

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE

**Análise numérica do campo de escoamento externo na geometria de referência Ahmed para aplicações automotivas – Análise de transferência de calor**

Projeto de pesquisa e plano de atividades

Proponente:

Prof. Leonel Rincón Cancino, Dr. Eng.

Laboratório de Motores de Combustão Interna - LABMCI / CTJ / UFSC

Joinville, Abril de 2017



## Sumario.

1. Introdução à segunda etapa desta proposta de pesquisa. ....	4
2. Caracterização do problema .....	4
2.1 Métodos experimentais.....	5
2.2 Métodos numéricos .....	5
3. Objetivos e metas a serem alcançados.....	7
3.1. Objetivo geral .....	7
3.2 Objetivos específicos.....	7
3.3 Metas a ser alcançadas.....	7
4. Metodologia a ser empregada.....	7
4.1 Geração da geometria de referencia “Ahmed” .....	7
4.2 Geração de malha computacional em cada uma das geometrias geradas no item 3.1.....	8
4.3 Estudo de independência de tamanho de malha dos resultados .....	8
4.4 Simulações numéricas usando diferentes modelos de turbulência .....	8
4.5 Comparação com dados experimentais disponíveis na literatura. ....	9
4.6 Aperfeiçoamento / refino das simulações numéricas .....	9
5. Resultados esperados .....	9
6. Viabilidade do projeto (recursos/infraestrutura) .....	10
7. Plano de atividades e cronograma. ....	10
8. Referências bibliográficas .....	10

## Lista de figuras

Figura 1. Campo de escoamento na parte inferior do veículo. Ilustração do escoamento de arrefecimento se misturando com o escoamento da parte inferior do veículo (entre o veículo e o chão). ....	4
Figura 2. Métodos para análise de escoamento usados em aerodinâmica veicular. ....	5
Figura 3. Geometria, contornos de velocidade e linhas de corrente ao redor de um veículo de passeio (Rosilho, 2013).....	6
Figura 4. Geometria padrão de testes Ahmed (Hucho, 1998, Barnard, 2009, Miele et al. 2011, Khan and Umale, 2014).....	6
Figura 5. Geometria padrão de testes Ahmed com indicando as possíveis dimensões que podem ser variadas para a análise do campo de escoamento desta proposta.....	8
Figura 6. Arrasto total e parcelas de contribuição de arrasto das diferentes componentes da superfície da Geometria padrão de testes Ahmed, em função do ângulo da inclinação ( $\varphi$ ) da superfície traseira inclinada (Hucho, 1998). Resultados experimentais sem interação de escoamentos interno e externo. ....	9

## 1. Introdução.

O propósito principal desta pesquisa é a continuação da análise de escoamento ao redor do corpo de referência de Ahmed usado na área de pesquisa em aerodinâmica automotiva. A primeira etapa de este projeto de pesquisa, contemplada com um bolsista PIBIC 2015-2016 chegou ao final com a conclusão de um TCC no curso de Engenharia Automotiva, CTJ-EMB, e um artigo em processo de publicação, obtendo excelentes resultados:

<http://leonelcancino.paginas.ufsc.br/projetos-pe/projeto-aerodinamica-veicular-ahmed/>

Esta pesquisa visa analisar numericamente o efeito da transferência de calor no coeficiente de arrasto total no corpo de referência de Ahmed. A seguir o conteúdo desta proposta.

