



## **ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO EM TORNO DE UM AUTOMÓVEL MODELO FORD CORCEL I**

**Matheus Francisco dos Santos<sup>1</sup>, francisco.msantos@outlook.com<sup>1</sup>**  
**Reginaldo Ribeiro Sousa<sup>2</sup>, reginaldosousa@ufgd.edu.br<sup>2</sup>**  
**Leandro Oliveira Salviano<sup>3</sup>, Leandro.salviano@unesp.br<sup>3</sup>**  
**Augusto Salomão Bornschlegell<sup>4</sup>, augustosalomao@ufgd.edu.br<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal da Grande Dourados, Rodovia Dourados/Itahum, km 12 – Unidade II,

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Av. Brasil Sul, 56 – Centro, Ilha Solteira

**Resumo.** No presente trabalho, o objetivo foi estudar o escoamento em torno do automóvel modelo Ford Corcel I de 1970, numericamente e experimentalmente. A análise numérica foi feita usando a ferramenta OpenFOAM 6.0. O escoamento foi modelado como transiente, bidimensional, isotérmico e com propriedades constantes. Os esquemas numéricos empregados na modelagem foram integração de segunda ordem no tempo, upwind de segunda ordem para os termos advectivos e o Spalart-Allmaras para o modelo de turbulência. O problema foi avaliado para os Números de Reynolds de 1800 e 18000. Já a análise experimental foi conduzida em um túnel de vento subsônico, aspirado, em circuito aberto, para Reynolds de 1800. As informações qualitativas dos dois modelos foram confrontadas, como por exemplos as zonas de recirculações de ar e os pontos de descolamento de camada limite. A partir do modelo numérico foram avaliadas as forças aerodinâmicas. O comportamento de ambas as análises foram condizentes.

**Palavras chave:** CFD. Visualização de escoamento. Aerodinâmica veicular.

### **1. INTRODUÇÃO**

A aerodinâmica automotiva tem forte influência e impacto no consumo de combustível. O efeito do consumo de combustível, devido à aerodinâmica automotiva, pode ser analisado a partir das forças de arrasto médias de veículos terrestres. Ferramentas numéricas são utilizadas para simular problemas de engenharia, pois é possível testar diferentes configurações e cenários antes mesmo de se construir um protótipo. Para comprovar o resultado numérico final, um modelo experimental equivalente é construído para efeitos de validação.

A dinâmica dos fluidos computacional, CFD (do inglês Computational Fluid Dynamics) é a área do conhecimento que trata da simulação numérica de fenômenos de transporte, como a dinâmica de escoamentos e transferência de calor. No estudo da aerodinâmica veicular, utiliza-se, recorrentemente, um modelo de carro idealizado conhecido por corpo de Ahmed(1984). Trata-se de uma geometria simplificada e parametrizada. Dentre os diferentes parâmetros avaliados, destaca-se o ângulo do chanfro posterior do veículo. Bruneau et al., 2013, aplicaram a análise numérica para reduzir o coeficiente de arrasto estudando a zona de recirculação gerada atrás do corpo de Ahmed, pois ela induz uma força de pressão que aumenta significativamente o arrasto. Rao et al., 2017, através do modelo de turbulência *Partially Averaged Navier-Stokes* (PANS), estudaram o descolamento e possível recolamento da camada limite do escoamento em torno do corpo de Ahmed mudando o ângulo de chanfro posterior. Já Aljure et al., 2018 compararam os resultados numéricos obtidos por meio do modelo *Wall-Modeled Large Eddy Simulations* (WMLES) com os resultados de seu trabalho anterior (Aljure et al., 2014) empregando o *Large Eddy Simulation* (LES), com redução do custo computacional de 70%. O resultado numérico de 2014 foi validado experimentalmente.

Hanfeng et al., 2015, através de um estudo experimental realizado em um túnel de vento subsônico, mostram como defletores ajudam na redução de arrasto. Para atingir seus objetivos, foi usado uma sonda de velocidades modelo Cobra (FTI Ltd.) e a técnica de visualização filme de óleo. Vino et al., 2005, estudaram o uso de uma sonda de múltiplos furos para uma melhor medição de regiões com recirculação de ar, inclusive em locais onde há escoamento reverso. Gulyás et al., 2013, através da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV, do inglês *Particle Image Velocimetry*), realizaram um estudo sobre o escoamento exclusivamente da roda dianteira de um corpo de Ahmed.

