



Anais do XXXIV COBENGE. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, Setembro de 2006.
ISBN 85-7515-371-4

UTILIZAÇÃO DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL NA COMPLEMENTAÇÃO DO ENSINO DA DISCIPLINA FENÔMENOS DE TRANSPORTE

Edvaldo Angelo – eangelo@mackenzie.com.br

Universidade Presbiteriana Mackenzie, Escola de Engenharia, Grupo de Simulação Numérica.
Rua da Consolação, 930.

CEP 01302-907 – São Paulo – SP

Daniel Benítez Barrios – danielbb@mackenzie.com.br

***Resumo:** Este artigo apresenta uma proposta metodológica para a complementação teórica da disciplina Fenômenos de Transporte dos cursos de graduação. É descrito detalhadamente através de um exemplo, o procedimento adotado na Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie pelo Grupo de Simulação Numérica, na iniciação de alunos de graduação nas técnicas numéricas de solução de problemas envolvendo mecânica dos fluidos, transferência de calor e massa (fenômenos de transporte). Um programa comercial de Dinâmica dos Fluidos Computacional é usado no apoio pedagógico deste desenvolvimento, o ANSYS CFX ®.*

***Palavras-chave:** Dinâmica dos Fluidos Computacional, simulação numérica, aerodinâmica.*

1. INTRODUÇÃO

O ensino da disciplina Fenômenos de Transporte na graduação de engenharia tem uma séria limitação, o difícil processo de aprendizado das equações de conservação, ou seja, a compreensão dos termos inerentes e os seus significados nestas equações. Em muitos cursos, sejam eles de Mecânica dos Fluidos, Transferência de Calor e Massa ou Fenômenos de Transporte, são apresentadas aos graduandos equações simplificadas, válidas em condições muito particulares e limitadas do ponto de vista das aplicações. Problemas práticos, entretanto, muito raramente têm essas hipóteses simplificadoras. Todavia, as equações de conservação na forma completa não têm solução analítica, demandando sofisticadas técnicas numéricas de solução.

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 Fenômenos de Transporte ministrada nos cursos de graduação. A complementação didática é aplicada na forma de participação dos alunos interessados na utilização de

ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional em problemas de interesse da engenharia. É utilizado para tanto, um software comercial denominado ANSYS CFX®. Nas Universidades, geralmente, apenas nos cursos de pós-graduação é possível iniciar os estudos de Dinâmica dos Fluidos Computacional.

A participação dos alunos no programa de complementação é voluntária e se dá através do uso dos métodos numéricos de solução em diversos projetos, entre eles: projetos de iniciação científica, projetos temáticos e trabalhos de conclusão de curso (no Mackenzie são denominados Trabalhos de Graduação Interdisciplinar). Os principais projetos temáticos na Escola de Engenharia atualmente são: o aerodesign, o carro de economia de combustível e o mini-baja. Todos estão relacionados a competições entre equipes de diversas Universidades, visando obter soluções de engenharia com características peculiares.

O Grupo de Simulação Numérica (GSN) recebe os alunos interessados, que devem obrigatoriamente ter freqüentado e sido aprovados nas disciplinas de Fenômenos de Transporte. O contato dos alunos com as ferramentas computacionais é realizado nas seguintes etapas: (a) Apresentação das capacidades e exemplos da simulação numérica da dinâmica dos fluidos aplicada a problemas de engenharia; (b) Apresentação de casos exemplos 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 graduação interdisciplinar realizado por uma aluna do curso de engenharia mecânica como exemplo da metodologia aplicada.

2. CASO EXEMPLO: ESTUDO DO ESCOAMENTO AO REDOR DO CARRO DE ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL.

O exemplo escolhido para apresentação é a aplicação da complementação didática ao desenvolvimento de um trabalho de graduação interdisciplinar. A aluna do curso de engenharia mecânica Mariana Rollo Batista participou do processo. Inicialmente as etapas (a), (b) e (c) foram apresentadas à 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 completamente as outras duas técnicas de solução de problemas, a saber, a experimental e a teórica.

A dinâmica dos fluidos computacional, na literatura inglesa denominada “Computational Fluid Dynamics” (CFD) é uma poderosa ferramenta na análise de escoamentos. Historicamente, escoamentos complexos, como por exemplo, escoamentos externos e, entre eles, aqueles que se desenvolvem em torno de asas ou corpos rombudos, 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, 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 otimizar 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 cresceu 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.