## 2. Caracterização do problema

Em termos energéticos, o desempenho global de um veículo de estrada depende principalmente dos seguintes parâmetros/fatores: (a) campo de escoamento ao redor do corpo do automóvel, (b) eficiência mecânica dos diferentes componentes de transmissão de potência, (c) eficiência térmica e mecânica do motor de combustão interna e sistemas auxiliares (sistema de arrefecimento, sistema de lubrificação, sistema de condicionamento de ar, etc.), (d) eficiência mecânica / elétrica do motor elétrico e sistema de transmissão no caso de veículos elétricos. Dos itens listados acima, o primeiro depende fortemente da aerodinâmica do automóvel, definida principalmente pelas características do campo de escoamento ao redor do automóvel. A interação entre o escoamento externo (ao redor do automóvel) e o escoamento interno tem sido pouco investigada. O escoamento interno é definido com a parte do ar que entra pela grade frontal do veículo e escoam pelos diferentes componentes internos, principalmente para efeitos de arrefecimento do motor (óleo de lubrificação, por exemplo), mudando a sua temperatura pelo efeito de troca térmica ao escoar pelo compartimento do motor e subsistemas. Posteriormente, esta parcela de escoamento interno sai do compartimento do motor e se junta ao escoamento externo, usualmente na parte inferior da dianteira do veículo (diferente aos gases de escapamento, os quais são conduzidos pelo sistema de exaustão até a parte traseira do veículo).

A Figura 1 mostra de forma ilustrativa o escrito anteriormente.

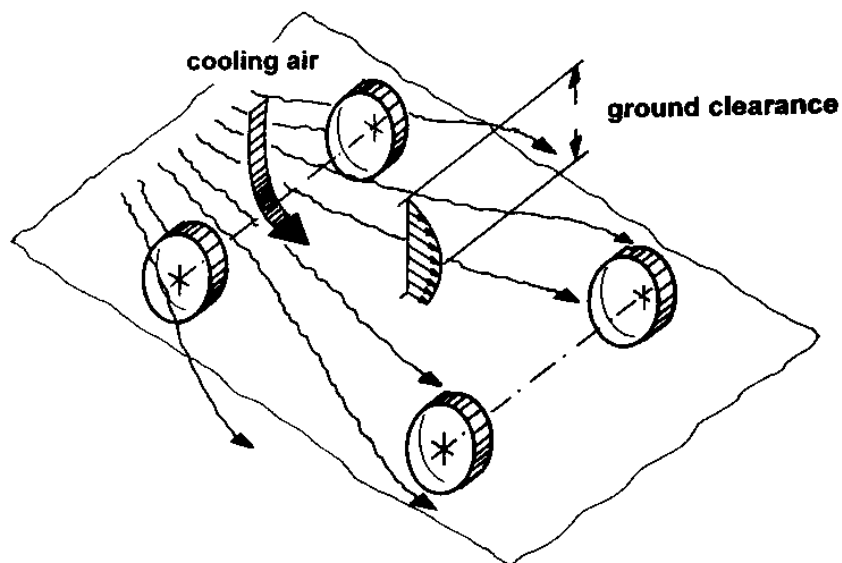


Figura 1. Campo de escoamento na parte inferior do veículo. Ilustração do escoamento de arrefecimento se misturando com o escoamento da parte inferior do veículo (entre o veículo e o chão).

Existem dois possíveis caminhos para a análise de escoamento ao redor de um corpo incluindo o efeito da interação entre o escoamento interno e externo (em automóveis, o foco desta proposta): (a) métodos experimentais e (b) métodos numéricos.

## 2.1 Métodos experimentais

São grandes os esforços realizados por parte da indústria automotiva e centros de pesquisa para o desenvolvimento e aplicação de metodologias que permitam analisar e desta forma visualizar e entender o escoamento ao redor de um veículo. Duas metodologias experimentais são utilizadas nos dias de hoje: (a) Túneis de vento e (b) Testes na estrada (Instrumentação no próprio automóvel).

