UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Faculdade de Engenharia

Modelação Numérica da Aerodinâmica de um Veículo de Alto Desempenho e o seu Ensaio Real em Pista

Nelson André Mota Mendes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Electromecânica

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor José Carlos Páscoa Marques

Covilhã, Outubro de 2011

Agradecimentos

A realização desta Dissertação de Mestrado só foi possível graças à colaboração e ao contributo de várias pessoas, às quais gostaria de dirigir algumas palavras de agradecimento e reconhecimento.

Em particular, gostaria de expressar o meu mais profundo agradecimento ao Professor Doutor José Carlos Páscoa Marques. Um verdadeiro Professor pelo seu profissionalismo e dedicação aos alunos e à instituição. Pelo tempo que generosamente me dedicou, transmitindo-me os melhores e mais úteis ensinamentos, com paciência, dedicação e confiança. Pelo acesso que me facilitou a uma pesquisa mais alargada e enriquecedora, pela sua crítica sempre tão atempada, como construtiva, um grande bem-haja estou-lhe muito grato.

À restante equipa UBIAN nomeadamente, aos Professores Fernando Santos, Francisco Brójo, Paulo Fael e também alunos e amigos Francisco Navio, Tiago Carrola, Bruno Pontes e Nuno Rodrigues.

O autor agradece ao Responsável pela Equipa UBIAN, Prof. Dr. Fernando Santos, a permissão concedida para usar os dados experimentais do ensaio em pista, obtidos no âmbito de um programa de ensaios mais extenso conduzido pela equipa da Shell-Eco-Marathon da UBI.

Um agradecimento especial à minha mãe, ao meu pai, à Sofia, restantes familiares e amigos que sempre me apoiaram e acreditaram em mim durante o meu percurso académico.

Resumo

A modelação numérica de veículos terrestres de alta-performance, a baixos números de Reynolds, sofre de uma falta de precisão normalmente associada ao uso dos modelos numéricos neste regime de escoamento. Assim, a modelação computacional do escoamento em torno de veículos neste regime necessita de uma cuidadosa verificação experimental. Por outro lado o ensaio experimental com recurso a modelos à escala introduz dificuldades significativas, de modo a garantir as condições de semelhança dinâmica, pelo que em alternativa podem fazer-se cuidadosamente ensaios à escala real em pista.

Neste trabalho modelamos numericamente o escoamento em torno do corpo simplificado de Ahmed e do veículo UBIAN10. Este veículo participou em 2010 na competição Shell Eco-marathon Europe em representação da Universidade da Beira Interior, que decorreu em Leipzig, na Alemanha.

O cálculo do escoamento em torno do corpo de Ahmed permite analisar a influência da malha, e do tipo de modelo de turbulência, nos resultados obtidos quando comparados com os valores experimentais e numéricos disponíveis na literatura. Além dos coeficientes aerodinâmicos foi ainda feito um estudo sobre a estrutura do escoamento, em particular sobre a geração de vórtices que ocorre na esteira do corpo de Ahmed. A modelação numérica do UBIAN10 compreendeu um extenso trabalho de geração de malhas que, de forma iterativa, permitiu aferir da sua boa qualidade. Em particular, em termos da skewness e da garantia do y+ junto das fronteiras sólidas. Além do cálculo dos coeficientes aerodinâmicos foi também feita uma análise à estrutura do escoamento para três configurações diferentes do UBIAN10.

O veículo UBIAN10 foi objecto de um ensaio experimental em pista. Este estudo faz parte de um conjunto de ensaios experimentais mais extensos que têm sido desenvolvidos pela equipa do UBIAN10. O ensaio em pista permitiu concluir que os resultados da modelação computacional tinham uma boa precisão. Com base no conhecimento do escoamento em torno do UBIAN foi possível redesenhar o veículo tendo vista melhorar o seu desempenho aerodinâmico.

Palavras-chave

Modelação numérica, modelação experimental, mecânica dos fluidos computacional, Shell Eco-Marathon Europe, aerodinâmica de veículos

Abstract

The numerical modeling of high performance ground vehicles, at low Reynolds numbers, suffers from a lack of precision usually associated with the use of numerical models in this flow regime. Thus, the computational modeling of the flow around vehicles in this regime requires a careful experimental verification. On the other hand, the experimental testing using scaled models introduces significant difficulties, this in order to ensure the conditions of dynamic similarity, in alternative full scale tests can be done on track.

