



Metodologia de ensino de dinâmica dos fluidos computacional aplicada ao curso de engenharia ambiental

Enilene Regina Lovatte – elovatte@gmail.com

Universidade do Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico – Núcleo de Estudos da Qualidade do Ar (NQUALIAR)

Av. Fernando Ferrari, 514, Campus Universitário – Goiabeiras.

29075-910 – Vitória – ES.

Instituto Federal de Educação Tecnológica – IFES

Avenida Vitória, 1729 – Jucutuquara

29040-780 – Vitória – ES.

Edilson Luiz Nascimento - edilsonluiz@gmail.com

Universidade do Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico – Núcleo de Estudos da Qualidade do Ar (NQUALIAR)

Av. Fernando Ferrari, 514, Campus Universitário – Goiabeiras.

29075-910 – Vitória – ES.

Instituto Federal de Educação Tecnológica – IFES

Rodovia ES-010 - Km 6,5 – Manguinhos

29173-087 – Serra – ES.

Carlos Alberto Dutra Fraga Filho - cadff1@gmail.com

Universidade do Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico - Laboratório de Simulação de Escoamentos com Superfície Livre (LABESUL)

Av. Fernando Ferrari, 514, Campus Universitário – Goiabeiras.

29075-910 – Vitória – ES.

Instituto Federal de Educação Tecnológica – IFES

Avenida Vitória, 1729 – Jucutuquara.

29040 780 – Vitória – ES.

Neyval Costa Reis Júnior - neyval@gmail.com

Universidade do Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico – Núcleo de Estudos da Qualidade do Ar (NQUALIAR)

Av. Fernando Ferrari, 514, Campus Universitário – Goiabeiras.

29075-910 – Vitória – ES.

Jane Meri Santos – jmerisantos@yahoo.com.br

Universidade do Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico – Núcleo de Estudos da Qualidade do Ar (NQUALIAR)

Av. Fernando Ferrari, 514, Campus Universitário – Goiabeiras.

29075-910 – Vitória – ES.

Realização:



Organização:





Resumo:

Este artigo apresenta uma proposta metodológica para o ensino da mecânica dos fluidos e fenômenos de transporte no curso de engenharia ambiental com a implementação de uma rotina em um código computacional aberto. O principal enfoque é a interação usuário-professor no entendimento e refinamento dos resultados encontrados nas simulações, visando a obtenção de resultados consistentes para o problema físico estudado. São descritas detalhadamente as etapas constantes da metodologia e são apresentados gráficos resultantes do pós-processamento dos dados obtidos com o uso do código.

Palavras-chave: *Dinâmica dos Fluidos Computacional, CFD, Engenharia Ambiental, Simulação Numérica.*

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico torna o mercado de trabalho exigente quanto à qualificação dos profissionais de engenharia. A relação entre o modelo de ensino que está posto e este cenário precisa ser constantemente avaliada.

Os cursos de engenharia tentam moldar-se às necessidades de mercado, formando profissionais com capacidade para desempenhar atividades em diferentes setores da indústria. Neste contexto, o professor não é apenas aquele que transmite o conhecimento, mas é aquele capaz de se relacionar com o aluno, despertar seu interesse e motivá-lo a aprender na velocidade e qualidade exigidas pelo mercado.

Nos cursos de engenharia, ainda é frequente a presença de engenheiros que se tornam professores e ensinam o que sabem fazer e professores que transmitem e ensinam a teoria, muitas vezes sem as conexões com a prática. Se por um lado, esta falta de conexão da teoria com a prática dificulta o processo de ensino aprendizagem e desmotiva o aluno, o ensino baseado nas experiências práticas do engenheiro professor também pode comprometer a formação do futuro profissional.

Em áreas relativamente novas, como engenharia ambiental, a experiência de campo do professor é pouco frequente e este precisa desenvolver ferramentas que estimulem e facilitem o processo ensino-aprendizagem. O profissional de engenharia ambiental atua em todos os níveis da gestão ambiental e deve ser capaz de compatibilizar as intervenções às quais o meio ambiente está sujeito com a sua conservação, a partir do conhecimento de métodos e técnicas adquiridos ao longo de sua vida acadêmica.