**Túneis de vento:** Para a indústria automotiva, túneis de vento tem jogado um papel muito importante. A maioria dos túneis de vento existentes para pesquisa e desenvolvimento em automóveis, precisam que a geometria a ser testada seja uma réplica em escala reduzida da geometria original do automóvel. Isto gera várias limitações em termos de condições de teste, restringidos principalmente pela velocidade máxima do ar que pode ser atingida na zona de teste. Por questões de similaridade (Fox, 2009. White, 2007), um modelo a escala 1:10 precisa ser testado a 10 vezes do valor da velocidade da geometria original, desta forma, testar um modelo a escala 1:10, de um veículo se movimentando a 160 km/h, é necessária uma velocidade do ar no túnel de vento de 1600 km/h, bem por cima da velocidade do som a nível do mar. Nesta condição de escoamento supersônico, os efeitos de compressibilidade do ar são muito importantes e isso faz com que os resultados do campo de escoamento ao redor do modelo a escala sejam completamente diferentes dos reais na geometria original. A Figura 2(a) mostra a geometria do túnel de vento do MIRA (<http://www.mira.co.uk/>) para testes de campos de escoamento ao redor de veículos em escala real.

**Testes na estrada (Instrumentação no próprio automóvel):** Esta metodologia elimina as fontes de erro presentes nos testes em túneis de vento, porém, são introduzidas outras fontes de erro principalmente associadas a perturbações do campo de escoamento ao redor do automóvel. A Figura 2(b) mostra um exemplo de instrumentação de tubos de Pitot, para medição de velocidades num plano de escoamento.

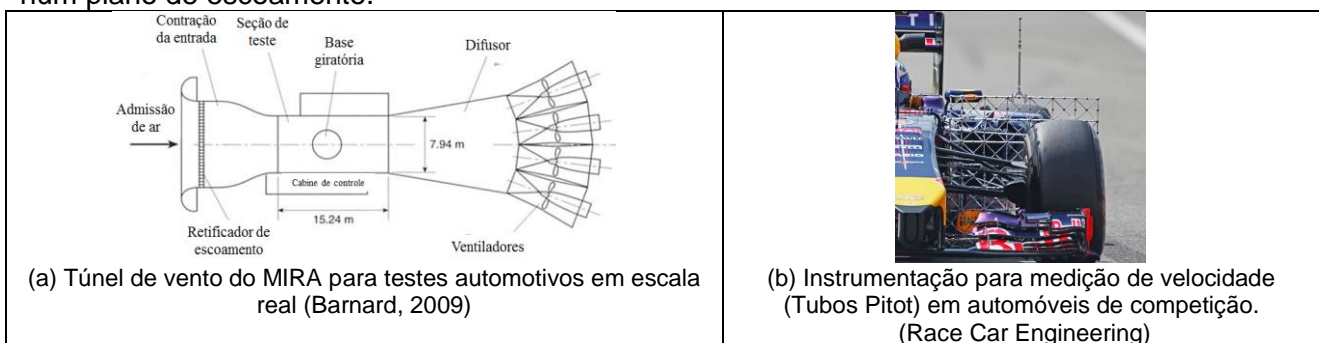


Figura 2. Métodos para análise de escoamento usados em aerodinâmica veicular.

## 2.2 Métodos numéricos

Para conhecer numericamente as forças aerodinâmicas ao redor de um veículo, é necessário calcular as pressões e velocidades na superfície do automóvel, o qual pode ser feito, usando as equações do movimento de fluidos (mecânica dos fluidos). O conjunto de equações mais amplamente usado para descrever o movimento dos fluidos são: (a) as equações de Navier-Stokes, as quais fornecem uma relação entre pressão, momentum e forças viscosas, (b) a equação de continuidade descreve o balanço entre a quantidade de um fluido que entra e sai de um determinado espaço, e (c) a equação de conservação de energia, a qual descreve a troca entre as diferentes formas de energia no escoamento. Desta forma, Eq. Navier-Stokes + Eq. Continuidade + Eq. Energia => possibilidade de determinar pressão e velocidade em qualquer ponto no escoamento ao redor de um veículo. Na Aerodinâmica de veículos de estrada, os efeitos

de compressibilidade podem ser desprezados, e a equação da energia não é requerida (*para análise da interação de escoamentos interno e externo no automóvel precisa ser incluída*). Desta forma uma versão simplificada das equações de Navier-Stokes pode ser utilizada. A solução numérica irá representar a solução real do escoamento somente se são contemplados os movimentos menores do escoamento turbulento, olhando para um escoamento turbulento, fumaça por exemplo, pode-se observar que existem varias escalas de movimento rotacional. Ainda dentro das menores escalas observáveis, existem outras escalas a nível microscópico, que não são visíveis ao olho humano. Pra levar em conta estas escalas menores, é necessária uma malha computacional muito refinada (Simulação Numérica Direta – DNS). A malha estimada para capturar os efeitos no escoamento ao redor de um automóvel é de  $\sim 10^{18}$  nós. Desta forma DNS não é uma opção para a indústria automotiva