In this work we modeled numerically the flow around the simplified Ahmed body and on the UBIAN10 vehicle. This vehicle participated on the 2010 *Shell Eco-marathon Europe* competition on behalf of University of Beira Interior, held in Leipzig, Germany.

The computation of the flow around the Ahmed body allows to analyze the influence of the mesh, and of the type of turbulence model, on the results as compared with available experimental and numerical values in the literature. In addition to the aerodynamic coefficients a study was done on the structure of the flow, in particular on the generation of vortices that occurs in the wake of the Ahmed body. The numerical modeling of UBIAN10 comprised an extensive work of mesh generation that, in an iterative way, allowed the assessment of their quality. In particular, in terms of skewness and ensuring an adequate $y+$ near solid boundaries. In addition to the computation of the aerodynamic coefficients an analysis of the flow structure was also made for three different configurations of UBIAN10.

The UBIAN10 vehicle was subject to an experimental test on the track. This study was a component of a more extensive experimental testing programme developed by UBIAN Team. The track test concluded that the results obtained using computational modeling had a good accuracy. Based on the knowledge of the flow around the UBIAN it was possible to redesign the vehicle in order to improve its aerodynamic performance.

Keywords

Numerical modeling, experimental modeling, computational fluid dynamics, Shell Eco-Marathon Europe, vehicle aerodynamics

Índice

Índice V
Lista de Figuras VIII
Lista de Tabelas XII
Lista de Acrónimos XIII
Lista de Símbolos XIII
Capítulo 1 1
Introdução 1
1. Aerodinâmica de veículos - evolução histórica 1
1.1. Considerações sobre o escoamento em torno de veículos terrestres 3
1.2. Considerações sobre as forças de resistência que actuam nos veículos terrestres 5
1.2.1. Resistência aerodinâmica 5
1.2.2. Resistência viscosa na superfície de veículos 6
1.2.3. Resistência de pressão em veículos terrestres 6
1.2.4. Efeitos da resistência induzida em veículos terrestres 7
1.2.5. Aspectos relacionados com a resistência de rolamento 8
1.2.6. Efeito da inclinação da estrada 8
1.2.7. Força de aceleração ou desaceleração do veículo 9
1.3. Veículos de alto desempenho – o caso Shell Eco-Marathon 9
1.4. Métodos experimentais e numéricos 9
1.4.1. Testes Experimentais 9
1.4.1.1. Testes em túnel de vento 8
1.4.1.2. Testes em pista 8
1.4.2. Modelação computacional do escoamento em torno de veículos terrestres 9
Capítulo 2 11
Revisão Bibliográfica 11
2.1. Modelação do escoamento no corpo de Ahmed 11
2.2. Modelos experimentais 11
2.3. Modelos Computacionais 13
2.3.1. Modelos RANS 13
2.3.2. Modelos DES e LES 15
2.4. Modelação do escoamento em veículos de baixo consumo 17
Capítulo 3 19
Modelação computacional 19
3.1. Equações de governo 19

3.2. Modelação da turbulência 20
3.2.1. Modelo de turbulência *Standard k-ε* 21
3.2.2. Modelo de turbulência *Realisable k-ε* 21
3.2.3. Modelo de turbulência *Standard k-ω* 22
3.2.4. Modelo de turbulência *k-ω SST* 22
3.2.5. Modelo de turbulência *Spalart-Allmaras* 22
3.2.6. Modelo de turbulência *Reynolds Stress Model (RSM)* 23
3.2.7. Detached-Eddy Simulation (DES) 24
3.2.8. Large-Eddy Simulation (LES) 24
3.3. Condições de fronteira 24
3.4. Funções de parede utilizadas no cálculo 25
3.4.1. Funções de parede Standard 25
3.4.2. Funções de parede de não-equilíbrio 26
3.4.3. O *Enhanced Wall Treatment* 26
Capítulo 4 27
Cálculo do escoamento no corpo de Ahmed 27
4.1. Descrição da geometria em estudo 27
4.2. Descrição do escoamento em torno do corpo de Ahmed 28
$0 < \alpha < 12.5º$ 28
$12.5º < \alpha < 30º$ 29
$\alpha > 30º$ 29
4.3. Criação de malhas para o modelo computacional 30
4.3.1. Criação da malha não-estruturada 30
4.3.2. Utilização da malha estruturada 32
4.3.3. Qualidade da malha 35
4.4. Condições de fronteira 38
4.5. Resultados em RANS 40
4.5.1. Resultados obtidos com o modelo de turbulência $k - \omega\ SST$ 41
4.5.1.1. Comparação dos resultados das malhas A e D com os resultados de Ahmed e Ramm (1984) 41
4.5.1.2. Comparação entre resultados obtidos com as várias malhas e diferentes $\boldsymbol{Cd}$ para 30 m/s 42
4.5.1.3. Comparação dos resultados numéricos com os experimentais de Gilliéron et al. (2010) 43
4.5.1.4. Influência da qualidade das malhas na previsão dos resultados 45
4.5.1.5. Comparação entre os resultados numéricos e os valores de Lienhart e Becker (2002) 46
4.5.1.6. Comparação entre os resultados numéricos e os valores experimentais de Strachan et al. (2004) 49