Trabalhos nesta área podem envolver: *i)* amostragens e medições no ambiente ou diretamente na fonte emissora, *ii)* métodos analíticos e experimentos em túneis de vento ou no campo para estimativas de emissões e da dispersão do poluente na atmosfera e *iii)* simulações numéricas (área denominada Dinâmica dos Fluidos Computacional ou CFD).

CFD é uma importante ferramenta na análise de problemas ambientais porque permite avaliar a quantidade de poluentes presentes nos fluidos de interesse (água e ar) e investigar o escoamento. A dinâmica dos fluidos computacional é apresentada aos alunos juntamente com o conteúdo da disciplina de mecânica dos fluidos e fenômenos de transporte. O conteúdo da disciplina ministrado em sala de aula é complementado com trabalhos computacionais (ANGELO, 2006). Além disso, podem ser desenvolvidos estudos de iniciação científica, que consistem em um nível mais avançado, de aprofundamento do conteúdo básico da disciplina. O emprego da simulação numérica e de recursos computacionais torna possível a solução de



conjuntos de equações de difícil resolução analítica e permite a interpretação dos resultados obtidos, além da melhoria no processo de aprendizagem (LOPES, 2007).

As simulações numéricas realizadas utilizando CFD praticamente não possuem restrições, podendo resolver problemas complexos com condições de contorno gerais, definidos em geometrias também complexas e apresentando resultados com rapidez. Códigos comerciais ou abertos podem ser empregados para a solução de problemas de mecânica dos fluidos e fenômenos de transporte.

Códigos comerciais apresentam alto custo de aquisição e manutenção, são cada vez mais versáteis e abrangentes, com várias opções de modelos matemáticos, geradores de malhas e pós-processadores de resultados, o que pode impossibilitar o uso em computadores de pequeno porte. Uma desvantagem destes programas em aplicações didáticas e científicas está na dificuldade de acesso ao programa fonte, o que inviabiliza a implementação de novos modelos.

Códigos abertos constituem uma opção interessante para os laboratórios de mecânica dos fluidos computacional porque o aluno orientado pelo professor consegue desenvolver simples rotinas que introduzem as condições iniciais e de contorno de cada problema ambiental particularmente estudado. Os módulos restantes desses códigos contêm *solvers* das equações de conservação e de transporte de poluentes, que são empregados de forma genérica nos problemas a serem resolvidos.

Dentro deste contexto, a proposta deste trabalho é apresentar uma complementação metodológica usada no ensino de CFD usando um código computacional desenvolvido no grupo de pesquisa de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo.

2. ESTUDO DE CASO: O USO DO CFT PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE ESCOAMENTOS 2D

Várias rotinas computacionais são desenvolvidas baseadas dentro do campo maior de CFD. A elaboração de um programa voltado para a investigação de escoamentos exige decisões e cuidados em todas as fases de sua elaboração. Após decidir sobre o método numérico a ser empregado, vários detalhes devem ser analisados e entre eles é importante que o programa requeira o mínimo possível de recursos computacionais, permitindo que problemas mais complexos sejam resolvidos.

Em 1996, empregando a linguagem Fortran 77, foi apresentada a primeira versão do CFT (Computação de Fenômenos de Transporte), programa que visa resolver problemas bidimensionais de transferência de calor e massa. Posteriormente, o código foi paralelizado e, mais recentemente, adaptado para escoamentos em regime transiente, através da resolução das equações de conservação usando metodologia LES (*Large Eddy Simulation*) para os casos de escoamentos turbulentos e modelo de sub-malha Smagorinsky (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

Neste trabalho, é apresentada a metodologia empregada no ensino aprendizagem do CFD em um escoamento bidimensional laminar permanente usando o código CFT-2D.

2.1. Equações de governo

O escoamento de um fluido e o processo de dispersão de poluentes na atmosfera é governado pelas equações de conservação da massa, de *momentum* e de massa da espécie química, conforme Equações (1) a (3). Trata-se de um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares acopladas para u , v , w e p .



Soluções para estas equações têm sido obtidas, mas somente para geometrias e condições iniciais ou de contorno mais simples, para as quais muitos dos termos podem ser simplificados.