Em função das limitações dos métodos mais simplificados para os tipos de escoamento na indústria automotiva, somente resta utilizar as equações de Navier-Stokes com modelos de turbulência. Vários institutos de pesquisa têm desenvolvido seus próprios códigos computacionais, amplamente validados e muito funcionais. Também códigos comerciais têm sido desenvolvidos ao longo dos últimos anos, e têm sido amplamente difundidos. A maioria destes códigos comerciais têm várias vantagens em termos de uso: geração simples de geometrias, modelos de turbulência implementados, pós-processamento, etc.

A Figura 3 mostra resultados numéricos utilizando a ferramenta ANSYS-CFD, de uma geometria real de um automóvel de passeio. O foco principal do trabalho consistiu em analisar o efeito da remoção dos espelhos retrovisores do veículo no coeficiente total de arrasto aerodinâmico do automóvel, visando determinar o impacto no consumo de combustível.

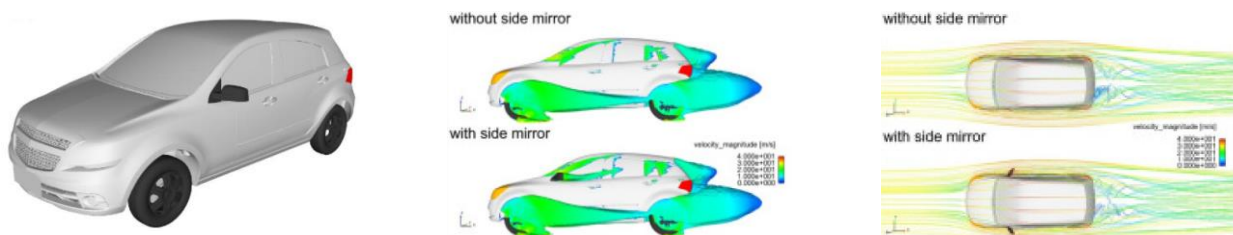


Figura 3. Geometria, contornos de velocidade e linhas de corrente ao redor de um veículo de passeio (Rosilho, 2013)

O trabalho do Rosilho (2013) mostra a viabilidade da utilização de ferramentas computacionais na análise e otimização de geometrias na indústria automotiva.

Testes na estrada, túneis de vento e CFD são ferramentas complementares no projeto e desenvolvimento e otimização de novos protótipos de automóveis. Na indústria automotiva, tem sido amplamente usada uma geometria de referencia “Ahmed body” (Hucho, 1998, Barnard, 2009), com a qual têm sido alcançados grandes avanços no entendimento do campo de escoamento ao redor de um veículo. A Figura 4 mostra a geometria de Ahmed em testes de túnel de vento (esquerda), e dimensões características (direita)

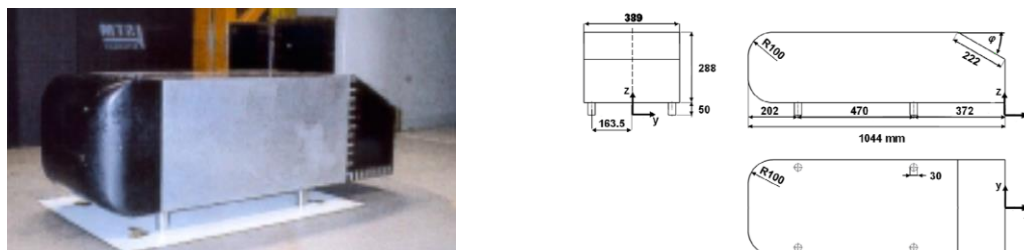


Figura 4. Geometria padrão de testes Ahmed (Hucho, 1998, Barnard, 2009, Miele et al. 2011, Khan and Umale, 2014)

