

# UTILIZAÇÃO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL NA COMPREENSÃO DO COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA LOCALIZADA

**Luciano Temistocles de Almeida**<sup>1</sup>; **Edvaldo Angelo**<sup>2</sup>; **Daniel Benítez Barrios**<sup>3</sup>; **Fabício Leonardi Campanella**<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola de Engenharia, Grupo de Simulação Numérica  
Rua da Consolação, 930.

01302-907 – São Paulo – SP

<sup>1</sup> temistocles.mack@gmail.com

<sup>2</sup> eangelo@mackenzie.com.br

<sup>3</sup> danielbb@mackenzie.com.br

<sup>4</sup> flc1801@yahoo.com.br

**Resumo:** *O presente trabalho apresenta uma proposta metodológica para a complementação dos estudos sobre o coeficiente de perda de carga localizada para singularidades, na disciplina Fenômenos de Transporte dos cursos de graduação. Através de um exemplo é descrito o método utilizado na Universidade Presbiteriana Mackenzie na iniciação de alunos de graduação nas técnicas numéricas de solução de problemas envolvendo a perda de carga localizada. O apoio pedagógico para a compreensão dos fenômenos de transporte (transferência de massa, energia e quantidade de movimento) é feito através de da utilização um programa comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional, o ANSYS CFX®.*

**Palavras-chave:** *Dinâmica dos Fluidos Computacional, simulação numérica, coeficiente de perda de carga, hidrodinâmica.*

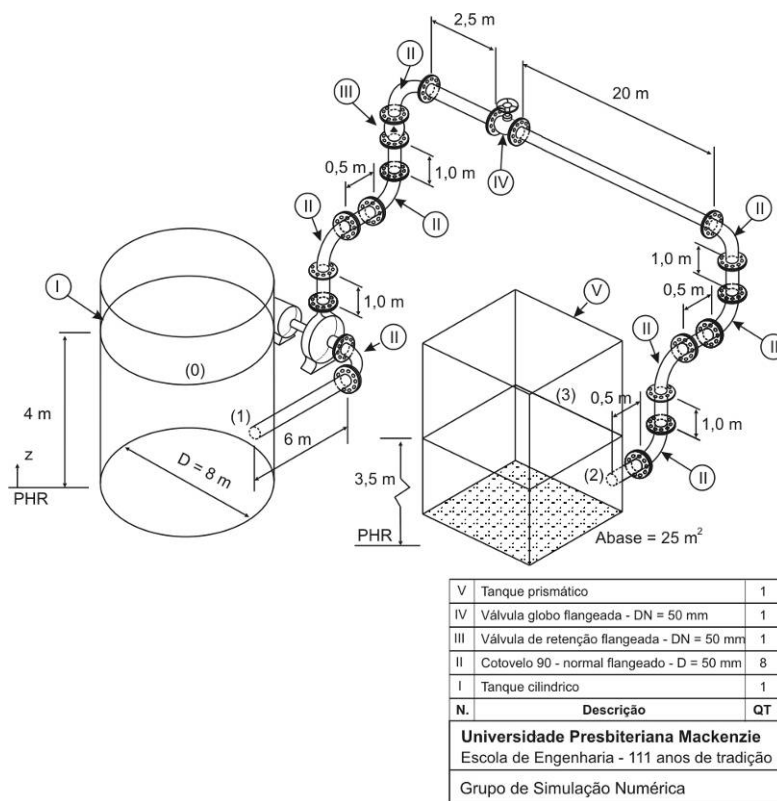
## 1. INTRODUÇÃO

A apresentação de alguns tópicos ministrados em cursos de Mecânica dos Fluidos, Transferência de Calor e Massa ou ainda em Fenômenos de Transporte, todas disciplinas básicas dos cursos de engenharia, exige grau de abstração relativamente grande por parte dos acadêmicos, especialmente porque não são, na maioria das vezes, visualmente identificáveis. Mesmo nos casos em que é possível o uso de laboratórios didáticos, certas grandezas só podem ser determinadas indiretamente, através de relações matemáticas. Nestes casos, a compreensão pode ser prejudicada, e em muitas circunstâncias, conceitos imprecisos podem ser indevidamente fixados durante o processo de aprendizado. Estas deficiências teóricas de formação podem se propagar ao longo de toda a vida do engenheiro, levando a erros potencialmente perigosos, em uma condição de repercussão muito desfavorável ao profissional.

Dentre os muitos exemplos que podem ser citados, está o coeficiente de perda de carga localizada, determinado experimental ou numericamente para singularidades nas instalações hidráulicas. Os fabricantes das válvulas, conexões e outras singularidades, divulgam para seus produtos um parâmetro adimensional capaz de fornecer uma informação indispensável no

desenvolvimento do projeto das instalações hidráulicas, o coeficiente de perda de carga localizada. O número adimensional está diretamente relacionado com a perda de energia que o fluido terá ao escoar pela singularidade. Aos acadêmicos durante a exposição do conceito em aula são indicados os motivos das irreversibilidades do escoamento. Todavia, o modelo matemático apresentado utiliza uma simplificação das equações de conservação completas. A simplificação é a redução de um fenômeno intrinsecamente tridimensional a uma condição matemática unidimensional. Essa simplificação é necessária para obtenção de uma solução analítica. Evidentemente, soluções numéricas das equações também poderiam ser apresentadas, no entanto, a disciplina Fenômenos de Transporte corriqueiramente é ministrada aos acadêmicos nas etapas iniciais dos cursos de engenharia, dificultando soluções matemáticas mais elaboradas, em uma posição do curso em que há ainda grande dificuldade de assimilação de técnicas matemáticas mais apuradas.

A figura 1 exemplifica uma instalação típica. As irreversibilidades são denominadas didaticamente como perdas de carga distribuídas, que ocorrem nos tubos, e as perdas de carga localizadas, que ocorrem nas singularidades como cotovelos, válvulas e conexões, dentre outros.



**Figura 1.** Exemplo de uma instalação hidráulica típica.

As simplificações mencionadas das equações são válidas em apenas alguns casos muito particulares, que na prática da engenharia são muito raramente encontrados. A solução dos formatos completos das equações não tem métodos analíticos de resolução, de tal forma que é necessário um método numérico para a solução do problema.

De uma forma simples e interativa, os estudantes podem compreender onde, porque e o que é de fato a perda de carga localizada e a sua diferença em relação à distribuída. A proposta do presente trabalho é uma sugestão de complementação didática aplicada com sucesso na Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie para a disciplina de Fenômenos de Transporte. Essa complementação é aplicada a alunos interessados na

utilização de ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional em problemas de interesse da engenharia, valendo-se de um software comercial denominado ANSYS CFX®. Geralmente nas Universidades, somente nos cursos de pós-graduação é possível a iniciação dos estudos nessa área.

A complementação se dá de forma voluntária pelos alunos, através do uso dos métodos numéricos na solução de diversos projetos, dentre os quais podem ser citados os projetos de iniciação científica, projetos temáticos e trabalhos de conclusão de curso (no Mackenzie, denominados por Trabalhos de Graduação Interdisciplinar). Dentre os principais projetos temáticos atualmente desenvolvidos na Escola de Engenharia, podemos citar: o aerodesign, o carro de economia de combustível, o carro elétrico e o mini-baja. Todos relacionados a competições entre equipes de diversas Universidades, visando obter soluções peculiares na engenharia.