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 da noite 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 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, que foram deduzidas, discutidas e simplificadas para seu uso, nos cursos de Fenômenos de Transporte. As equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e energia na forma integral aplicadas a volume de controle são respectivamente (veja detalhes em ANDERSON, 1991):

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v \rho \, dv + \iint_A \rho \vec{V} \cdot \vec{n} \, dA = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v \rho \vec{V} \, dv + \iint_A (\rho \vec{V} \cdot \vec{n} \, dA) \vec{V} = - \iint_A p \, dA + \vec{F}_C + \vec{F}_{visc} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \, dv + \iint_A \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \cdot \vec{n} \, dA = \iiint_v \dot{q} \rho \, dv + \dot{Q}_{visc} - \iint_A p \vec{V} \cdot \vec{n} \, dA + \dot{W}_C + \dot{W}_{visc} + \dot{W}_E \quad (3)$$

Onde: ρ é a densidade, v é o volume, \vec{n} é o versor normal à superfície do volume de controle, cuja área é denominada A , \vec{V} é a velocidade, p é a pressão, \vec{F}_C são as forças de campo (gravitacional, por exemplo), \vec{F}_{visc} são as forças proveniente de efeitos viscosos na superfície do volume de controle, e é a energia interna específica, \dot{q} é a taxa de transferência de calor específica pela absorção ou emissão de radiação térmica ou geração e consumo por reação química dentro do volume de controle, \dot{Q}_{visc} é a taxa de transferência de calor pela superfície do volume de controle, \dot{W}_C é a potência das forças de campo, \dot{W}_{visc} é a potência das forças viscosas e, \dot{W}_E é a potência do eixo.

Para muitos métodos numéricos a apresentação das equações de conservação no formato diferencial é indicada. Muitos livros textos trazem as equações no formato diferencial (BIRD e outros, 2004)

Já vislumbrando o estudo de caso que será realizado utilizando a técnica de CFD no ANSYS CFX®, é possível simplificar as equações retirando alguns termos. Por exemplo, no caso do estudo aerodinâmico do carro de economia de combustível, as velocidades são relativamente baixas, as variações de temperatura e os efeitos térmicos desprezíveis, desta forma, não há necessidade da resolução da equação (3), a equação da conservação da energia.

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 do problema escolhido. O próximo item descreve o procedimento indicado usando o exemplo do carro de economia de combustível, o ECOMACK.

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 carenagem do carro de economia de combustível do Mackenzie pode ser vista na Figura 1.

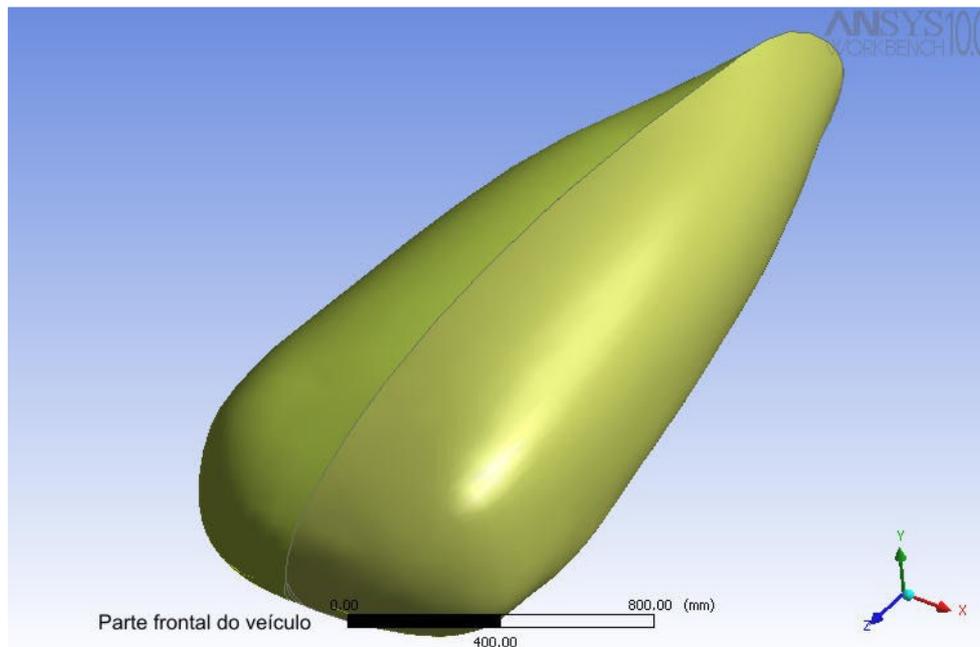


Figura 1 – Modelo 3D em CAD da carenagem do ECOMACK.