A maioria dos resultados usando esta geometria de referência tem sido obtidos em túneis de vento e desta forma, existe uma ampla base de dados experimentais, disponíveis na literatura, de campo de escoamento envolvendo arrasto aerodinâmico, sustentação e contribuições das diferentes componentes superficiais (parte frontal, traseira, laterais, parte inferior, superfície inclinada na traseira, distância ao chão, arredondamentos, etc.) que podem ser utilizadas para

validação de simulações numéricas e desta forma identificar quais os melhores parâmetros de set-up da simulação (modelos de turbulência, tipo de solver, discretização, etc.) que melhor representem simulações de aerodinâmica de veículos de estrada. Posteriormente, poderão ser extrapolados os procedimentos para geometrias automotivas mais complexas / realísticas.

### **3. Objetivos e metas a serem alcançados**

#### **3.1. Objetivo geral**

Esta proposta visa analisar a interação entre escoamentos externo e interno no campo de escoamento ao redor do corpo da geometria de referência “Ahmed” para aplicações automotivas utilizando dinâmica de fluidos computacional.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Para atingir o objetivo geral desta proposta de pesquisa, serão realizadas as seguintes ações, descritas em forma sequencial.

- Geração da geometria de referencia “Ahmed”, conforme indicado no item 4 desta proposta.
- Estudo de independência de tamanho de malha dos resultados
- Simulações numéricas usando diferentes modelos de turbulência
- Comparação com dados experimentais disponíveis na literatura.
- Aperfeiçoamento / refino das simulações numéricas

#### **3.3 Metas a ser alcançadas**

- Maior entendimento da interação dos escoamentos externo e interno, em termos de arrasto aerodinâmico no campo de escoamento ao redor de um veículo de estrada usando dinâmica de fluidos computacional.
- Pelo menos uma publicação associada à comparação de dados numéricos de campos de escoamento em geometrias associadas à indústria automotiva.

### **4. Metodologia a ser empregada**

A ferramenta computacional a ser utilizada é o programa ANSYS-FLUENT. A metodologia proposta, acorde com os objetivos geral e específicos desta proposta é a seguinte:

#### **4.1 Geração da geometria de referencia “Ahmed”**

Embora a geometria de Ahmed seja denominada de “geometria de referência” passando ao leitor que se refere a uma geometria fixa, os estudos relacionados à mesma são feitos realizando variações geométricas da mesma (ângulo de inclinação da superfície inclinada na traseira, arredondamento na frente, distância ao chão, etc.). É justamente o impacto gerado (no arrasto e sustentação) desta variação de parâmetros geométricos o que tem permitido o melhor entendimento do campo de escoamento ao redor de automóveis. A Figura 5 mostra a geometria padrão de estes (Ahmed body) indicando os possíveis parâmetros geométricos a serem variados para a análise do campo de escoamento ao redor do corpo. Observa-se que são sete comprimentos (D1, D2, D3, D6, D7, D8 e D9), um raio (R1), um diâmetro (D5) e um ângulo de inclinação ( $\varphi$ ). Para efeitos de validação usando dados experimentais, o principal parâmetro a ser variado é o ângulo de inclinação da superfície traseira inclinada ( $\varphi$ ). A Figura 6 (Hucho, 1998) mostra dados experimentais de arrasto total e parcelas de contribuição de arrasto das diferentes componentes da superfície da geometria padrão de testes Ahmed, em função do ângulo da inclinação ( $\varphi$ ) da superfície traseira inclinada. Observe-se a variação abrupta da parcela de contribuição de do coeficiente de arrasto quando o ângulo de inclinação ( $\varphi$ ) é de  $\sim 30^\circ$ . Fluidodinamicamente, esta variação abrupta do coeficiente de arrasto origina-se pela mudança do

campo de escoamento e intensidade energética dos vórtices formados na “coluna C” do automóvel (Hucho, 1998, Barnard, 2009). Adicionalmente, dados experimentais obtidos em túneis de vento apontam uma faixa do ângulo de inclinação  $28^\circ < \varphi < 34^\circ$  como sendo uma zona de instabilidade.