Neste trabalho, são apresentados somente os perfis de velocidade obtidos pela solução das equações (1) e (2), com pós-processamento dos resultados, ou seja, não é resolvida a Equação (3), apesar de o código permitir a resolução desta para problemas que envolvam dispersão de poluentes.

Conservação da Massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Conservação da Quantidade de Momentum

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

onde

$$\tau_{ij} = 2\mu_{lam} S_{ij} - \left(p + \frac{2}{3} \mu_{lam} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (2a)$$

e

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2b)$$

Conservação da Espécie Química

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho D_m \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + M \quad (3)$$

onde x_i [m] são as coordenadas cartesianas, t é o tempo [s], u_i é a componente da velocidade na direção i [m/s], p é a pressão [m/s²], e ω é a concentração de contaminante [kg/kg]. ρ , μ_{lam} , são, respectivamente, a massa específica [kg/m³] e a viscosidade molecular do fluido [kg/m.s]. D_m , é a difusividade molecular do contaminante no fluido [m²/s], g_i é o vetor aceleração gravitacional [m/s²], τ_{ij} é o tensor das tensões (pressão e tensões viscosas)



[kg/ms²], δ_{ij} é operador delta de Kronecker (1 se $i = j$ e 0 se $i \neq j$), S_{ij} é o tensor deformação [s⁻¹] e M é o termo de fonte de massa da espécie química [kg/s.m³].

2.2. O aprendizado do código computacional

Após serem apresentadas as equações de conservação e alguns simples casos de problemas resolvidos em sala de aula, um código computacional é geralmente disponibilizado ao aluno. Em nosso trabalho, a versão bidimensional do código CFT-2D deverá ser instalada em ambiente Windows.

O CFT-2D apresenta dois módulos: o módulo *Usuário* (*User.f*) e o *Principal* (*Setup1.f* e *Setup2.f*). No módulo *Usuário* realizam-se as seguintes ações: geração da malha computacional e controle dos parâmetros de simulação e monitoramento das propriedades físicas do escoamento, como massa específica, velocidade, pressão e concentração. No segundo módulo, está a rotina *Setup2*, que contém o *Solver*, cujo objetivo é solucionar o sistema de equações diferenciais.