No modelo computacional para análise em CFD foram omitidas as rodas e os pneus, fato justificado por suas pequenas áreas frontais e conseqüentemente pequena contribuição na força de arrasto e sustentação de todo o conjunto. Ainda na etapa de pré-processamento o domínio computacional deve ser determinado, ou seja, é necessário determinar a região do espaço ao redor do corpo que será analisada. A Figura 2 mostra o domínio computacional escolhido para o problema em questão.

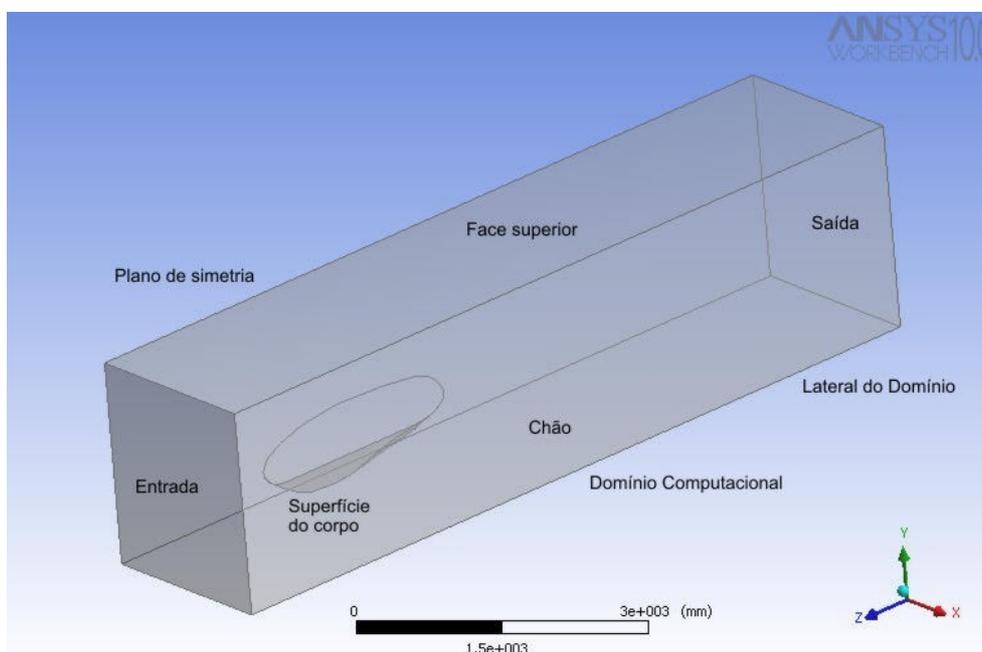


Figura 2 – Domínio Computacional para análise do ECOMACK.

Devido à existência de um plano de simetria, o modelo foi simplificado e o domínio computacional construído de acordo com essa hipótese. A próxima fase dentro do pré-processamento é a discretização do domínio computacional ou geração da malha de elementos

finitos. Os elementos usados foram tetraédricos. Inicialmente, para cada face do domínio computacional são geradas as malhas superficiais, sendo que, controles de tamanho devem assegurar maior concentração de elementos nas regiões de maior gradiente de propriedades, neste caso nas regiões próximas da superfície do ECOMACK e da superfície do solo. A Figura 3 mostra a malha superficial para a região da simetria. As malhas nas outras faces e na superfície do corpo não são mostradas para não impedir a visualização. Terminada a geração da malha para todas as superfícies a malha tridimensional deve também ser gerada. Para o exemplo estudado, a malha contém 90193 nós e 340195 elementos.