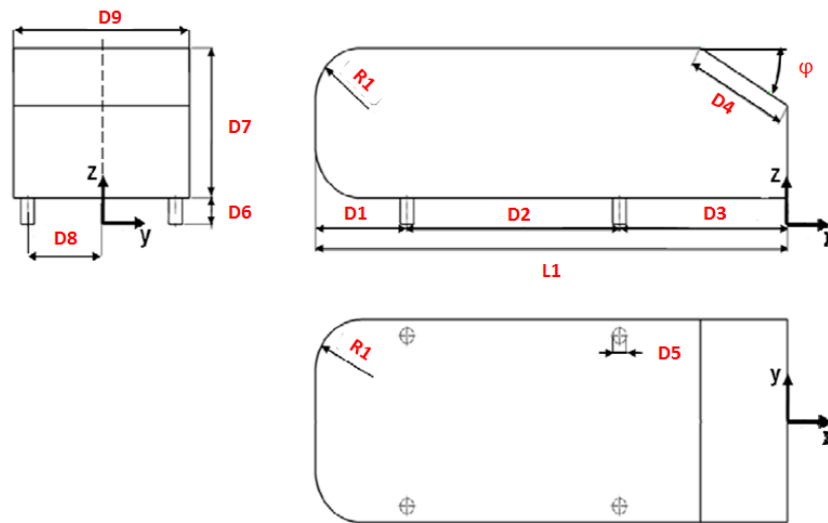


Figura 5. Geometria padrão de testes Ahmed com indicando as possíveis dimensões que podem ser variadas para a análise do campo de escoamento desta proposta

Nesta proposta de pesquisa, o do ângulo de inclinação será variado numa faixa entre  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$  da seguinte forma:  $\varphi = 15^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 45^\circ$  e  $85^\circ$ . Desta forma, 6 geometrias serão criadas.

Na parte inferior do corpo de Ahmed (ao longo de D1, D2 e D3), serão adicionadas áreas de saída de escoamento interno, com um valor de temperatura diferente ao valor da temperatura ambiente. Serão usados valores de temperatura de referência (Heywood, 1988) de escoamento de ar no compartimento do motor do veículo. Não irá ser simulado o escoamento através do compartimento do motor.

#### 4.2 Geração de malha computacional em cada uma das geometrias geradas no item 3.1

Após gerar as geometrias com a variação do ângulo de inclinação da superfície traseira, será feito um processo de geração de malha computacional, de forma sistemática, variando parâmetros de geração de malha (tamanho da discretização, razão de aspecto, etc.). Para a geração de malha o software ANSYS-FLUENT tem duas ferramentas: ICEM-CFD e FLUENT-MESH. Nesta proposta de pesquisa será utilizado o ICEM-CFD. Esta etapa é importante, pois é aqui aonde é definido o tamanho do “túnel de vento virtual” que será utilizado nas simulações. Será utilizada toda a experiência e informação obtida na primeira etapa de desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

#### 4.3 Estudo de independência de tamanho de malha dos resultados

Uma ou duas geometrias serão escolhidas para realizar o estudo de independência de malha computacional. Cada uma destas malhas posteriormente será testada para determinar o menor tamanho de malha a partir do qual o resultado do campo de escoamento não mude.

#### 4.4 Simulações numéricas usando diferentes modelos de turbulência

O software ANSYS-FLUENT tem implementados vários modelos de turbulência, serão testados alguns deles, dependendo da configuração do campo de escoamento e posteriormente irão sendo feitos “refinamentos” no set-up das simulações. Será utilizada toda a experiência e informação obtida na primeira etapa de desenvolvimento deste projeto de pesquisa.