Como observado anteriormente, o tema da aerodinâmica veicular foi tratado, tanto numericamente quanto experimentalmente para corpos de prova genéricos. No presente trabalho, o objetivo é estudar o escoamento em torno do automóvel modelo Ford Corcel I de 1970, numericamente e experimentalmente, como apresentado na seção a seguir.

## 2. MATÉRIAS E MÉTODOS

### 2.1. Modelagem numérica

A geometria a ser considerada no estudo é um automóvel modelo Ford Corcel I em escala de 1:43 (Fig.1a). O escoamento foi modelado como bidimensional, isotérmico, transitório e com propriedades constantes. Para o estudo, foram empregadas as equações da conservação da massa e de Navier-Stokes para problema bidimensional.

O parâmetro governante nesse modelo é o Número de Reynolds definido pela Eq. (1).

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (1)$$

Sendo  $V$ , a velocidade na entrada do domínio [m/s],  $D$ , a altura do veículo em [m] e  $\nu$ , a viscosidade cinemática em [ $m^2/s$ ]. O problema foi avaliado para os Números de Reynolds de 1800 e 18000.

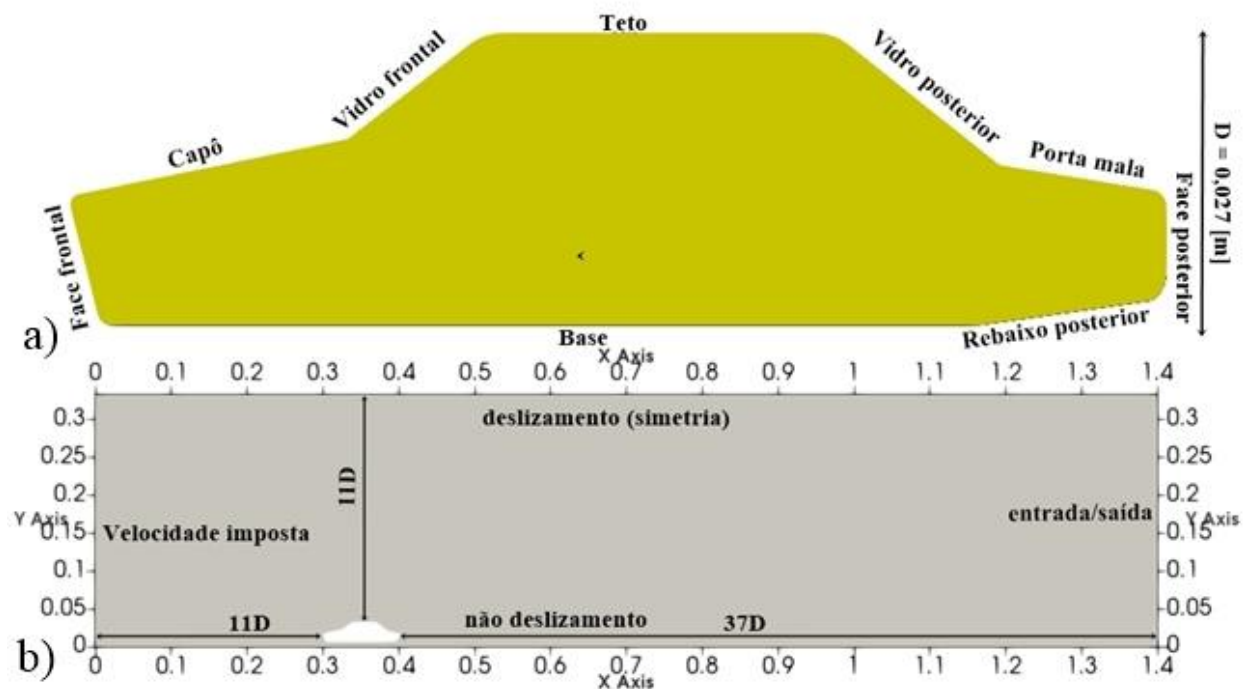
Os coeficientes de sustentação  $C_l$  e arrasto  $C_d$ , são definidos pela Eq. (2)

$$C_{l,d} = \frac{F_{l,d}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2)$$

O índice l é empregado para o coeficiente e a força de sustentação e o índice d para o coeficiente e força de arrasto, sendo os coeficientes  $C_{l,d}$  adimensional e as forças  $F_{l,d}$  em [N],  $V$  a velocidade de referência em [m/s],  $\rho$  a massa específica [ $kg/m^3$ ] e  $A$ , a área frontal [ $m^2$ ]. Para a presente modelagem e escala, a área frontal é de  $0,027 \times 0,036 = 9,72 \times 10^{-4} [m^2]$ .