4.5.2. Comparação entre os valores obtidos por Lienhart e Becker (2002) e os valores numéricos usando o RSM 49
4.5.3. Resultados obtidos com o modelo de turbulência $Spalart - Allmaras$ 51
4.6. Resultados em URANS 51
4.7. Resultados numéricos obtidos usando DES 52
4.8. Eficiência computacional – cálculo em paralelo 53
4.9. Comparação dos resultados obtidos para os vários modelos de turbulência 54
4.10. Previsão dos vórtices na traseira do veículo 57
4.11. Visualização do escoamento na geometria do corpo de Ahmed 57
Capítulo 5 60
Modelação do escoamento no veículo UBIAN10 60
5.1. Ensaio experimental e apresentação da geometria do UBIAN10 60
5.2. Criação da malha para modelar computacionalmente o UBIAN10 65
5.3. Criação dos blocos da malha para o UBIAN10 70
5.4. Imposição de condições fronteira no modelo numérico do UBIAN10 72
5.5. Resultados numéricos obtidos para o UBIAN1O 73
5.6. Comparação entre os ensaios experimentais e os cálculos numéricos 80
5.7. Análise crítica sobre a diferença entre resultados numéricos e experimentais 81
5.8. Efeito da rugosidade em superfícies 82
Capítulo 6 84
Conclusões 84
6.1. Modelos do escoamento em torno do corpo de Ahmed 84
6.2. Modelação numérica e experimental do veículo Eco-Marathon 85
6.3. Proposta de trabalhos futuros 85
Bibliografia 88
Anexo A - Trabalho Publicado 91

Lista de Figuras

Fig. 1 – Evolução do coeficiente de resistência em veículos ou automóveis (White, 1998). 3

Fig. 2 – Forças aerodinâmicas num veículo em ambiente real, mostrando as relações entre a velocidade do veículo, a velocidade (absoluta) do vento e a velocidade relativa (Stone, 1989). 4

Fig. 3 – Desenvolvimento e separação da camada limite (E.L. Houghton, 1993). 6

Fig. 4 – Escoamento na esteira de um *hatchback* e *squareback* (Hucho, 1998). O modelo na direita tem uma grande região de esteira, é possível observar que o escoamento se separa logo no topo da inclinação da traseira. 7

Fig. 5 – Geração de vórtices em torno de um veículo de passageiros (Hucho, 1998). 8

Fig. 6 – As várias forças que actuam num veículo em movimento. 9

Fig. 7 – Prototype e UrbanConcept da Universidade de Chalmers (Chalmers, 2010b, Chalmers, 2010a).....9

Fig. 8 – Modelo do comportamento da estrutura do escoamento proposto por Morel (1978). . 12

Fig. 9 – Volume de controlo "*i*", com os elementos que o rodeiam (E.L. Houghton, 1993). ... 20

Fig. 10 – Geometria do corpo de Ahmed com indicação das dimensões do corpo (S.R. Ahmed, 1984). 28

Fig. 11 – Diagrama esquemático do sistema de vórtices na esteira do modelo Ahmed (S.R. Ahmed, 1984). 32

Fig. 12 – Definem-se a branco, as linhas dos 21 blocos junto ao corpo de Ahmed, o 22º bloco vai englobar as faces exteriores destes blocos e as faces da caixa externa, não visível na figura. 33

Fig. 13 – Malha estruturada refinada junto ao corpo de Ahmed e malha não estruturada refinada na zona exterior. 34

Fig. 14 – Detalhe da traseira inclinada do corpo de Ahmed onde se pode observar a malha estruturada dos blocos internos e a malha não-estruturada do bloco exterior. 34