#### 4.5 Comparação com dados experimentais disponíveis na literatura.

Como escrito anteriormente, a Figura 6 (Hucho, 1998) mostra dados experimentais de arrasto total e parcelas de contribuição de arrasto das diferentes componentes da superfície da geometria padrão de testes Ahmed, em função do ângulo da inclinação ( $\varphi$ ) da superfície traseira inclinada. São estes os dados principais para efeitos de comparação entre dados numéricos e experimentais.

Note-se que, os dados de Hucho 1998, são dados de coeficiente de arrasto local e parcial, os quais não incluem o efeito da interação do escoamento interno e externo. É justamente a diferença de resultados o que irá indicar a importância/efeito de esta interação, mesmo usando uma geometria simplificada.

#### 4.6 Aperfeiçoamento / refino das simulações numéricas

Modificações no *set-up* das simulações: escolha do modelo de turbulência, método de interpolação, inicialização do problema, etc., irão indicando o caminho a seguir para simulação de campo de escoamento ao redor corpos com características automotivas, levando em conta a interação entre o escoamento interno e o externo, dependendo dos melhores resultados da comparação entre dados numéricos e dados experimentais.

O tempo de execução desta proposta é de um ano.

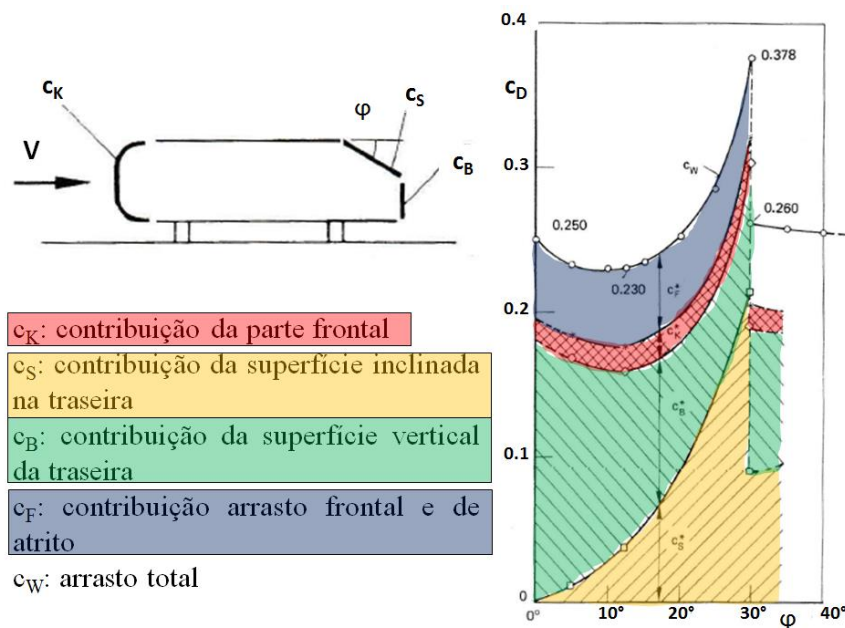


Figura 6. Arrasto total e parcelas de contribuição de arrasto das diferentes componentes da superfície da Geometria padrão de testes Ahmed, em função do ângulo da inclinação ( $\varphi$ ) da superfície traseira inclinada (Hucho, 1998). Resultados experimentais sem interação de escoamentos interno e externo.

#### 5. Resultados esperados

Além de dar os primeiros passos para a criação da linha de pesquisa em aerodinâmica de veículos de estrada no Departamento de Engenharias da Mobilidade, espera-se com esta proposta, chegar aos seguintes resultados:

- Base de dados de resultados numéricos comparada com dados experimentais disponíveis na literatura.
- Maior e melhor entendimento das influências da variação de geométrica no campo de escoamento ao redor de veículos, assim como a influencia do acoplamento entre

escoamento interno e externo na aerodinâmica do campo de escoamento ao redor de automóveis.

