53. Embora o valor de dispersão tenha sido maior que os valores das outras válvulas, nota-se que o aumento de velocidade não é o fator de maior relevância nos resultados experimentais, tendo em vista que os valores de K aumentaram com menor intensidade que os valores de velocidade.

**Tabela 7: Resultados de perda de carga e K da válvula globo.**

Velocidade (m/s)	$\Delta P$ (Pa)	K
0,61	5022	27,07
0,79	7193	23,12
1,21	23462	32,15
1,29	28063	33,83
1,48	25015	22,91
1,59	27176	21,56
1,74	42298	28,03
1,84	47895	28,38
1,89	53472	30,03
1,97	66718	34,49

Apesar da pouca variabilidade dos valores de K, nota-se que a perda de carga, expressa em Pa, de fato aumenta significativamente com o aumento de velocidade, já que um aumento de 222% no valor da velocidade ocasionou um aumento de 1228% nos valores de K. Esse aumento ocorre de forma exponencial, como mostra a Figura 8.



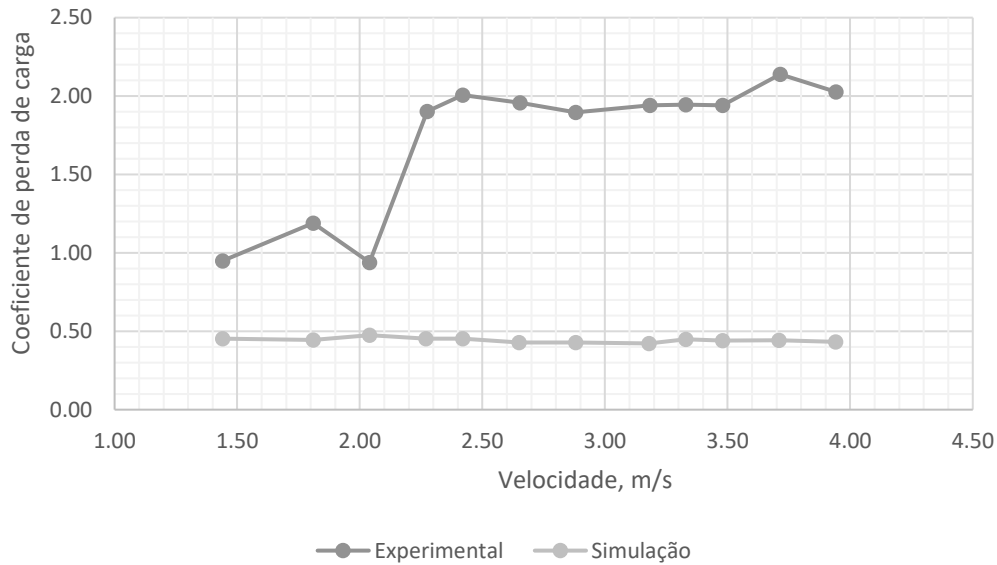
**Figura 8: Relação entre o valor de queda de pressão com o aumento da velocidade para as simulações envolvendo a válvula globo. Onde linha pontilhada representa linha de ajuste e linha contínua representa**

**resultados da simulação.**

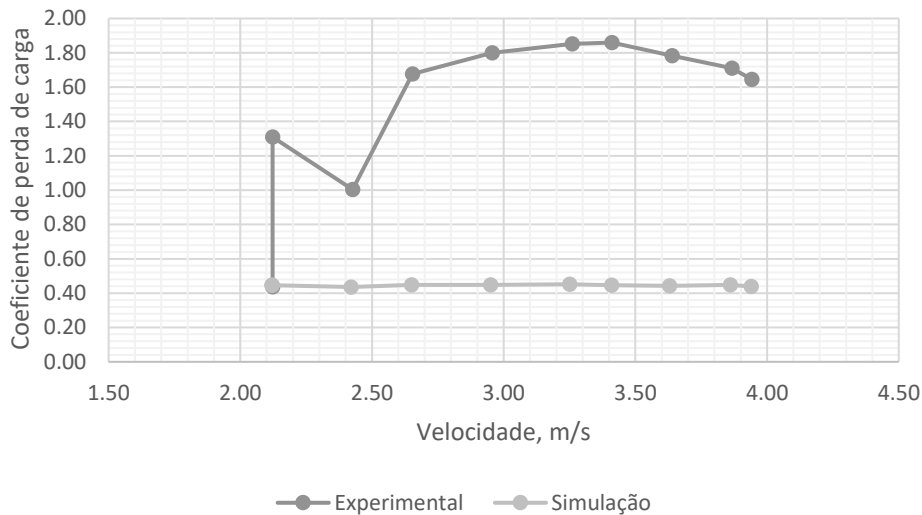
No gráfico da Figura 8 os pontos representam os valores obtidos de queda de pressão para cada velocidade e a linha tracejada a linha de tendência de forma exponencial.