O Grupo de Simulação Numérica (GSN) recebe os alunos interessados, que devem obrigatoriamente ter frequentado e sido aprovados nas disciplinas de Fenômenos de Transporte. O contato dos alunos com as ferramentas computacionais é realizado cinco etapas: (a) Apresentação das capacidades e exemplos da simulação numérica da dinâmica dos fluidos aplicada a problemas de engenharia; (b) Apresentação de casos exemplo já realizados no laboratório; (c) Descrição das vantagens do uso da Dinâmica dos Fluidos Computacional; (d) Breve introdução teórica e indicação de bibliografia básica sobre o tema e, (e) Aplicação dos conceitos com o uso de um programa comercial de CFD, o ANSYS CFX®, em um problema de interesse.

A seguir são descritas as etapas aplicadas a um trabalho de iniciação científica realizado por um aluno do curso de engenharia mecânica como exemplo da metodologia aplicada no Grupo de Simulação Numérica, na Universidade Presbiteriana Mackenzie.

## **2. CASO EXEMPLO: ESTUDO NUMÉRICO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA HASTE NA PERDA DE CARGA DE UMA VÁLVULA DO TIPO GLOBO**

O exemplo escolhido para apresentação é a aplicação da complementação didática ao desenvolvimento de um trabalho de iniciação científica. O aluno do curso de engenharia mecânica Luciano Temistocles de Almeida está atualmente participando do processo do desenvolvimento através do programa de iniciação científica, sendo bolsista do Fundo Mackenzie de Pesquisa (Mackpesquisa). Inicialmente as etapas (a), (b) e (c) foram apresentadas ao estudante por meio de seminários ministrados no laboratório do Grupo de Simulação Numérica. As etapas de (c) até (e) são detalhadamente descritas a seguir.

### **2.1 Etapa (c)**

Aos alunos é apresentada a Dinâmica dos Fluidos Computacional destacando os fatos descritos resumidamente nos próximos parágrafos.

Deve ser destacado enfaticamente que essa nova abordagem de resolução dos problemas envolvendo dinâmica dos fluidos, não substitui as outras duas técnicas de solução de problemas (a saber, experimental e teórica) e que, pelo contrário, elas se complementam. A técnica analítica possibilita a estimativa inicial de grandezas e apresenta diretriz e limite na exploração do estudo. Os modelos matemáticos complexos, resolvidos matematicamente, são capazes de proporcionar análise de falhas e apontar dentre as muitas combinações de design, as mais eficientes, diminuindo muito a etapa de validação, geralmente findada pela construção física e teste de protótipos. Desta maneira, o estudo e a simulação computacional podem limitar os caros testes de laboratório àqueles indispensáveis, contribuindo para diminuição do tempo total de projeto.

A dinâmica dos fluidos computacional, na literatura inglesa denominada “Computational Fluid Dynamics” (CFD) é uma poderosa ferramenta na análise de escoamentos, tanto internos como externos. Historicamente, escoamentos complexos, como por exemplo, escoamentos internos e, entre eles, aqueles que se desenvolvem no interior de válvulas, só podiam ser analisados através de elaboradas montagens experimentais. Alternativamente, os métodos analíticos geralmente são fundamentados sobre hipóteses simplificadoras que, em muitas situações práticas, limitam a solução à obtenção de respostas capazes de capturar apenas a ordem de grandeza dos verdadeiros resultados.

A construção de bancadas experimentais (túneis de vento, túneis de choque, instalações hidráulicas) demandam grande quantidade de recursos, sejam eles materiais ou humanos. Inicialmente, requerem espaço físico, que, em determinados arranjos podem ser de razoável tamanho. Posteriormente, um grande número de sensores e medidores calibrados adequadamente (que certamente levarão a um erro sistemático na medição dos resultados, pela introdução dos próprios instrumentos, que alterarão a característica real do fenômeno), e, finalmente, pessoal especializado com treinamento e conhecimento prático para operação desses sensores e montagem de dispositivos. Além disso, é bastante comum em projetos que propõem desenhos inovadores, a necessidade do teste de diversos protótipos. Nestes casos, o tempo para preparação e execução desses testes pode ser muito elevado. Uma alternativa que não substitui completamente, mas pode reduzir notoriamente a quantidade de testes de laboratório a poucas horas de bancada é o uso da Dinâmica dos Fluidos Computacional. Com o avanço tecnológico dos computadores, a capacidade de processamento vem crescendo exponencialmente nos últimos anos e, projeções sinalizam para tecnologias cada vez mais acessíveis e poderosas do ponto de vista do processamento numérico.

Esses ferramentais numéricos têm aumentado muito a capacidade de realizar projetos mais adequados, ou seja, seguros e otimizados, permitindo propostas que até pouco tempo atrás seriam descartadas em virtude da grande quantidade de testes e dos custos envolvidos neste procedimento. As simulações numéricas podem substituir testes de alto grau de periculosidade e eventualmente detectar problemas de segurança, prevenindo graves acidentes. É possível inclusive, executar testes numéricos de situações que não poderiam ser reproduzidas em laboratório, como vôos de aeronaves nos limites da atmosfera da Terra (ANDERSON, 1995) em condições de altíssima temperatura ocasionada pela reentrada (ANGELO e BENÍTEZ, 2006), escoamento interno em válvulas com mistura de hidrocarbonetos e mudança de fase, calculando, além do coeficiente de perda localizada, se, e onde, haverá a cavitação. Como seria possível posicionar instrumentos de medição no centro de uma explosão nuclear (por exemplo)?

Desde que haja capacidade computacional disponível, as simulações podem ser feitas em grande número, contemplando uma grande série de condições de operação e de geometrias distintas. É possível até, deixar os computadores processando os modelos durante o período noturno sem monitoramento humano, fato simplesmente impossível nos casos em que são necessários ensaios em laboratório.

Há, entretanto, uma desvantagem no uso de métodos numéricos, que reside no fato de que os modelos são representações matemáticas da realidade, e podem oferecer melhores ou piores resultados em decorrência de uma construção baseada na experiência e no conhecimento do comportamento físico de determinados escoamentos. Esses modelos matemáticos, formados principalmente pelas equações de conservação, apresentam complexidade matemática elevada, pois são fundamentalmente compostos de um conjunto ou sistema de equações diferenciais parciais. Ao sistema de equações diferenciais parciais, dependendo do tipo de escoamento, pode ser necessário o acréscimo de equações de estado, leis de mistura e equações para turbulência (entre outras). O comportamento matemático de tais sistemas de equações diferenciais pode assumir características matemáticas distintas,

como sistemas hiperbólicos, parabólicos ou elípticos (HIRSCH, 1992 ou também MALISKA, 1995). As técnicas de solução numéricas aplicadas, assim como as condições de contorno impostas aos escoamentos, dependem intrinsecamente da classificação do sistema de equações diferenciais parciais (FERZIGER, 1999).