- Uma metodologia simplificada para simulações numéricas de campos de escoamento ao redor de um veículo, levando em conta o efeito da interação térmica com o escoamento interno.
- Pelo menos um artigo publicado em revista associado à aerodinâmica de veículos de estrada.

## 6. Viabilidade do projeto (recursos/infraestrutura)

A execução deste projeto de pesquisa depende principalmente de dois fatores (a) Recursos Computacionais e (b) Licença de um programa de Dinâmica de Fluidos Computacional.

Em termos de recursos computacionais, o proponente conta com uma workstation HP para simulação HP – XW8600 – 8 núcleos – 32 GB RAM, e mais uma workstation para simulação – HP – 4 núcleos – 16 GB RAM / cada uma, totalizando 12 núcleos de processamento com 48 GB de RAM e armazenamento de 2TB. Estes recursos estão disponíveis no Laboratório de Motores de Combustão Interna, LABMCI / CTJ / EMB / UFSC.

Em termos de licenças de programas CFD, também, o LABMCI / CTJ / EMB / UFSC possui cinco (5) licenças do programa ANSYS-CFD, as quais estão disponíveis para a execução do projeto.

## 7. Plano de atividades e cronograma.

O plano de atividades e cronograma desta proposta é indicado a seguir:

Atividade #1 Revisão bibliográfica (embasamento teórico do acoplamento de escoamentos interno e externo em aerodinâmica automotiva)

Atividade #2 Geração da geometria de referencia "Ahmed"

Atividade #3 Geração de malha computacional em cada uma das geometrias geradas no item 4.1

Atividade #4 Estudo de independência de tamanho de malha dos resultados

Atividade #5 Simulações numéricas usando diferentes modelos de turbulência

Atividade #6 Comparação com dados experimentais disponíveis na literatura.

Atividade #7 Aperfeiçoamento / refino das simulações numéricas

Atividade #8 Redação de artigo para revista/congresso

Atividade #9 Relatório final

Atividade	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Mês 4	Mês 5	Mês 6	Mês 7	Mês 8	Mês 9	Mês 10	Mês 11	Mês 12
#1	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
#2	x	x	x	x								
#3		x	x	x	x	x	x					
#4		x	x	x								
#5			x	x	x	x	x	x	x			
#6						x	x	x	x	x		
#7							x	x	x	x	x	
#8					x	x	x	x	x	x	x	x
#9												x

## 8. Referências bibliográficas

Barnard, R.H. Road Vehicle Aerodynamic Design: An Introduction. Third Edition, MechAero, 2009

Buchheim, R., Leie, B., Lückkoof, H.-J. Der neue Audi 100 – Ein Beispiel für konsequente aerodynamische Personenwagen-Entwicklung. ATZ. Vol. 85, 1983, pp. 419-425

- Fox, R, Pritchard, P.J., McDonald, A. Introdução à Mecânica dos Fluidos. Sétima Edição. LTC. 2009
- Heywood, J.B. Internal Combustion Engines Fundamentals, McGraw Hill, 1988.
- Hucho, Wolf-Heinrich. Aerodynamics of Road Vehicles. SAE International, Fourth Edition, 1998.
- Khan, R.S., Umale, S. CFD Aerodynamic Analysis of Ahmed Body. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 18 Number 7 – Dec 2014
- Meile, W. Brenn, G. Reppenhagen, A. Lechner, B. Fuchs, A. Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body. CFD Letters, VOI 3(1) March 2011.
- Race Car Engineering. Disponível em: < <http://www.racecar-engineering.com/cars/red-bull-rb10/> > Acesso em 01/05/2015.
- Rosilho, V. Diminuição do arrasto aerodinâmico e economia de combustível de um veículo devido à substituição dos espelhos retrovisores externos por câmeras. Dissertação de mestrado, Instituto MAUÁ de Tecnologia, 2013.
- White, F. Mecânica dos Fluidos. Sexta Edição. McGraw Hill. 2007