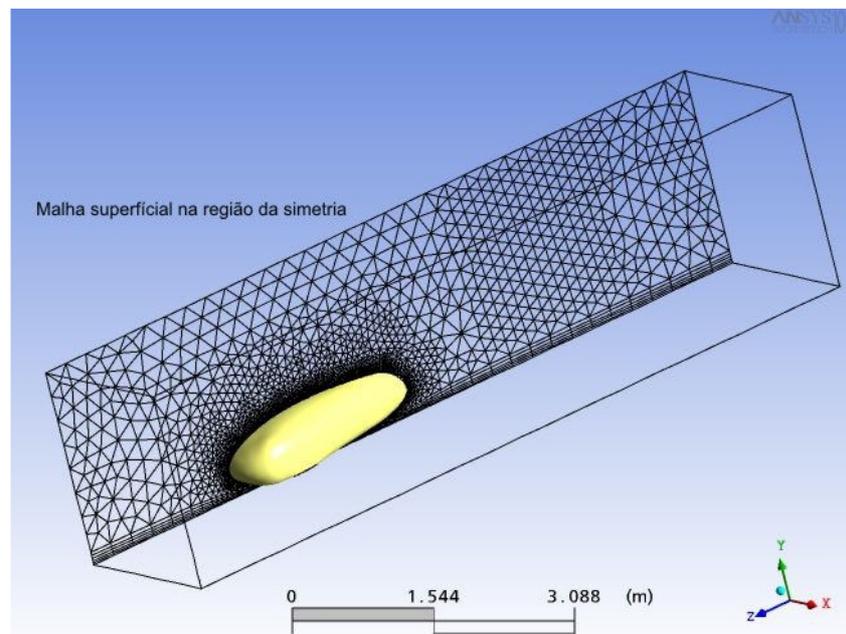


Figura 3 – Detalhe da malha superficial no plano de simetria do modelo.

Na análise proposta o carro está parado e o ar se movimenta em sua direção, como em um túnel de vento. As condições de contorno impostas para as faces indicadas na Figura 2 são: Entrada: valor da velocidade (10 m/s); Saída: valor da pressão como pressão atmosférica (101325 Pa); Plano de simetria, face superior e lateral: componente perpendicular da velocidade ao plano nula e, Chão: velocidade nula.

As propriedades do fluido são consideradas uniformes e calculadas à 25°C. O modelo é um modelo de fluido incompressível (número de Mach é muito inferior a 0,3) e regime permanente.

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 4 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, os critérios de convergência e sobre os erros numéricos da solução matemática. O critério de parada para a simulação do ECOMACK foi a obtenção de um resíduo máximo de 0,0015 o que permitiu 27 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.

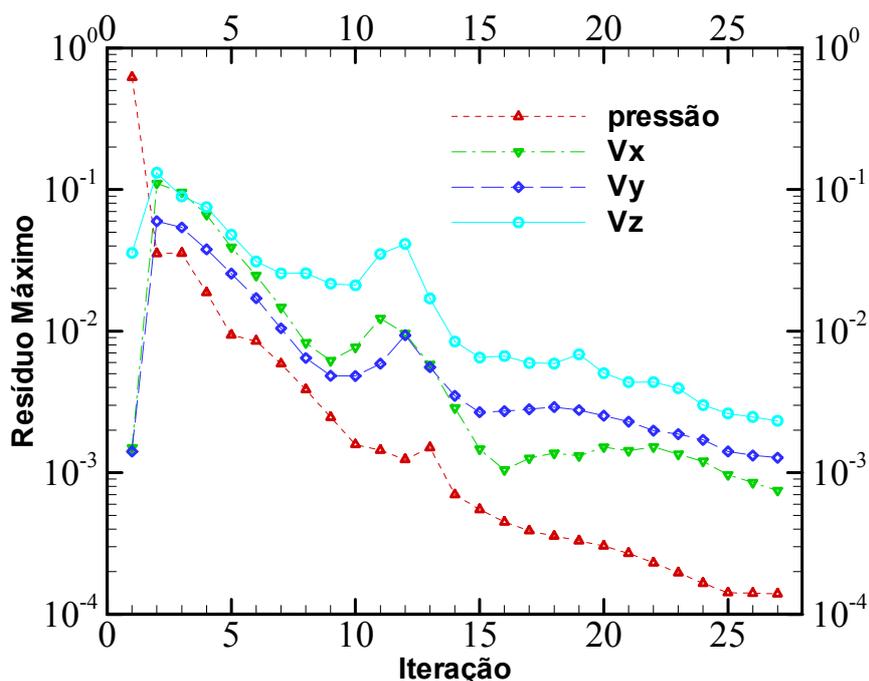


Figura 4 – Detalhe dos valores residuais máximos para as variáveis: pressão, velocidade na direção x - V_x , velocidade na direção y - V_y e velocidade na direção z - V_z .

Na etapa de pós-processamento os resultados podem ser vistos como mapas de cores, o que facilita a visualização das condições do escoamento e permite que sejam observadas suas características.

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. 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.

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.

Na Figura 5 foram traçadas as linhas de corrente bidimensionais para dois planos escolhidos. O corpo, apenas para facilitar a visualização, está em cor amarela.