## 2.2 Etapa (d)

Evidentemente, não há tempo disponível e nem é previsto o desenvolvimento do referencial teórico completo da metodologia de solução numérica, todavia, uma breve explanação sobre os métodos deve ser apresentada. Inicialmente são lembradas as equações de conservação e perda de carga, que foram deduzidas, discutidas e simplificadas para uso nos cursos de Fenômenos de Transporte.

A solução analítica para as válvulas, amplamente apresentada na literatura especializada e utilizada pelos projetistas de tubulações é a adoção de um coeficiente adimensional (COFFIELD; HAMMOND; MCKEOWN, 2001) obtido experimentalmente ( $K$ ) que correlaciona as perdas na válvula ( $H_p$ ) com a quantidade  $V^2/2g$ , onde  $V$  é a velocidade média do escoamento e  $g$  é a aceleração local da gravidade. Assim, a perda de carga na válvula pode ser avaliada através da seguinte expressão:

$$H_p = K \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

As equações de conservação de massa, de conservação de energia e de conservação de quantidade de movimento no formato integral para volume de controle são, respectivamente:

$$-\int_{SC} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA = \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{\forall C} \rho d\forall \right) \quad (2)$$

$$-\int_{SC} e \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA + \dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{\forall C} e \rho d\forall \right) \quad (3)$$

$$-\int_{SC} \vec{V} \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA + \vec{F}_S + \vec{F}_B = \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{\forall C} \vec{V} \rho d\forall \right) \quad (4)$$

As variáveis apresentadas nas equações são:  $\rho$  densidade,  $\vec{V}$  a velocidade,  $\vec{n}$  um vetor unitário (versor) normal à SC (Superfície de Controle),  $A$  a área da SC,  $\forall$  o volume,  $e$  a energia específica,  $\dot{Q}$  o fluxo de calor,  $\dot{W}$  a potência das forças agindo sobre a superfície do volume de controle,  $\vec{F}_S$  as forças de superfície e  $\vec{F}_B$  as forças de campo. A energia específica ( $e$ ), ou energia por unidade de massa, é composta pelas parcelas de energia interna específica, energia cinética específica e energia potencial específica. Outras formas de energia como parcelas relacionadas a efeitos originados de reações nucleares, reações químicas, campos elétricos e magnéticos não são contabilizados por não serem efeitos comuns em escoamentos internos às válvulas. A potência das forças agindo sobre a superfície de controle é constituída

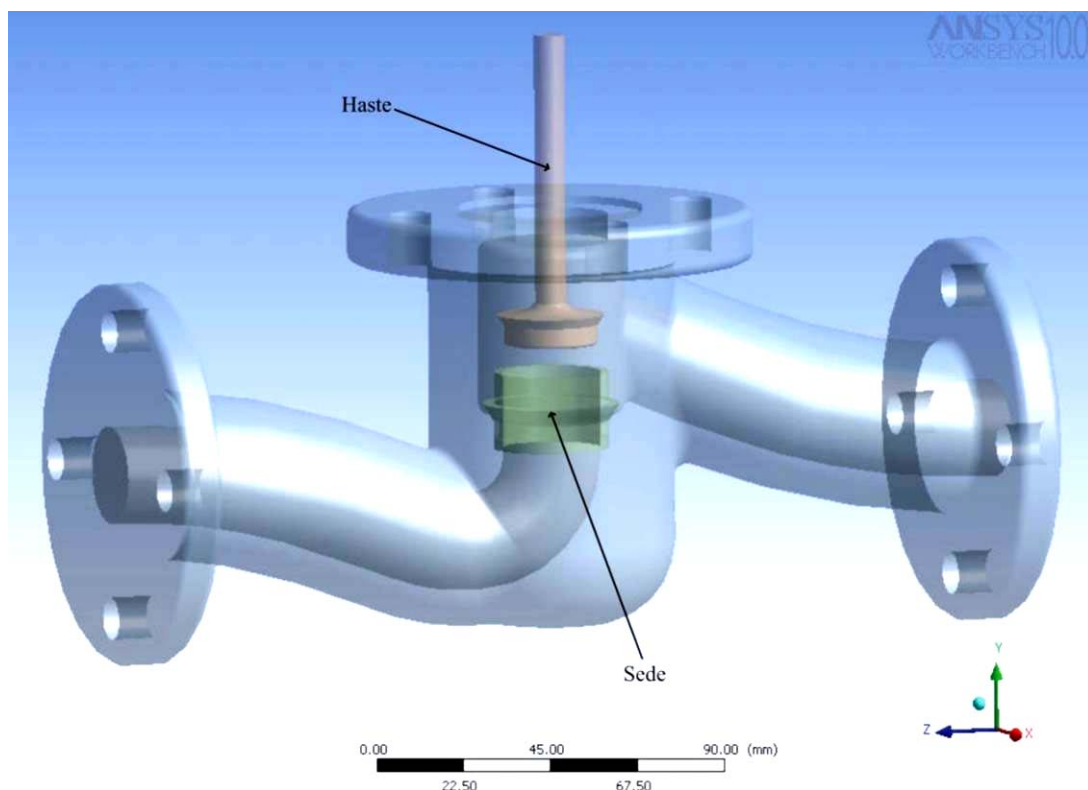
de potência realizada por uma máquina (inexistente no caso do escoamento interior à válvula), a potência das forças de pressão e a potência das forças viscosas.

Para muitos métodos numéricos a apresentação das equações de conservação no formato diferencial é indicada, podendo encontrá-las em muitos livros textos (BIRD e outros, 2004).

Ainda nesta etapa, é apresentado ao estudante o procedimento geral de todo o processo, como forma de fornecer um panorama completo da análise em CFD. As principais fases são: o pré-processamento, o processamento e o pós-processamento. O modo de apresentação é através de uma simulação em conjunto professor-aluno de um problema exemplo. O próximo item descreve o procedimento indicado usando o exemplo de uma válvula globo com diferentes posicionamentos da haste (abertura da válvula).