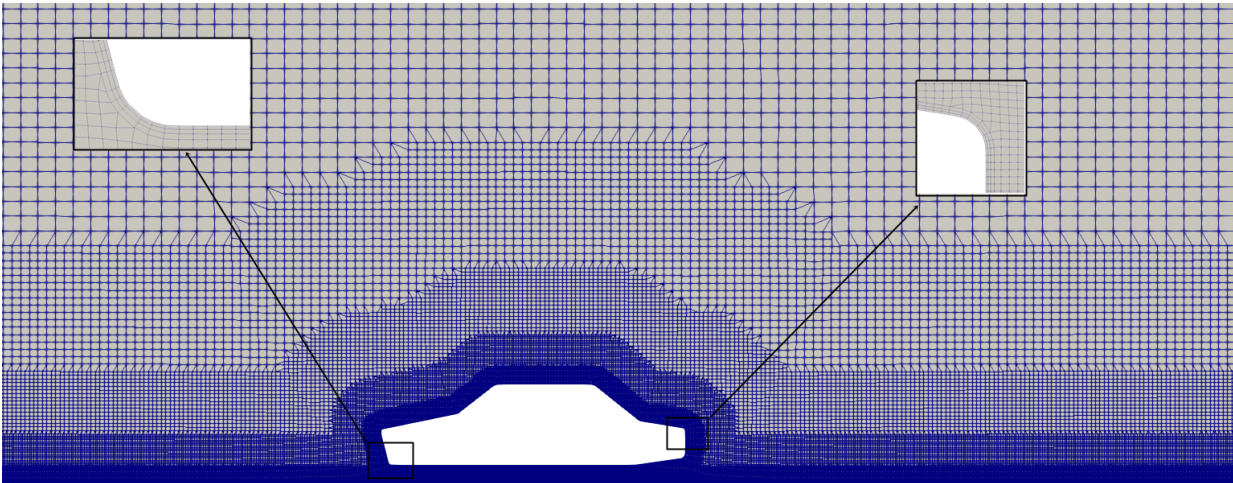
Essa geometria é colocada em um domínio computacional retangular de dimensão  $1,4 \times 1,0$  [m] (Fig.1b), onde o eixo x corresponde à direção do escoamento, o eixo y marca a direção perpendicular ao escoamento. O carro está localizado a  $11D$  da entrada do domínio, a saída do domínio se encontra a uma distância de  $37D$  do veículo e o limite superior do domínio de cálculo se encontra a  $11D$  veículo.

Figura 1. a) Modelo b) Domínio



A malha (Fig.2), foi construída usando 204 mil elementos hexaédricos com o auxílio da ferramenta *snappyHexMesh* do OpenFOAM 6.0. O maior nível de refinamento ficou nas regiões de parede, ou seja, no limite inferior do domínio de cálculo e no corpo de prova (carro).

Figura 2. Malha



No presente trabalho a ferramenta numérica empregada foi o OpenFOAM 6.0. Como condição inicial para análise em regime transiente foi utilizado o resultado do problema equivalente em regime permanente. Para o caso em regime permanente empregou-se o solver *simpleFoam*, que utiliza o algoritmo SIMPLE para o acoplamento pressão-velocidade. Para o regime transiente foi usado o solver *pisoFoam*, que utiliza o algoritmo PISO para acoplamento pressão-velocidade. Para a integração no tempo, foi utilizado o esquema *backward* (passo para trás) de segunda ordem. Para ambos os regimes, no o tratamento dos termos advectivos, empregou-se o esquema de interpolação *upwind* de segunda ordem.