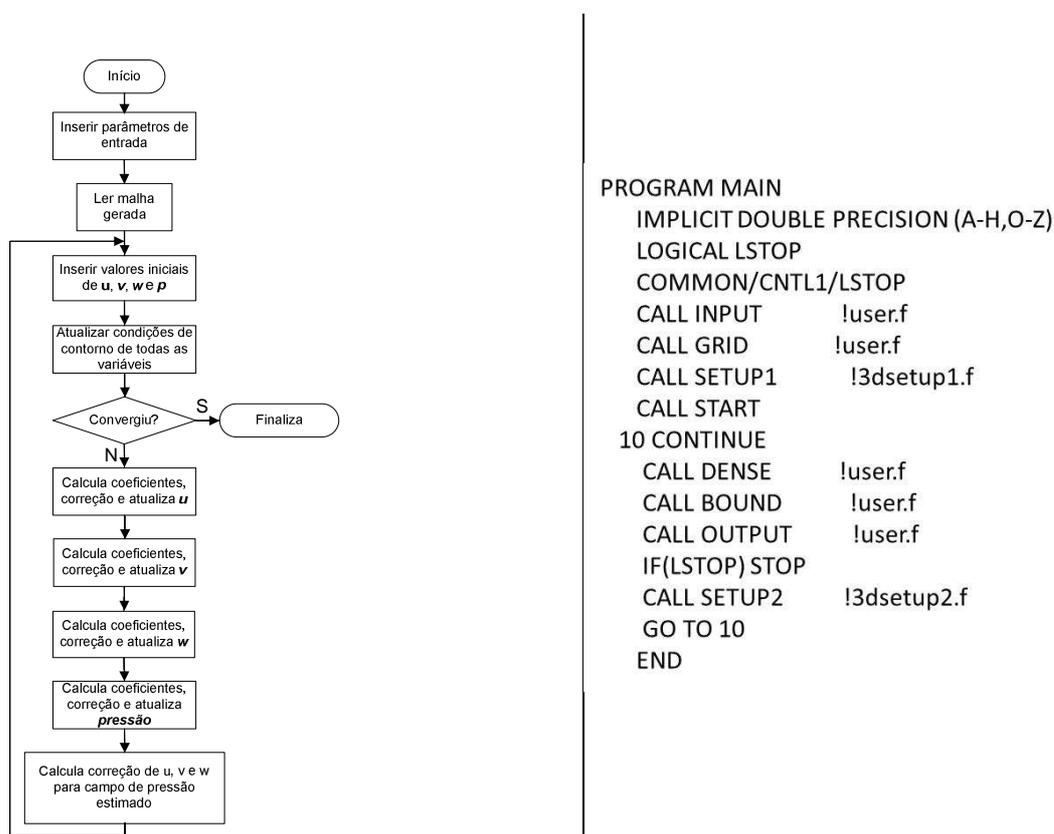


Figura 1 – a) Representação do fluxograma em alto nível da solução computacional para as equações de Navier-Stokes; b) Rotinas do código CFD implementado.

A metodologia é iniciada após a instalação do programa, com o estudo de 7 (sete) exemplos já implementados e de solução conhecida, para que seja entendido como mexer e o que mexer no código e como as rotinas estão relacionadas. O aluno não terá dificuldade com a parte de programação, uma vez que esse conteúdo faz parte do currículo recomendado para



o estudo de Engenharia, e ele deve apenas lembrar ou estudar os comandos mais frequentes do Fortran, o que possibilitará seu sucesso nas etapas seguintes, quando ele próprio terá que escrever sua rotina (entrada das condições iniciais e de contorno) no módulo *Usuário* do CFT-2D.

2.3. Pré-processamento

Antes que os cálculos sejam iniciados, alguns dados devem ser introduzidos, empregando o Sistema Internacional de unidades (SI). Destacam-se as condições iniciais e de contorno e as características geométricas da malha que servirão de base para a solução das equações de conservação.

Resolver as equações de conservação significa calcular as propriedades do fluido em cada ponto do domínio discretizado. Conforme já comentado, estas propriedades podem ser velocidade, temperatura, pressão, concentração e outras. O método utilizado é o de volumes finitos (MVF). O MVF é um método numérico de resolução das derivadas que são substituídas por expressões algébricas na forma discretizada (PATANKAR, 1980). Quando se diz que o domínio é discretizado, refere-se à divisão do domínio em uma quantidade de volumes que permitirá a solução algébrica das equações que envolvem derivadas de 1ª e 2ª ordens, que normalmente têm soluções complexas, envolvendo métodos de integração.

A quantidade de pontos deste domínio varia de acordo com a quantidade de volumes de controle e evidentemente será mais próxima da solução exata quanto maior a quantidade de volumes utilizados. Nesta etapa, deve ser definido o método de interpolação: *upwind*, *power-law* ou híbrido. Além disto, são definidos os métodos de solução numérica (*TDMA*, *SOR*, etc.) e coeficiente de relaxação das propriedades a serem calculadas.

2.4. Desenvolvimento do módulo *Usuário*

Após a familiarização do aluno com o programa CFT-2D, o que ocorre com o estudo inicial dos exemplos implementados, o professor orienta o aluno a desenvolver o módulo *Usuário* do seu código em etapas e sempre baseado em um exemplo mais simples que já funciona, e que foi passado para ele. Isto facilita a programação e a visualização de falhas nesta fase para aqueles que são iniciantes e pouco conhecedores da linguagem e da lógica de programação.

BIRD (2002) apresenta soluções analíticas para alguns problemas clássicos de mecânica dos fluidos que podem ser utilizados na validação da rotina implementada pelo aluno.

No exemplo ilustrado nas Figuras 2 e 3, o módulo *Usuário* foi desenvolvido para o escoamento atmosférico entre placas horizontais fixas e paralelas em várias situações: *i*) escoamento atmosférico com entrada e saída verticais livres (totalmente abertas); *ii*) com uma entrada vertical reduzida em relação à situação anterior e saída livre; *iii*) com entrada vertical e saída vertical central e *iv*) duas entradas centralizadas (horizontal e vertical) e uma abertura centralizada vertical na saída.