### 2.3 Etapa (e)

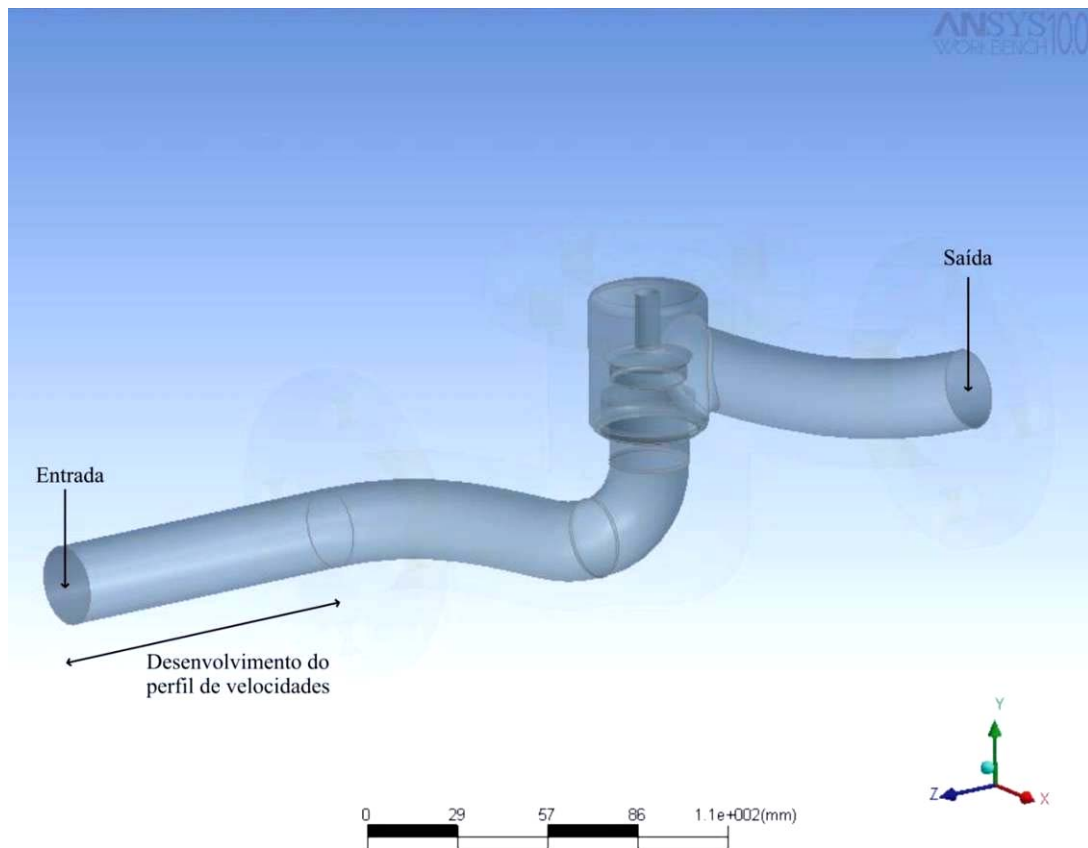
A atividade inicial no pré-processamento consiste em construir a geometria tridimensional através da utilização de um programa de CAD (Computer Aided Design). O ANSYS CFX® conta com um programa de CAD chamado DESIGN MODELER®. A geometria da válvula pode ser vista na Figura 2, evidentemente, algumas peças da válvula foram omitidas por que para o estudo do escoamento interno são desnecessárias, contribuindo de forma praticamente nula no resultado final.



**Figura 2.** Geometria de uma válvula globo semi-aberta.

Ainda na etapa de pré-processamento o domínio computacional deve ser determinado, ou seja, é necessário determinar a região do espaço interna ao corpo da válvula a qual será analisada. A Figura 3 mostra o domínio computacional escolhido para o problema em questão. É útil, nessa etapa, nomear as seções de interesse, como entrada e saída, além de

regiões onde a turbulência será maior e, no caso do estudo de válvulas, onde se encontra a haste e outras obstruções para a passagem do fluido.



**Figura 3.** Domínio computacional para a análise do escoamento interno da válvula.

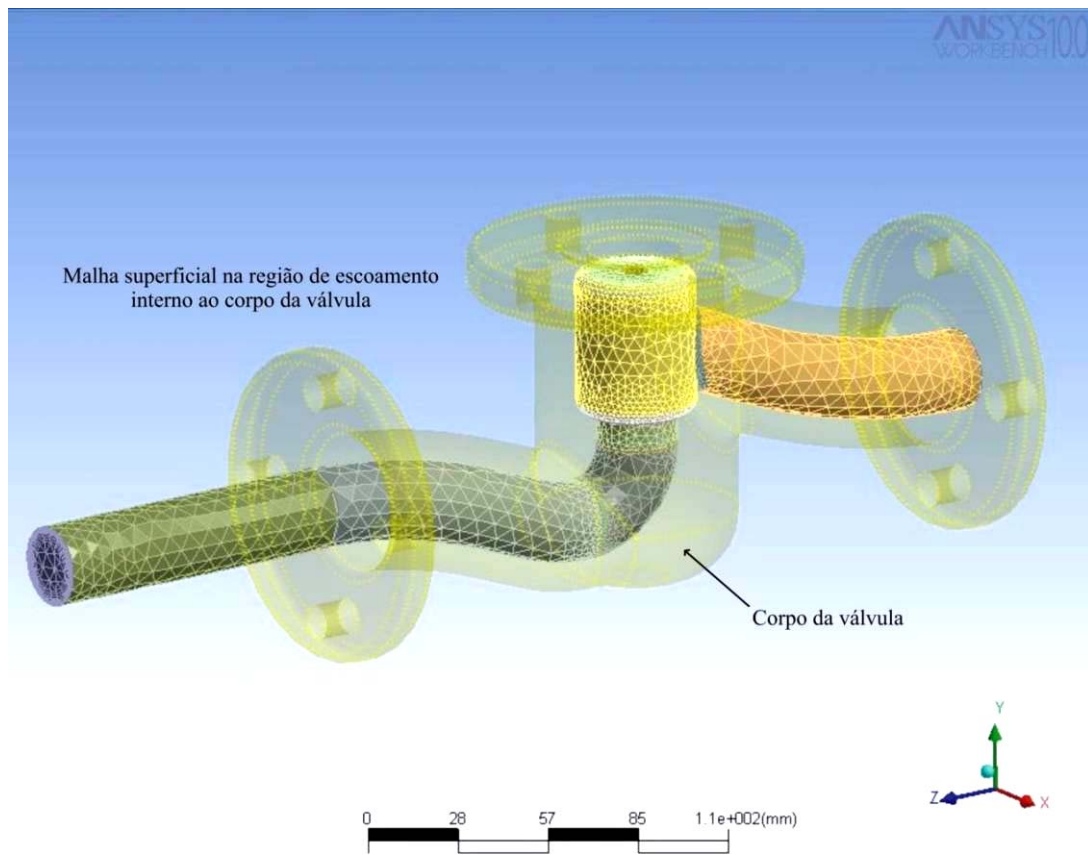
A próxima fase dentro do pré-processamento é a discretização do domínio computacional ou geração da malha. Os elementos usados foram, em sua maioria, tetraédricos, sendo que cerca de 6000 elementos dos 130300, aproximadamente, (dependendo da abertura da haste) foram hexaédricos. A saber, quanto maior a quantidade de elementos hexaédricos na malha, maior será a precisão da solução calculada (THOMPSON, J. F. *et al*, 1999).

Inicialmente, para cada face do domínio computacional são geradas as malhas superficiais, e controles de tamanho devem assegurar maior concentração de elementos nas regiões de maior gradiente de propriedades, neste caso nas regiões próximas à superfície interna do corpo da válvula, devido aos efeitos decorrentes da rugosidade do material, no caso o ferro fundido com rugosidade média igual a 0,26 mm na região em que se localiza a sede, devido ao descolamento da camada limite do fluido e na entrada e saída da válvula.

A figura 4 mostra a malha superficial gerada e os detalhes de concentração de elementos nas regiões anteriormente mencionadas. Terminada a geração da malha para todas as superfícies a malha tridimensional deve também ser gerada.