As condições de contorno utilizadas foram: na entrada uma velocidade imposta de 1 m/s ( $Re = 1800$ ) e 10 m/s ( $Re = 18000$ ), no solo, condição de não deslizamento, no topo condição de deslizamento (simetria) e na saída uma condição de entrada/saída, na qual permite entrada de ar pela saída. A viscosidade cinemática empregada foi de  $1,5 \times 10^{-5} [m^2/s]$ , referente a viscosidade do ar na temperatura ambiente. Para a análise em regime transiente o tempo total foi de 1 s.

## 2.2. Método experimental

A parte experimental do presente trabalho foi conduzida em um túnel de vento subsônico, aspirado, em circuito aberto com um Número de Reynolds de 1800. O túnel de vento produzido pela empresa Aeroalcool, é composto praticamente todo de vibra de vidro, exceto a seção de testes que é construída de acrílico. Na entrada do túnel há um bocal, seguido da presença de uma colmeia para estabilizar o escoamento. Em seguida, tem-se um convergente de razão de aspecto 4,5:1, sendo essa razão a relação entre a entrada e a saída do convergente. Depois tem a seção de testes que consiste em uma área de dimensões 462x462x1200 [mm]. Na sequência há um divergente de razão de aspecto de 1:3, sendo essa razão a relação entre a entrada e a saída do mesmo.

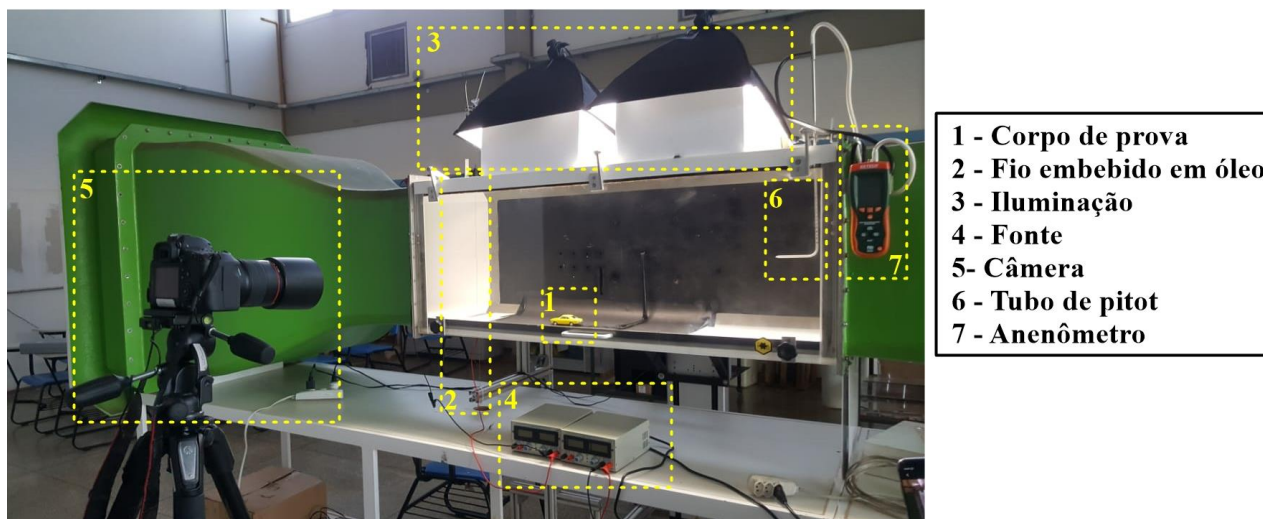
O corpo de prova para a análise consiste em uma miniatura de escala 1:43 do Ford corcel I 1970. O comprimento ( $l$ ), largura ( $w$ ) e altura ( $h$ ) do modelo foram de 10,5 mm, 36 mm e 27 mm, respectivamente. Como mostrado na (Fig.3), para a visualização foi adotado a técnica de fio embebido em óleo, ou seja, despeja-se óleo sobre um fio aquecido eletricamente. O óleo empregado foi a glicerina por formar uma fumaça (traçador) mais densa do que a parafina.

Figura 3. Corpo de prova, Ford Corcel I, em escala 1:43



Foi utilizado duas luzes brancas contínuas de 70 W cada, posicionadas na parte superior da seção de testes, para realizar a iluminação do escoamento. Para o registro fotográfico utilizou-se uma câmera EOS 6D (Canon), uma lente fixa macro EF 100 mm 1:2.8 L IS USM (Canon), um disparador remoto, para não perturbar a captura da imagem e um tripé para apoiar a câmera. A configuração da parte experimental pode ser vista na (fig.4).