Na sequência do processo de aprendizagem, o aluno é orientado a desenvolver seu módulo de *Usuário*. Inicialmente, a metodologia proposta neste trabalho prevê a geração dos perfis de velocidade do escoamento.



2.5. Pós-processamento

Na etapa de pós-processamento os resultados numéricos são plotados e visualizados. O aluno é orientado a usar um programa de plotagem (tal como o *Surfer* ou *Matlab*). São verificadas nesta fase que as inconsistências físicas podem tornar a solução numérica inválida. Assim, é importante que sejam constatadas coerências do fenômeno físico com a solução numérica.

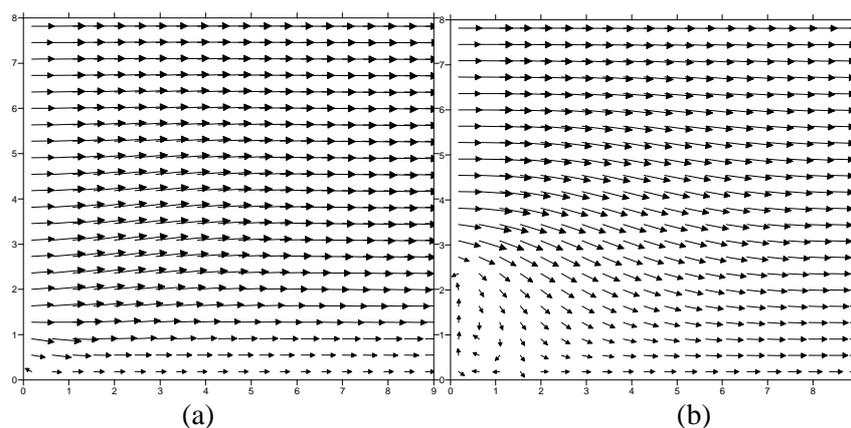


Figura 2 – Perfis de velocidade obtidos pelo CFT. (a) entrada e saída livres (totalmente abertas) e (b) entrada vertical reduzida em relação à situação anterior e saída livre.

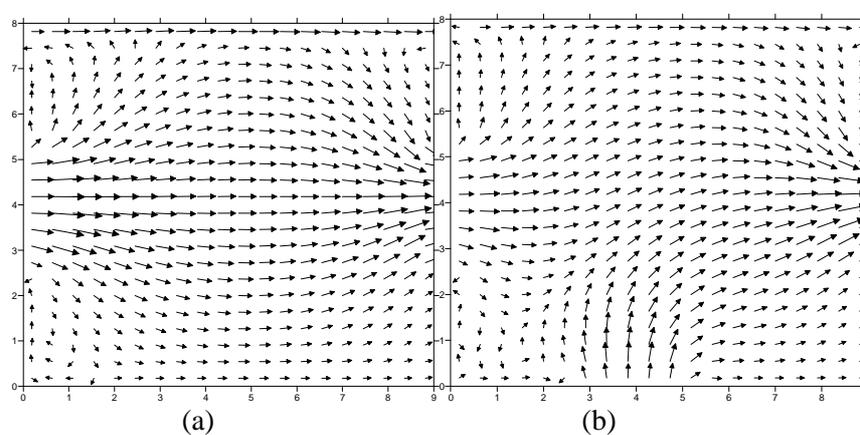


Figura 3 – Perfis de velocidade obtidos pelo CFT – (a) entrada vertical central e saída vertical central e (b) com duas entradas centralizadas (horizontal e vertical) e uma abertura centralizada vertical na saída.

Nesta etapa, também é possível avaliar a malha usada. O refinamento da malha permite a visualização de detalhes do escoamento que passam despercebidos com malhas mais grosseiras. Aqui o aluno é motivado a analisar o escoamento e avaliar todas as condições que tornam a dispersão do poluente possível de acontecer. Também é analisada a malha a partir da qual não são mais percebidas mudanças significativas na solução aproximada do problema. Isto tem grande importância porque a solução com malhas mais refinadas demanda mais recursos computacionais que nem sempre estão disponíveis.