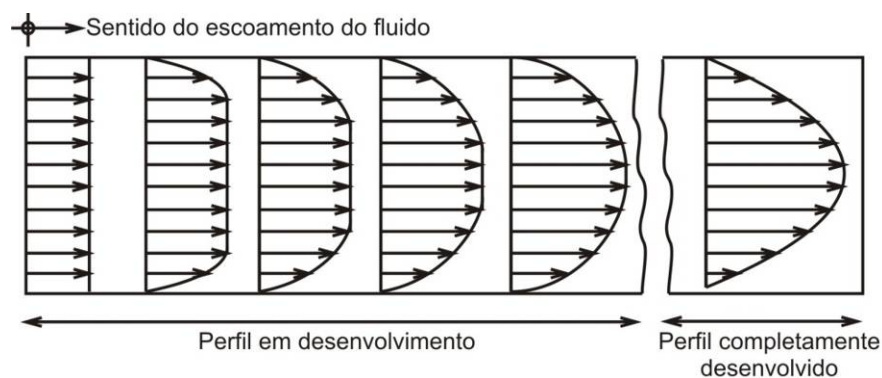
Em seguida, devem ser inseridas as condições de contorno, na análise proposta, o fluido é a água a 20°C, que entra na válvula através da seção denominada entrada (ver figura 3) e deixa o volume computacional pela seção denominada saída. As condições de contorno impostas são: velocidade do escoamento na seção de entrada igual a 1 m/s, pressão na saída da válvula na escala efetiva igual a 0 Pa e velocidade do fluido na superfície interna da válvula igual a 0 m/s (Princípio da Aderência). As propriedades do fluido são consideradas

uniformes, calculadas na temperatura citada. O modelo é o de um fluido incompressível (número de Mach é muito inferior a 0,3), regime permanente e turbulência K-Epsilon.



**Figura 4.** Malha gerada, mostrando detalhe da concentração de elementos ao redor das regiões de maior turbulência.

O diâmetro nominal da válvula é de uma polegada. Para que haja coerência nos resultados é necessário que se coloque uma região para o desenvolvimento do perfil de velocidades, a fim de que ao entrar, de fato, na válvula, o mesmo esteja completamente desenvolvido. A figura 5 exemplifica o descrito.



**Figura 5.** Desenvolvimento do perfil de velocidades.

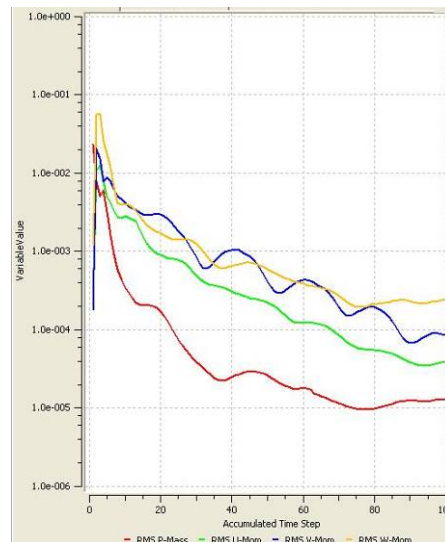
Na etapa de processamento o módulo do ANSYS CFX® permite a visualização de diversos parâmetros, entre os quais os resíduos das variáveis durante o transcorrer das



iterações. Na Figura 6 são mostrados os resíduos obtidos durante as iterações da simulação computacional.

Esta é uma fase importante para explicar ao aluno sobre o método iterativo de solução e os critérios de convergência e sobre os erros numéricos da solução matemática. O critério de parada para simulação do presente estudo foi resíduo máximo de 0,0001 ou 100 iterações. Os valores máximos para cada iteração são obtidos entre as maiores variações para todos os pontos da malha. O eixo coordenado do gráfico, correspondente ao resíduo máximo, está na escala logarítmica. O maior resíduo final nesta situação foi verificado para velocidade na direção z.

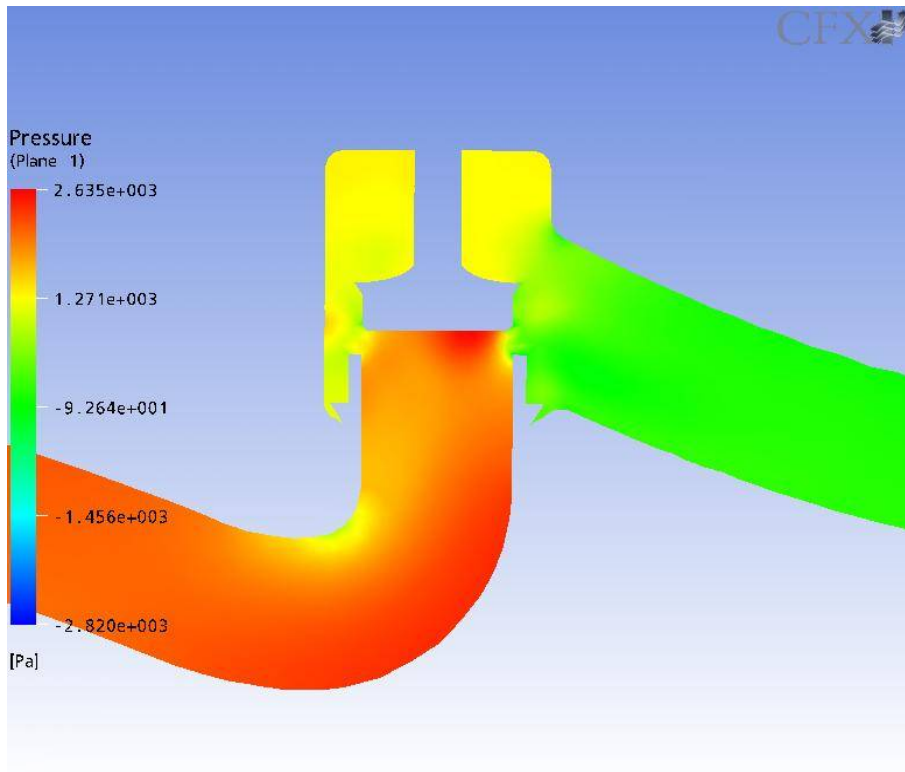
É sempre recomendado um estudo sobre a adequada distribuição e concentração de elementos na malha. Regiões de elevado gradiente devem ter densidade de malha relativamente grande para capturar as mudanças das grandezas e propriedades. Geralmente, são feitos vários modelos com malhas mais refinadas nas regiões de elevado gradiente de propriedades e comparados os resultados de diversas simulações até que o modelo matemático atinja o refinamento de malha adequado e os resultados tenham convergido para o valor correto.