Fig. 15 – Distribuição do y^+ no corpo de Ahmed para a malha de 4 681 419 nós, representada na Fig. 14 e Fig. 15. 35

Fig. 16 – A malha D (com quatro blocos) está mais refinada junto ao corpo de Ahmed do que a malha A (um bloco). 36

Fig. 17 – Representação da malha A composta por 1 185 028 nós e 1 bloco. 36

Fig. 18 – Representação da malha D composta por 150 956 nós e 4 blocos. 37

Fig. 19 – Exemplo de um elemento uniforme que deve ser usado na geração da malha nos domínios. 38

Fig. 20 – Exemplo do processo de análise da distribuição do y^+ num caso de teste. 38

Fig. 21 – Dimensões da caixa ou domínio computacional que envolve o corpo. Note-se a proporção entre as dimensões que aqui são representadas à escala. 39

Fig. 22 – Evolução da redução do numero de nós da malha em funçao do coeficiente de resistencia (*Cd*). 43

Fig. 23 – Localização das tomadas de pressão estática na zona inclinada do carro (Patrick Gilliéron, 2010)..... 43

Fig. 24 – Distribuição da pressão no corpo de Ahmed, obtido usando o modelo de turbulência *k-ω SST* e a malha D. 44

Fig. 25 – Comparação entre os resultados numéricos usando o modelo de turbulência *k-ω SST* e a malha D, com os resultados publicados por Gilliéron et al. (2010). 44

Fig. 26 – Confrontação entre resultados experimentais e resultados numericos obtidos. A linha preta representa os valores experimentais obtidos por Gilliéron et al. (2010) e os quadrados representam os valores obtidos numericamente para as mesmas condições. 45

Fig. 27 – Demonstração da influência das malhas usadas no cálculo numérico no resultado do coeficiente de pressão e com os dados publicados por Gilliéron et al. (2010). 46

Fig. 28 – Planos de corte onde foram colhidos os dados experimentais atrás do corpo de Ahmed, a x=0, x=80, x=200 e x=500 (H. Lienhart, 2002). 47

Fig. 29 – Comparação entre os dados experimentais, publicados por Lienhart e Becker (2002), e os resultados obtidos numericamente. Os resultados numéricos foram obtidos com o modelo de turbulência *k-ω SST* e usando a malha D. 48

Fig. 30 – Na imagem da esquerda apresentam-se os valores para a distribuição da componente vertical da velocidade publicada em Strachan et al.(2004) e, na imagem da direita, a obtida no nosso cálculo numérico. 49

Fig. 31 – Comparação entre resultados experimentais de Lienhart e Becker (2002) e os resultados numéricos obtidos usando o modelo Reynolds Stress e a malha D. 50

Fig. 32 – Evolução do coeficiente de resistência ao longo do tempo. 52

Fig. 33 – Ensaio com o modelo *DES S-A em comparação com o k-ω SST estacionário.* 53

Fig. 34 - Ensaio com o modelo *DES k-ω SST em comparação com o k-ω SST estacionário.* 53

Fig. 35 – Eficiência computacional do cálculo em paralelo. 54

Fig. 36 – Contornos da energia cinética turbulenta, *k*, ao longo do plano longitudinal do corpo de Ahmed. As simulações numéricas obtidas prevêem uma maior área da turbulência que o caso experimental. 58

Fig. 37 – Energia cinetica turbulenta na traseira do corpo de Ahmed..... 58

Fig. 38 – Tubo de corrente que origina os vórtices laterais. O escoamento vem colado junto ao corpo de Ahmed e assim que chega à zona inclinada geram-se dois vórtices. Note-se que os dois tubos de corrente foram colhidos na origem em pontos ligeiramente diferentes, pelo que não são simétricos. 59

Fig. 39 – Resultados obtidos usando o modelo turbulência *k-ω SST* . Pode-se constatar que o modelo conseguiu prever os três vórtices descoberto experimentalmente por Ahmed (1984). 59

Fig. 40 – Veículo UBIAN10. As zonas que poderiam afectar mais o escoamento eram a parte frontal, os canais junto das rodas da frente e a lateral côncava. 61

Fig. 41 – Nesta figura temos: adaptação da célula de carga com capacidade de 50N de uma balança comercial em a), e célula de carga aplicada na frente do veículo em b) e c). 62

Fig. 42 – *Picoscope* utilizado nas medições, este tem entradas analógicas e uma saída USB que liga ao computador portátil. 63