**4.3. Comparação de métodos**

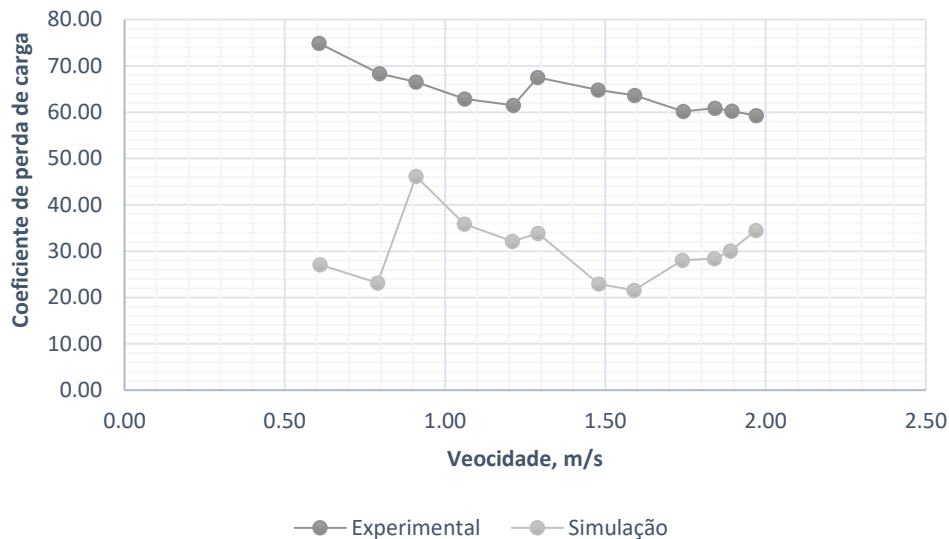
Como foram calculados os resultados de perda de carga e de K usando os dois métodos, é possível então fazer uma comparação entre esses resultados. A visualização comparativa desses resultados pode ser feita com a ajuda dos gráficos das Figuras 9, 10 e 11, que mostram a relação entre a velocidade, no eixo x (m/s) e o coeficiente de perda de carga, no eixo y (adimensional).



**Figura 9: Gráfico velocidade de escoamento versus K para a válvula esfera.**



**Figura 10: Gráfico velocidade de escoamento versus K para a válvula gaveta.**



**Figura 11: Gráfico velocidade de escoamento versus K para a válvula globo.**

A partir das Figuras 9, 10 e 11 é possível observar que houve discrepância entre os resultados experimentais e das simulações. Nos três casos os resultados experimentais se mostraram superiores aos resultados da simulação. Desse modo o erro absoluto médio do valor de K foi de 1,29 para a válvula esfera, 1,06 para a válvula gaveta e 33,93 para a válvula globo.

A diferença entre os valores de K medidos pode ser o resultado de diversas fontes de erro tanto na parte experimental quanto de simulações. As principais sendo:

a) Imprecisões geradas por equipamentos de medição: durante a fase experimental foram utilizados equipamentos de medição de vazão e de medição de pressão, quais sejam rotâmetro e manômetros de Bourdon. Como a visualização da medida é feita diretamente na escala dos medidores, existe um erro de paralaxe associado a cada medição. Além disso a má calibração dos equipamentos pode estar associada a uma grande parcela de erro.

b) Condições das válvulas usadas no experimento: a bancada de hidráulica se encontrou ociosa por um período de meses. Sendo pouco utilizada e estando em condições de umidade e contato com o ar, é criado um ambiente propício para a oxidação das paredes da válvula. A oxidação das paredes de válvulas e tubulação resulta em um aumento da rugosidade das paredes, o que faz com que a perda de carga aumente. Valores de rugosidade utilizados na simulação, desse modo, podem não ser iguais às rugosidades encontradas nas válvulas reais.