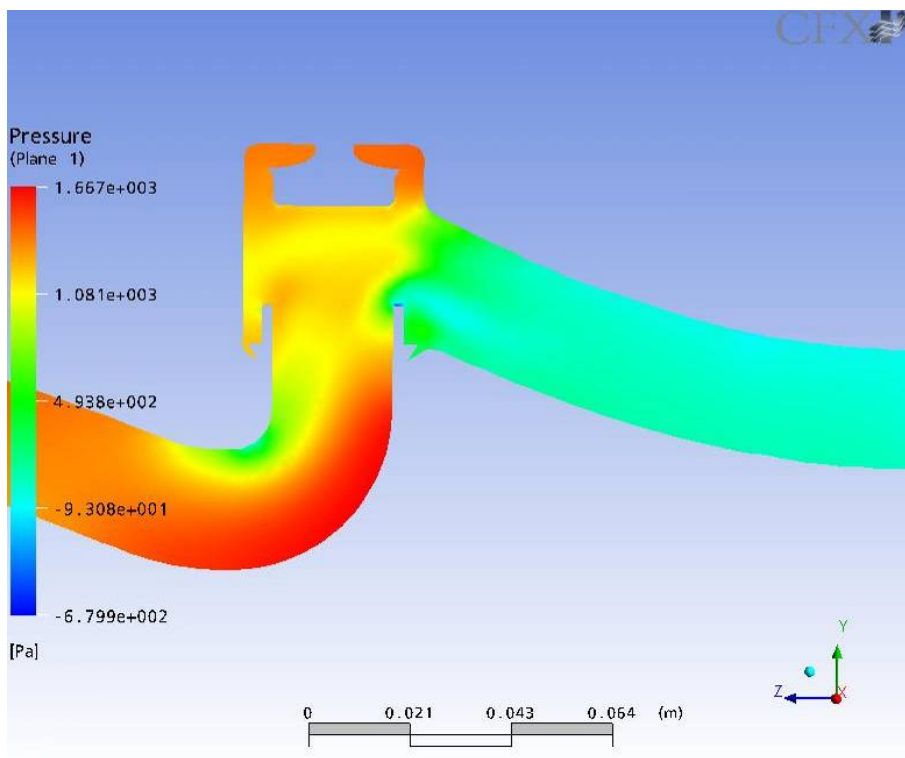
**Figura 6.** Interface do módulo de processamento. Figura indica os resíduos máximos em cada iteração para as variáveis: pressão, velocidade na direção x – RMS U-Mom, velocidade na direção y – RMS V-Mom e velocidade na direção z – RMS W-Mom. Na figura apenas os resíduos das primeiras 100 iterações são indicados. O restante da solução foi suprimido.

O pós-processamento deve ser analisado cuidadosamente e os resultados avaliados para verificação de inconsistências físicas que invalidariam a solução numérica. A coerência no comportamento físico tem, obrigatoriamente, de ser constatada (por isso são utilizadas as equações na forma simplificada, verificando a ordem de grandeza de ambas as respostas). Há também necessidade de observar se as condições de contorno se mantiveram, por exemplo, se as velocidades nas superfícies dos corpos estão de acordo com o princípio do não escorregamento. Nos casos de regime permanente, em que há saídas e entradas de fluido no domínio computacional, uma das verificações importantes é o cálculo das vazões em massa das entradas que devem ser rigorosamente iguais às de saídas, salvo, é claro, pequenos erros numéricos.

As figuras 7 e 8 mostram mapas de cores para pressão a diferentes posições de haste.



**Figura 7.** Mapa de cores para pressão quando a válvula está parcialmente aberta. Escala de cores proporcional à pressão, em Pa, na escala efetiva.



**Figura 8.** Mapa de cores para pressão quando a válvula está completamente aberta. Escala de cores proporcional à pressão, em Pa, na escala efetiva.

É possível criar funções matemáticas na etapa de pós-processamento, a fim de se calcular a pressão média na entrada e na saída do domínio computacional. Apesar de utilizar pressão nula na saída da válvula como condição de contorno, erros residuais, presença de vórtices e ocorrência de outros fenômenos na seção de saída podem elevar a pressão, no caso dos estudos realizados a cerca de 4 a 6 Pa, tornando necessária sua contabilização para o cálculo do coeficiente de perda de carga  $K$ . Desenvolvendo a equação da conservação da energia (ver equação 3), adotando fluxo de calor entre a válvula e o meio, potência de forças agindo sobre a superfície do volume de controle, no caso, do domínio computacional, regime permanente e que haja apenas uma entrada e uma saída, chega-se à equação de Bernoulli para conservação da energia. Temos então, para uma válvula que introduz uma perda de carga localizada no sistema, a seguinte relação:

$$\left( Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} \right) = \left( Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \right) + \left( \frac{KV_m^2}{2g} \right) \quad (5)$$

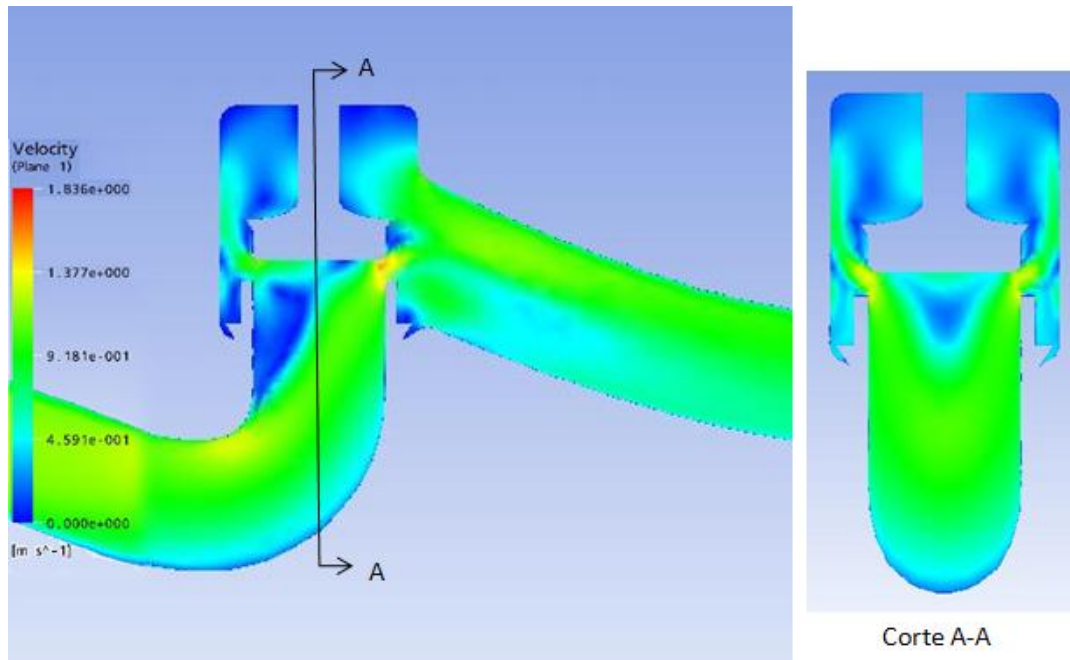
Onde  $Z$  é uma cota adotada segundo um plano horizontal de referência,  $P$  é a pressão, dada na escala efetiva (a fim de facilitar os cálculos),  $\gamma$  é o peso específico do fluido,  $V$  a velocidade do fluido,  $V_m$  a velocidade média do fluido no interior da válvula e  $g$  a aceleração da gravidade no local. Os índices subscritos 1 e 2 referem-se, respectivamente às seções de entrada e saída da válvula. Dessa forma, como a entrada e saída possuem mesma cota  $Z$ , e a vazão em volume é, obviamente, a mesma, desenvolvendo a equação chegamos à seguinte relação:

$$K = \left( 2 \frac{\Delta P}{\rho V_m^2} \right) \quad (6)$$

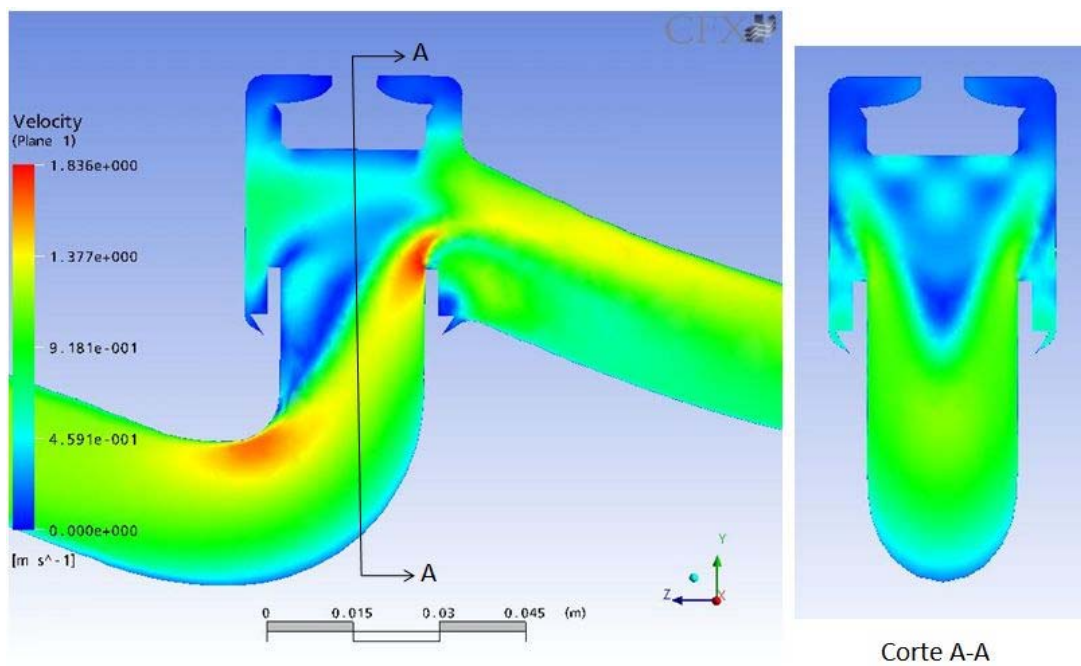
Portanto, calcula-se o adimensional  $K$  em função da variação da pressão, da densidade e velocidade média do fluido no interior da válvula. Dessa forma é possível então o cálculo da perda de carga localizada imposta pela singularidade para qualquer altura de haste (abertura da válvula) desejada. É possível a utilização de recursos do programa de pós-processamento e obter mapas de cores indicando os campos de velocidade e pressão.

As figuras 9 e 10 mostram a diferença do perfil de velocidades quando a válvula está parcialmente aberta e quando está completamente aberta. A camada limite no segundo caso se descola antes, além de, para a mesma velocidade de entrada no domínio computacional, ter velocidade na sede maior do que no primeiro.

Os cortes A-A mostram o perfil de velocidades no plano XY e indicam regiões de estagnação do fluido. No primeiro caso pode-se perceber a formação de dois vórtices na parte superior da haste, que serão mostrados mais adiante.

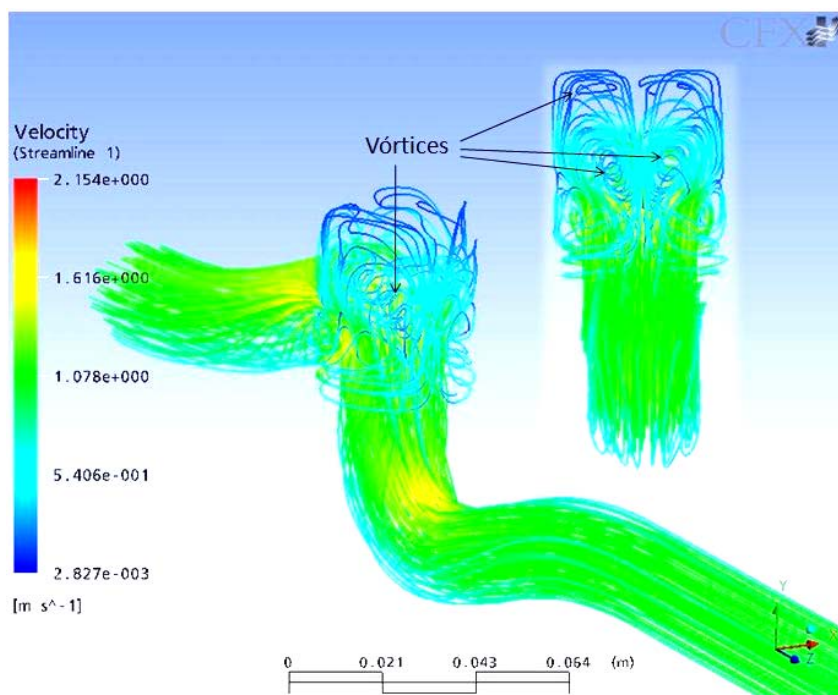


**Figura 9.** Mapa de cores para velocidade em dois planos de interesse. Abertura parcial da válvula. A escala de cores é proporcional à velocidade em m/s.

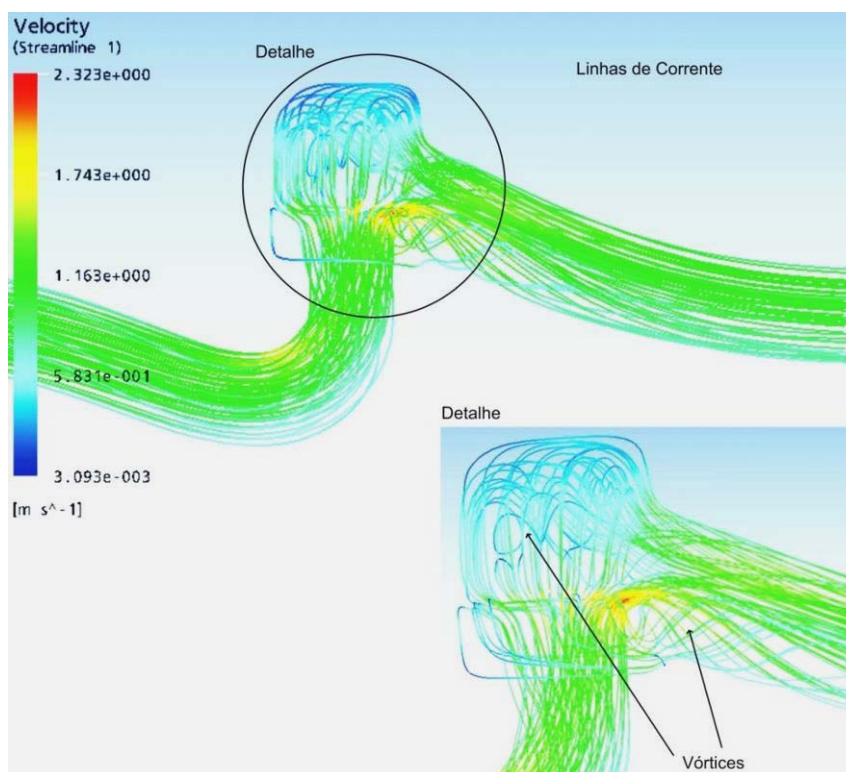


**Figura 10.** Mapa de cores para velocidade em dois planos de interesse. Abertura completa da válvula. A escala de cores é proporcional à velocidade em m/s.