Figura 4. Configuração experimental



O ISO da câmera foi ajustado para o valor de 12800, o diafragma em  $f/2.0$  e o tempo de exposição em  $1/2000$  segundo. Esse período de captura, foi extremamente importante para que fosse possível congelar a imagem para que não ficasse com o aspecto borrado de sobreposição do escoamento. Com isso foi possível ter uma visualização do comportamento das linhas de corrente sobre o objeto estudado. O experimento foi realizado com uma velocidade média de  $1 \text{ m/s}$  ( $Re = 1800$ ). O plano focal da imagem foi ajustado para coincidir com o plano central do corpo de prova.

### 3. RESULTADO E DISCUSSÃO

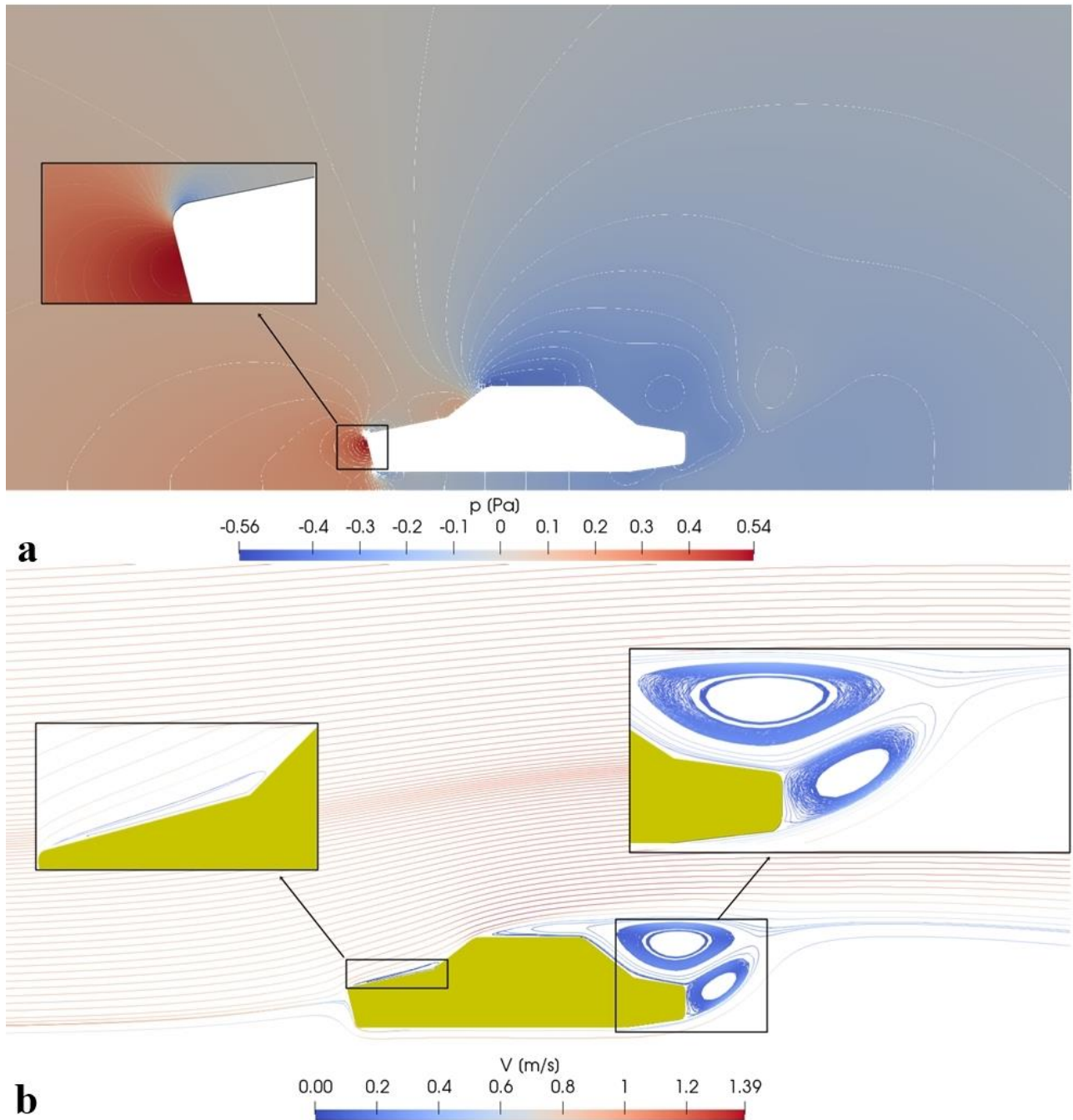
Os campos de velocidades e pressões são apresentados para os Números de Reynolds de 1800 e 18000 (fig. 5 e 6), no instante de 1 s. Pode-se notar que, quando o escoamento atinge o veículo, nos dois casos, ele se divide em dois caminhos: um pela parte superior (trajeto A) e outro pela parte inferior (trajeto B) do veículo. O ponto de incidência do escoamento no corpo de prova, onde, o fluido não segue nem a trajetória A nem a B, é chamado de ponto de estagnação. O ponto de estagnação se situa na face frontal, próximo a aresta superior (Fig. 5a e 6a). A estreita região do escoamento, entre a entrada e o ponto de estagnação é chamada de escoamento retardado (Zdravkovich, 1997), onde toda a energia cinética do escoamento na entrada é convertida em pressão no ponto de estagnação.