c) Geometria simplificada das válvulas usadas na simulação: Os modelos utilizados nas simulações foram feitos a partir dos dados divulgados pelas fabricantes de válvulas, esses dados não contemplavam todas as medidas envolvendo a geometria interna das válvulas. Desse modo, as válvulas reais apresentam detalhes de construção e irregularidades que foram impossíveis de prever na geometria utilizada para as simulações.

d) Erros inerentes à simulação: simulações de CFD são realizadas através da resolução iterativa das equações governantes, significando que soluções mais precisas são obtidas quando mais iterações são realizadas. Na presente simulação foram realizadas 100 iterações por simulação, esse número de iterações foi suficiente para se obter respostas convergentes, porém ainda há um erro associado. Além disso uma parcela de erro está associada à discretização, o erro tende a diminuir com a redução do tamanho dos elementos, como é impossível dividir o escoamento em infinitas partes sempre haverá um pequeno erro associado na simulação.

e) Condição de contornos da saída da válvula: a bancada experimental é construída de modo a possuir um elevado número de curvas e acessórios, tanto na tubulação anterior quanto na posterior à válvula. A presença de curvas e coluna d'água na tubulação posterior à válvula põe em questionamento a precisão da condição de pressão nula na região de saída de água da válvula.

## 5. CONCLUSÕES

No presente trabalho pode ser demonstrada a metodologia para obtenção do coeficiente de perda de carga para acessórios de tubulação, mais especificamente para válvulas esfera, gaveta e globo. O coeficiente de perda de carga foi obtido de maneira experimental e de maneira computacional, com a utilização de um *software* de dinâmica dos fluidos computacional (CFD).

Resultados experimentais mostraram um aumento da queda de pressão e aumento no coeficiente de perda de carga, K, de acordo com o aumento da velocidade de escoamento. As válvulas esfera e gaveta apresentaram resultados semelhantes de K, tendo uma média de 1,78 e 1,60, respectivamente. A válvula globo por sua vez mostrou um resultado superior, com um valor de K médio de 63,66. O valor elevado no coeficiente de perda de carga da válvula globo é justificável devido ao seu construtivo interno, que faz com que o fluido que esco internamente sofra modificações

abruptas em sua direção, enquanto que nas válvulas gaveta e esfera o fluido é obstruído de maneira mais suave, sofrendo somente reduções na área de passagem de fluido.

Com a utilização das simulações puderam ser visualizados os perfis de velocidade e pressão na região interna das válvulas. De modo geral, as velocidades encontradas nas regiões perto da parede foram menores (respeitando as condições de contorno encontradas no experimento), a velocidade sofreu aumento de intensidade conforme aproximação das regiões de menor seção.

Com os cálculos puderam ser notados que os resultados das simulações apresentaram grandes divergências com os resultados experimentais devido a grande gama de fontes de erros do experimento e da simulação. Acredita-se que as maiores fontes de erros estejam nos valores de rugosidade utilizados na simulação, já que os valores reais de rugosidade não puderam ser medidos, e de possíveis divergências em detalhes do construtivo interno das válvulas.

A área de CFD e escoamento em tubulações é ampla, permitindo a integração entre os dois assuntos. Para estudar a influência das possíveis fontes de erro citadas previamente, futuros trabalhos podem ser realizados analisando-se a relação da rugosidade do interior da válvula com o coeficiente de perda de carga, tanto mudanças em rugosidade causadas por oxidações como quanto a referente à mudança de material de construção ou de tratamentos de superfícies de válvulas. Além disso novas pesquisas podem ser realizadas escolhendo-se um tipo de válvula em específico e propondo mudanças em seu construtivo interno para analisar a influência da geometria na perda de carga.