Ainda no pós-processamento, é possível obter as linhas de corrente, tornando, no caso do ensino, ainda mais didática a identificação do vórtice e o motivo da perda de energia localizada. As figuras 11 e 12 mostram vórtices com a válvula parcial e completamente aberta.



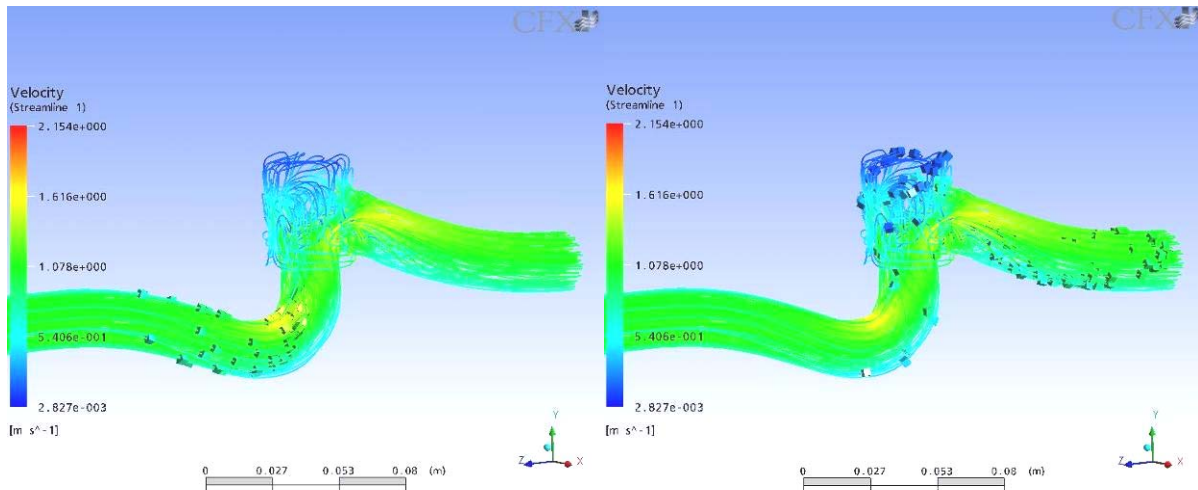
**Figura 11.** Linhas de corrente permitem a fácil visualização de vórtices. Abertura parcial da válvula. As cores são proporcionais à velocidade, em m/s.



**Figura 12.** Linhas de corrente permitem a fácil visualização de vórtices. Abertura completa da válvula. As cores são proporcionais à velocidade, em m/s.

É possível ainda a criação de animações, com elementos cúbicos, esferoidais, dentre outros, que percorram as linhas de corrente. A figura 13 mostra duas ilustrações sequenciais de um vídeo criado no pós-processamento da válvula.





**Figura 13.** Dois instantes de uma animação na qual elementos percorrem as linhas de corrente.

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na maioria dos cursos de graduação os estudantes não dispõem da importante ferramenta de análise de projeto que é a Dinâmica dos Fluidos Computacional. As disciplinas básicas como: Mecânica dos Fluidos, Transferência de Calor e Massa ou Fenômenos de Transporte podem ser complementadas pela aplicação de CFD em problemas práticos da engenharia através de estudos voluntários realizados por alunos em projetos de iniciação científica, trabalhos de conclusão de curso, entre outros.

Com base no estudo apresentado é possível a verificação de que o escoamento interno ao corpo da válvula tem características turbulentas. Percebe-se uma região de estagnação próxima à sede, o que indica a formação de vórtices, que se propagam devido a sua trajetória sinuosa. Sendo assim, quanto mais suave essa trajetória, menor será a intensidade dos vórtices. Percebe-se claramente, portanto, que a abertura da válvula influencia no coeficiente de perda de carga localizada, ou seja, quanto mais fechada a válvula estiver, maior será o adimensional  $K$ .

Dessa forma, exemplifica-se um dos fenômenos mais complexos que existem no escoamento de um fluido de uma forma didática e relativamente simples de se compreender. Pode-se então afirmar que para outros tópicos da disciplina em questão este ferramental seria de igual ou maior proficiência na compreensão de determinado fenômeno.

As conclusões feitas anteriormente correspondem à união dos conceitos teóricos ministrados em aula, com a complementação didática, através de softwares comerciais de CFD, como o ANSYS CFX®. Valendo-se desses softwares e visando incentivar o aprendizado é muito útil uma abordagem mais prática da apresentação dos ferramentais numéricos, sempre destacando a importância do conhecimento dos modelos matemáticos que estão embutidos nas opções apresentadas por tais códigos, mas deixando todo o estudo teórico destes modelos para complementações em cursos de pós-graduação.

Tais ferramentais possibilitam a visualização de um fenômeno complexo e tridimensional de forma simples e interativa, o que é fundamental para que o acadêmico tenha uma formação completa, que não dependa apenas da capacidade de abstração do aluno, em certos tópicos dos cursos de Fenômenos de Transporte. Isto permite uma visão geral, exemplificando

aplicações, e cria alternativas de projeto às limitadas técnicas analíticas apresentadas na graduação.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a Universidade Presbiteriana Mackenzie pelo apoio financeiro pessoal e também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pela montagem (softwares e hardware) do laboratório do Grupo de Simulação Numérica. O primeiro autor e o último autor agradecem especialmente o apoio financeiro pessoal concedido pelo Fundo Mackenzie de Pesquisa (Mackpesquisa).

### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANDERSON, J. D. **Computational Fluid Dynamics: the basics with applications.** McGraw-Hill, 1995.

ANGELO, E.; BARRIOS, D.B. **Utilização da dinâmica dos fluidos computacional na complementação do ensino da disciplina de Fenômenos de Transporte.** In: COBENGE, 2006.

BIRD, R.B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte.** 2<sup>nd</sup> Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

FERZIGER, J. H. **Computational Methods for Fluid Dynamics.** New York: Springer, 1999.

HIRSCH, C. **Numerical Computational of Internal and External Flows.** Vol.1 e Vol. 2. John Wiley, 1992.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional.** LTC, 1995.

THOMSON, J. F. *et al.* **Handbook of grid generation.** CRC Press, 1999

TIETJENS, O. K.G; PRANDTL, L. **Applied hydro-and aeromechanics; based on lectures of l. prandtl.** New Dover, 1957.

### **USE OF THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN THE COMPRENSION OF THE LOCATED ENERGY LOSS COEFFICIENT**

**Abstract:** *This paper presents an approach to complementation of the studies about the located energy loss coefficient, in the Transport Phenomena graduate discipline. Through an example, it's described a method adopted in the Mackenzie School of Engineering by Numerical Simulation Group in the initiation of graduation students in the numerical solver techniques involving located energy loss. Pedagogic aid for the comprehension of the transport phenomena (fluid mechanic, heat transfer and mass flow) is done through a commercial program of Computational Fluid Dynamics, the ANSYS CFX ®.*

**Key-words:** *Computational Fluid Dynamics, numerical simulation, energy loss coefficient, hydrodynamic.*