No trajeto A, pode-se notar (fig. 5b e 6b), que no começo do capô há um descolamento da camada limite, e isso gera uma região de recirculação de ar sobre o capô. Para  $Re = 1800$ , a região de recirculação se estende até o para-brisa, enquanto para  $Re = 18000$  o recolamento da camada limite ocorre ainda no próprio capô. Assim, para  $Re$  na ordem de 1800, é prevista em grande região de recirculação em cima do capô com recolamento da camada limite apenas no vidro frontal.

No vidro frontal, o escoamento se desenvolve até a aresta superior, divisão entre o vidro e o teto. Nesta aresta, é observado um novo descolamento da camada limite para ambos os Números de Reynolds.

Após descolamento da camada limite no início da região do domínio referente ao teto do veículo, comportamento distintos são observados para  $Re = 1800$  e  $Re = 18000$ . Em função da maior relevância das forças inerciais para  $Re = 18000$ , o recolamento da camada limite acontece logo após o descolamento. O escoamento se desenvolve ao longo do teto até o seu final, onde volta a descolar. Para  $Re = 1800$ , o escoamento não volta a recolar no teto, gerando bolhas de recirculação mais largas na região posterior do veículo.

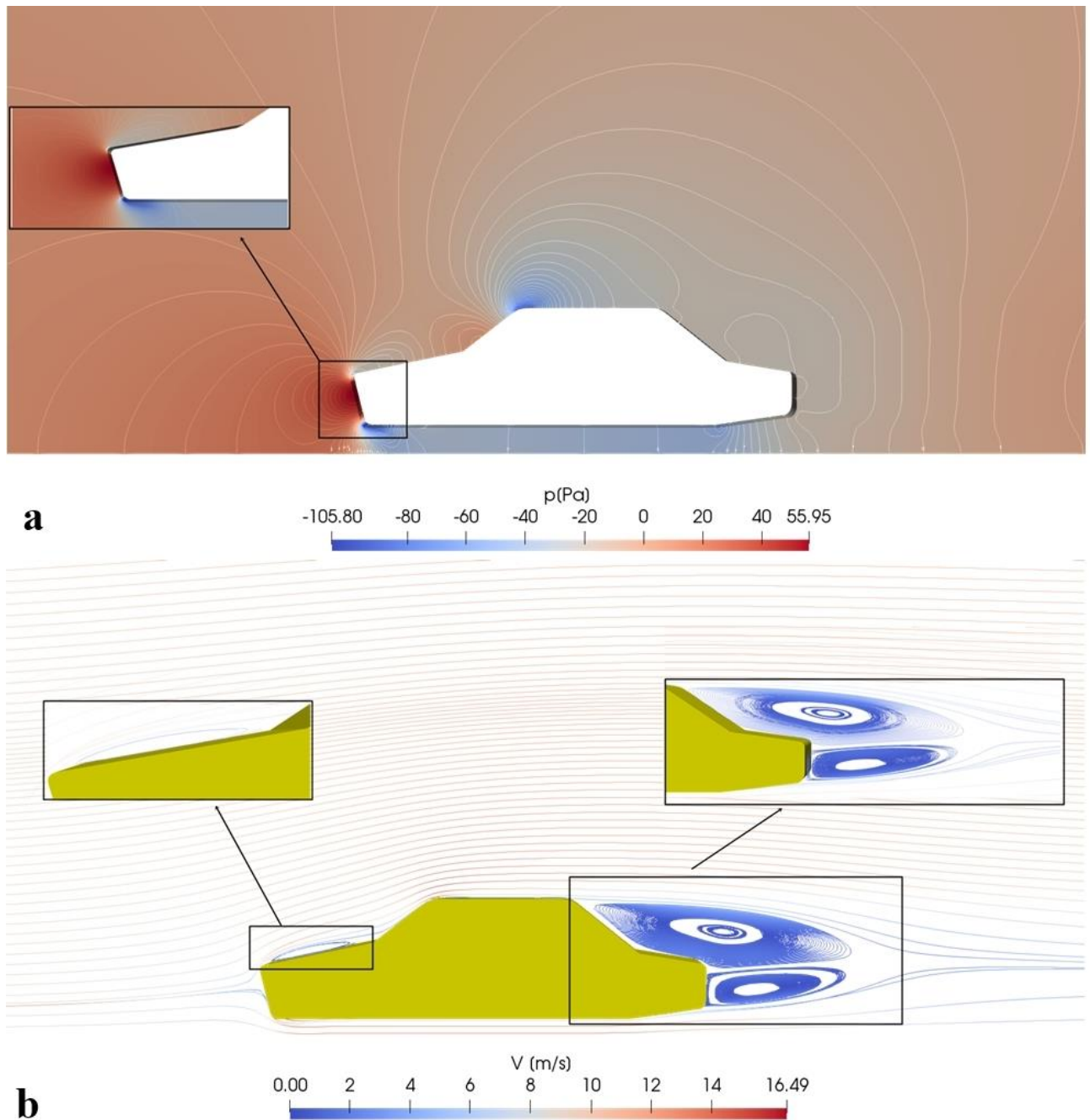
Figura 5.  $Re = 1800$  a) Pressão b) Velocidade



No trajeto B, o escoamento na porção inferior se desloca na aresta entre a face frontal e a base. Ele se desenvolve como o escoamento em dutos durante toda a base, independente do  $Re$ , estudado. No rebaixo posterior, para  $Re = 1800$  observa-se a formação de uma região de recirculação com recolamento da camada limite ainda no rebaixo posterior com subsequente descolamento na aresta entre o rebaixo e a face posterior. Esta região de recirculação é menos evidente para  $Re = 18000$ .

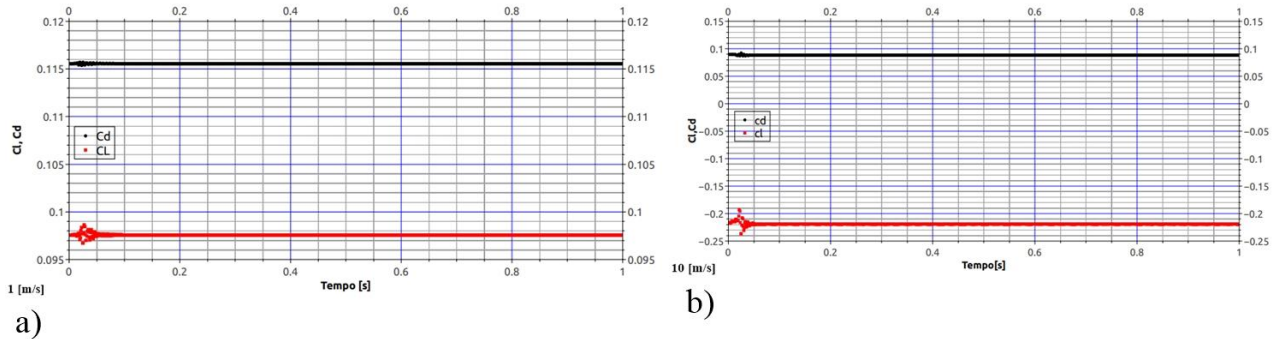
Os escoamentos provenientes dos trajetos A e B se reencontram, após as duas bolhas contra rotativas formadas logo na região posterior do corpo de prova, no então chamado ponto de confluência (Zdravkovich, 1997). As bolhas de recirculação para  $Re = 1800$  são mais largas e mais curtas enquanto, para  $Re = 18000$ , elas são mais achatadas