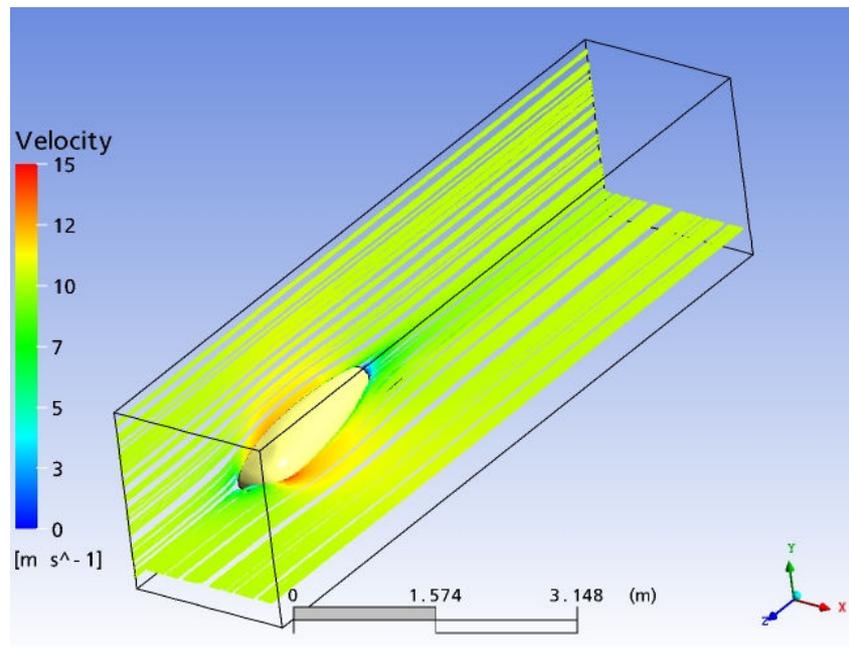


Figura 5 – Linhas de corrente bidimensionais em dois planos.

A Figura 6 contém um mapa de cores da distribuição de pressões sobre a superfície do ECOMACK. As pressões estão na escala efetiva e é possível observar, como esperado, que as maiores pressões estão concentradas na parte frontal do veículo.

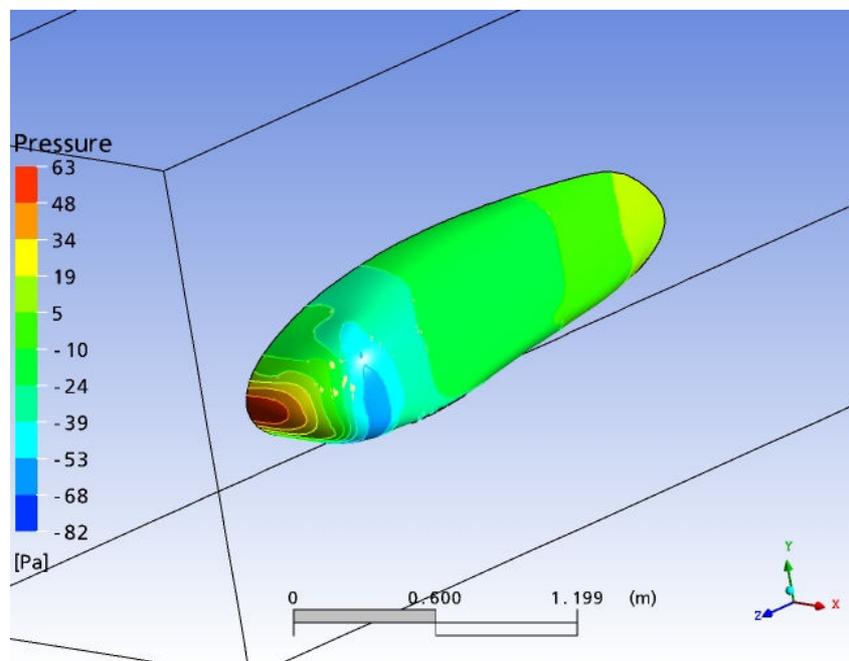


Figura 6 – Distribuição de pressão sobre a superfície do ECOMACK.