## 6. REFERÊNCIAS

- Almeida, L.T., Angelo, E., Barrios, D.B., Campanella, F.L., 2010, “Utilização Da Dinâmica Dos Fluidos Computacional Na Compreensão Do Coeficiente De Perda De Carga Localizada”. Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.
- Angelo, E., Temistóteles, L., Campanella, F.L., Barrios, D.B., 2000, “Estudo Numérico Da Perda De Carga De Uma Válvula Do Tipo Globo”, Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica. Vol. 14, N.º 2, pp. 41-62.
- Branco, R., 2010, “Tipos de válvulas industriais e suas aplicações”, disponível em <<http://www.manutencao.esuprimentos.com.br/conteudo/1945-tipos-de-valvulas-industriais/>>, acesso em 05/03/2017.
- Bordalo, S.N., Ferziger, J.H. and Kline, S.J., 1989, “The Development of Zonal Models for Turbulence”, Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Vol. 1, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 41-44.
- Castro, R.S., Eriksson, K.T., 2012, “Aplicação de válvulas de controle em processos industriais”, Centro de Pós-Graduação Oswaldo Cruz, disponível em <<http://revista.oswaldocruz.br/Content/pdf/Rodrigo%20Souza%20Castro.pdf>>. Acesso em 05/03/2017.
- Celk, I.B., Ghia, U., Roache, P.J., Freitas, C.J., Coleman, H., Raad, P.E., 2008, “Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications”. Transactions of the ASME, Vol. 130.
- Çengel, Y. A., Cimbala, J.M., 2006, “Fluid mechanics : fundamentals and applications” McGraw-Hill series in mechanical engineering.
- Crowe, C.T., Elger, D.F., Williams, B.C., Roberson, J.A., 2009, “Engineering Fluid Mechanics”, 9 ed., John Wiley & Sons.
- Fox, R.W., McDonald, A.T., Pritchard, P.J., 2010, “Introdução à Mecânica dos Fluidos”. Sétima Edição, LTC Ltda.
- Lee, Y.B., 2003, “Studies on the growth of the frost layer based on heat and mass transfer through porous media”, Ph.D. thesis, Seoul National University, Seoul.
- Mazumder, Q.H., 2012, “CFD Analysis of the Effect of Elbow Radius on Pressure Drop in Multiphase Flow”, Modelling and Simulation in Engineering, Volume 2012.
- Nakayama, Y., Boucher, R.F., 2000, “Introduction to Fluid Mechanics”. Butterworth-Heinemann.
- Saleh, J., 2002, “Fluid Flow Handbook”. Primeira edição, McGraw Hill Handbooks.
- Sehn, A., 2015, “Estudo Numérico do Efeito de Obstruções na Queda de Pressão do Escoamento em Tubulações”. Monografia ( Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica)-Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Soviero, P.A.O. and Lavagna, L.G.M., 1997, “A Numerical Model for Thin Airfoils in Unsteady Motion”, RBCM- J. of the Brazilian Soc. Mechanical Sciences, Vol. 19, No. 3, pp. 332-340.
- Sparrow, E.M., 1980, “Forced Convection Heat Transfer in a Duct Having Spanwise-Periodic Rectangular Protuberances”, Numerical Heat Transfer, Vol. 3, pp. 149-167.
- White, F.M., 2011, “Mecânica dos fluidos”, McGraw-Hill Education, sexta edição.

## ANALYSIS OF PRESSURE LOSS IN VALVES USING EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL METHODS

Cleomar Maraga, [cleomar.maraga@gmail.com](mailto:cleomar.maraga@gmail.com)<sup>1</sup>

Fernanda Raquel Brand (orientador), [fernanda.brand@farroupilha.ifrs.edu.br](mailto:fernanda.brand@farroupilha.ifrs.edu.br)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul-Câmpus Farroupilha, Av. São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP: 95180-000, Farroupilha/RS

**Abstract:** *The pressure loss coefficient can be obtained experimentally through bench and pressure and flow measurement instruments or can be obtained in a computational way through computational fluid dynamics simulations. Thus, the objective of the work is to present the necessary methodology to calculate this coefficient experimentally and computationally, making a comparison of both results. In order to do this, a hydraulic stand was used with rotation control of the pump rotor, flowmeter type rotameter, pressure sensors and accessories such as ball valve, gate valve and globe valve. In the computational part, it was used an iterative software in which 30 simulations were performed in order to represent the conditions of the practical experiment. In addition, the work aims to be a material to support the future discipline of fluid mechanics and industrial instrumentation, disciplines that study flow inside ducts and valves. It can be observed that the flow behavior occurred similarly between experimental and computational results, albeit at different intensities. The experimental methods resulted in an average K value of 1.78, 1.6 and 63.7 for the ball, gate and globe valves, respectively, whereas the values obtained by computational methods were 0.45 for both ball and gate valves and 29.6 for the globe valve. It was observed that the increase in velocity caused an increase in the head loss in all the valves studied. Despite this, the pressure loss coefficient remained constant in the simulations while this parameter was on the rise in the experimental activities. The variation between results is derived from the impossibility of measuring the roughness of the valve walls and the lack of accuracy in the valves inner geometry, as well as errors inherent to the process of measurement readings and the discretization process during the simulations.*

**Keywords:** *head loss, pressure loss coefficient, CFD, industrial valves.*