Figura 6.  $Re = 18000$  a) Pressão b) Velocidade



Com base da (Eq.2), foi feito o gráfico dos coeficientes de sustentação e de arrasto pelo tempo (Fig. 9). Pode-se notar que os valores dos coeficientes são proporcionalmente baixos, pois na análise foi usada uma velocidade relativamente pequena. Visto que na Eq. 2 a velocidade é ao quadrado, esta variável tem muita influência no resultado, assim como a área de referência (em escala). Por estes motivos, os coeficientes são baixos. Observa-se que não foi constatada a emissão de vórtices nas esteiras e que não há uma periodicidade no sinal. Assim, este escoamento pode ser considerado como quase-estático.

Figura 9. Gráficos  $C_l$  e  $C_d$  a)  $Re=1800$  b)  $Re=18000$



Após a filtragem das melhores imagens, levando em conta contraste ou influência externa, foi selecionada a foto que continha mais informações relevantes para a confrontação com o modelo numérico bidimensional. Pode-se notar na (Fig.10.), que há uma divisão do escoamento no começo do veículo e também se tem a região retardada, com o ponto de estagnação assim como na modelagem numérica. É notado que os pontos de descolamento e recolagem da camada limite, junto com as regiões de recirculação também são iguais a modelagem numérica.

Figura 10. Linhas de corrente feita com fumaça (traçador) no método experimental.



#### 4. CONCLUSÃO

Evidencia-se boa relação, do ponto de vista qualitativo, entre os ensaios numéricos e experimentais, como nos pontos de descolamento da camada limite e recolamento, também podemos notar as bolhas de ar formadas na esteira. Qualitativamente, o modelo numérico mostrou consistência do ponto de vista físico. Os efeitos tridimensionais são importantes e devem ser explorados em trabalhos futuros.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao suporte técnico prestado pelo colaborador Evandro Fernandes de Melo na montagem do experimento. Adicionalmente, os agradecimentos também são dirigidos a UFGD, que forneceu os instrumentos de medição e a utilização do laboratório para a realização dos experimentos.

## 6. REFERÊNCIAS

- Ahmed, S.R., Ramm, G. and Faltin, G., 1984. "Some Salient Features Of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake".
- Aljure, D. E., Calafell, J., Baez, A., & Oliva, A. (2018). Flow over a realistic car model: Wall modeled large eddy simulations assessment and unsteady effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 174, 225-240.
- Aljure, D. E., Lehmkuhl, O., Rodríguez, I., & Oliva, A. (2014). Flow and turbulent structures around simplified car models. *Computers & Fluids*, 96, 122-135.
- Bruneau, C. H., Creusé, E., Gilliéron, P., & Mortazavi, I. (2014). Effect of the vortex dynamics on the drag coefficient of a square back Ahmed body: Application to the flow control. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 45, 1-11.
- Gulyás, A., Bodor, Á., Regert, T., & Jánosi, I. M. (2013). PIV measurement of the flow past a generic car body with wheels at LES applicable Reynolds number. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 43, 220-232.
- Hanfeng, W., Yu, Z., Chao, Z., & Xuhui, H. (2016). Aerodynamic drag reduction of an Ahmed body based on deflectors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 148, 34-44.
- Rao, A., Minelli, G., Basara, B., & Krajnović, S. (2018). On the two flow states in the wake of a hatchback Ahmed body. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 173, 262-278.
- Vino, G., Watkins, S., Mousley, P., Watmuff, J., & Prasad, S. (2005). Flow structures in the near-wake of the Ahmed model. *Journal of fluids and structures*, 20(5), 673-695.
- Zdravkovich, Momchilo M. "Flow around circular cylinders." *Fundamentals* 1 (1997): 566-571.

## 7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.