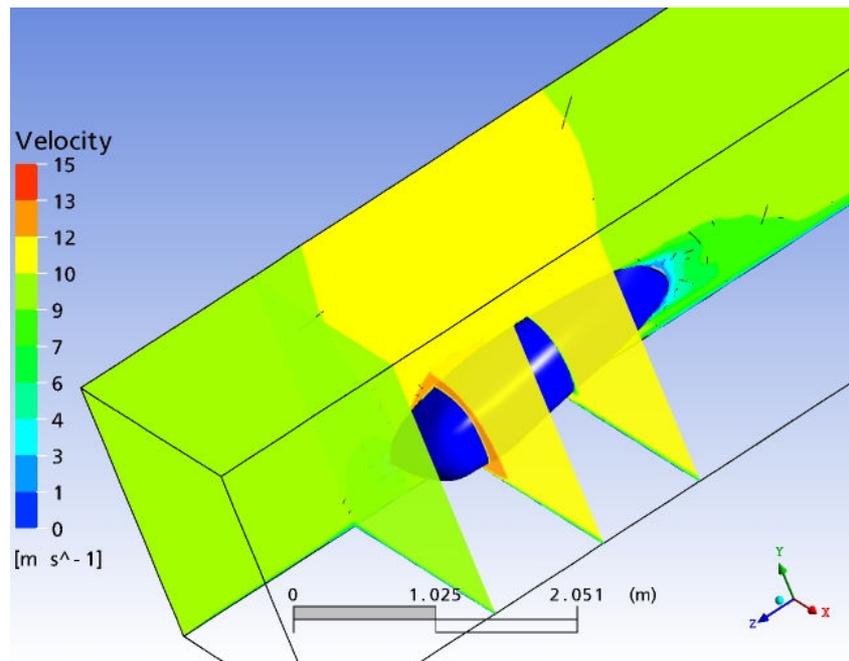


Figura 7 – Mapa de cores para a velocidade em alguns planos de interesse.

A Figura 7 ilustra um mapa de cores para a velocidade do ar sobre o corpo em alguns planos e no plano de simetria do escoamento. A informação primordial para este tipo de projeto é o valor da força de arrasto e da força de sustentação, ou seja, os esforços aerodinâmicos sobre a carenagem do veículo de economia de combustível. Neste caso, a força de arrasto tem valor de 1,44 N (força paralela ao eixo z) e o valor da sustentação de 3,2 N para baixo (orientação contrária à direção positiva do eixo y nas figuras).

Nesta fase de pós-processamento o aluno tem uma explicação detalhada sobre o escoamento em questão. Há uma extensa discussão sobre as características que podem ser compreendidas neste estudo numérico e, especificamente no caso do ECOMACK, quais alterações seriam significativas para obter melhorias aerodinâmicas.

Neste caso em especial a aluna Mariana Rollo Batista realizou ainda, testes (sem o auxílio direto dos docentes) variando a velocidade do carro (velocidade de entrada do fluido no domínio computacional) e pôde obter curvas da variação dos esforços aerodinâmicos com a variação da velocidade.

3. CONCLUSÕES

A Dinâmica dos Fluidos Computacional é uma importante ferramenta de análise de projeto que, na maioria dos cursos de graduação, não é apresentada aos alunos. As disciplinas básicas como: Mecânica dos Fluidos, Transferência de Calor e Massa ou Fenômenos de Transporte, podem ser complementadas através de estudos voluntários realizados pelos alunos em projetos de iniciação científica, de trabalhos de final de curso, entre outros, pela aplicação de CFD em problemas práticos de engenharia. Esta complementação deve ter como foco a apresentação da ferramenta e suas características aos estudantes, para fomentar o interesse do prosseguimento dos estudos em nível de pós-graduação destas metodologias de cálculo, que tanto agregam ao projeto na engenharia.

Visando incentivar o aprendizado, é muito útil uma abordagem mais prática da apresentação dos ferramentais numéricos, utilizando para tanto, softwares comerciais de CFD, como o ANSYS CFX®, 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 ser complementado em cursos de pós-graduação. Isto permite uma visão geral, exemplificando aplicações, e criando 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J. D. **Fundamentals of Aerodynamics**. 2nd. Ed. McGraw-Hill, 1991.

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

BIRD, R.B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. 2nd 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.

USE OF THE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN THE COMPLEMENTATION OF THE GRADUATION TRANSPORT PHENOMENA DISCIPLINE

Abstract: *This paper presents a methodological approach to complementation in the Transport Phenomena graduate discipline. It is described an example, the teaching procedure adopted in the Mackenzie School of Engineering by Numerical Simulation Group. The graduated students solve engineer problems with Computational Fluid Dynamics technique with the aid of commercial CFD code (the program ANSYS CFX®).*

Key-words: *Computational Fluid Dynamics, numerical simulation, aerodynamics.*