Obtidos os perfis de velocidade (Figuras 2 e 3), consistentes com o problema físico estudado, o aluno utilizará a sua rotina de *Usuário* como base para a resolução dos próximos desafios a serem lançados pelo professor, como por exemplo, os problemas de escoamento com obstáculos e bifásico, cujos perfis de velocidades obtidos pelo CFT-2D, consistentes com os problemas físicos, são apresentados nas Figuras 4 e 5.

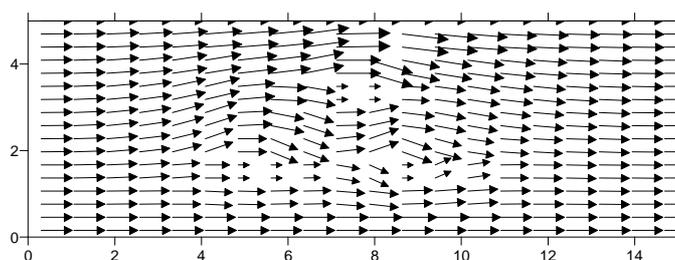


Figura 4 – Perfis de velocidade obtidos pelo CFT – três obstáculos (localizados nas regiões de bloqueio e redução brusca de velocidade).

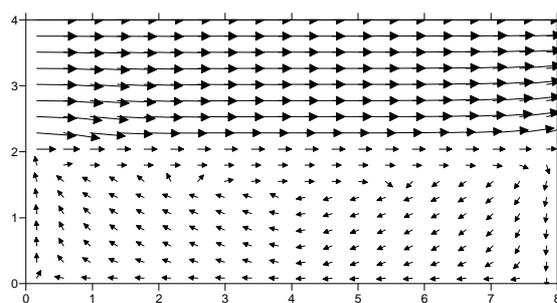


Figura 5 – Perfis de velocidade obtidos pelo CFT. Escoamento bifásico.

Obtidos os perfis de velocidade consistentes com os fenômenos estudados e tendo o aluno entendimento satisfatório do significado físico das equações de conservação, o processo é considerado parcialmente concluído. A partir deste ponto, o aluno é teoricamente capaz de estender seu trabalho visando à obtenção de novos resultados em problemas com condições de contorno e iniciais mais complexas, com uma distância maior em relação à orientação do professor.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As disciplinas de fenômenos de transporte e mecânica dos fluidos do curso de engenharia ambiental devem ser complementadas com o uso de CFD. O CFT-2D é uma boa ferramenta de aprendizado e facilita a visualização do escoamento.

Desenvolver o módulo *Usuário* do referido programa em etapas tem sido ótimo exercício. Em geral, os problemas reais são bem mais complexos que os apresentados nesta metodologia, porém, estas etapas iniciais são fundamentais para a solução de problemas reais envolvendo outros fenômenos, como turbulência e escoamento transiente.



4. REFERÊNCIAS / CITAÇÕES

ANGELO, E. Utilização da dinâmica dos fluidos computacional na complementação do ensino da disciplina de fenômenos de transporte. Anais do XXXIV COBENGE. Editora Universidade de Passo Fundo, 2006.

BIRD, R. B., STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Fenômenos de Transporte. 2ª edição. LTC Editora. Rio de Janeiro, 2002.

LOPES, V.J.S, ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, Instrumentação virtual aplicada ao ensino de engenharia elétrica, dissertação de mestrado, 2007. 108p.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Ed. Pearson Education Limited. 2a. Ed. 2007.

PATANKAR, S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere Publishing Corporation. Second Edition. USA, 1980.

Abstract: *This paper presents a methodology for the teaching of fluid mechanics and transport phenomena in environmental engineering course with the implementation of a routine in a computer open code. The main focus of this work is the user interaction-teacher in understanding and refining the results found in the simulations, in order to obtain consistent results for the physical problem studied. The details contained in the methodology are described in steps and the resulting graphs of the post-processing of the data obtained using the code are shown.*

Key-words: *Computational Fluid Dynamics, CFD, Environmental Engineering, Numerical simulation.*