Fig. 43 – Roda com os quatro magnetos. 63

Fig. 44 – Gráfico das medições da força obtidas com a célula de carga e com o sensor de velocidade. Pode-se observar o patamar de velocidade e força constante como pretendido. 64

Fig. 45 – Representação esquemática onde é possível observar a estratégia idealizada para poder efectuar as medições necessárias. Este conjunto era composto por um veículo que traccionava o UBIAN10 (com ou sem escudo), por meio de um cabo de tracção. 64

Fig. 46 – O veículo UBIAN10 é traccionado através de um cabo com uma célula de carga aplicada na frente do veículo. Traccionou-se o veículo com e sem escudo, de modo a obter a resistência aerodinâmica. Podemos observar o UBIAN10 com o escudo (em a) e b)) e o UBIAN10 sem escudo com o veículo de tracção (em c)). 65

Fig. 47 – Quando se importava a *database* do *software Rhinoceros* para o *Pointwise*, esta surgia com vários conectores sobrepostos que só eram detectados quando se ampliava a geometria. 66

Fig. 48 – Zonas problemáticas na geração dos domínios. O facto de os domínios terem conectores em comum dificultava a tarefa da distribuição de pontos. 67

Fig. 49 – Na imagem da cima temos a parte frontal do veículo com o pormenor da malha no canal. Na imagem de baixo temos o fundo veículo, junto às cavas das rodas. 68

Fig. 50 – Pormenor das zonas problemáticas do UBIAN10. Podem-se observar irregularidades na malha, malhas com conectores em comum e falhas na malha. 69

Fig. 51 – Parte frontal do veículo onde se colocou uma malha a tapar os canais (a amarelo e cinzento). Foi deixado um canal aberto e outro fechado para ajudar na visualização, mas no caso calculado estão os dois fechados. 70

Fig. 52 - Pormenor de um dos blocos da frente do veículo. As setas brancas referem-se à linha do veículo. As setas amarelas mostram os conectores que ligam o veículo ao solo. Uma forma de isolar os problemas durante a geração da malha e blocos foi dividir o veículo por zonas, nesta zona observa-se o bloco que inclui a cava da roda e a roda do carro. 71

Fig. 53 – No caso das rodas traseiras o cubo da roda saía da geometria, pelo que teve de se usar um domínio extra (imagem de cima), isto permitiu que houvesse espaço para gerar o bloco sem intersecções entre blocos. 72

Fig. 54 – Diagrama da *rotational Wall* com velocidade relativa. Esta condição de fronteira impõe no pneu a rotação a uma velocidade angular, e é centrada no eixo da roda, permitindo assim observar a interacção do escoamento nas rodas, bem como o comportamento destas dentro da cava das rodas. 73

Fig. 55 – Configuração da rede aplicada nos canais do UBIAN10 e modelo numérico com a rede. 75

Fig. 56 - Distribuição da velocidade e linhas de corrente. Pode-se observar que há uma zona de estagnação na parte frontal do veículo e dois vórtices na traseira do veículo. 75

Fig. 57 - Vista lateral e de topo do UBIAN10, onde se destacam a azul os novos vórtices na lateral do veículo, criados pelo bloqueio dos canais. A escala refere-se à distribuição da pressão no escoamento. Em a) canais abertos, b) com redes e c) canais fechados. 76

Fig. 58 - Escoamento no veículo UBIAN10 com os canais abertos a-); escoamento calculado com as redes nos canais b-); escoamento calculado com os canais fechados c-). Na imagem d-) temos o pormenor dos vórtices na traseira do veículo e apresentamos como modelo de referência o corpo de Ahmed. A escala refere-se à distribuição da pressão no escoamento. . 77

Fig. 59 – Distribuição da energia cinética turbulenta libertada pelo veículo. 78

Fig. 60 – Escoamento no veículo UBIAN10 calculado com os canais abertos a-); Escoamento calculado com as redes nos canais b-); Escoamento calculado com os canais fechados c-). Há um aumento da área de estagnação na parte frontal do veículo. 79

Fig. 61 – A imagem a) mostra uma roda em rotação e a imagem b) mostra uma roda estática. A escala colorida é o módulo da velocidade. 81

Fig. 62 – Processo de construção do novo carro. Foi reutilizado o chassis em carbono do carro antigo e a sua carcaça serviu de molde à nova carcaça. Estrutura interior (a)) e carcaça UBIAN10 (b)). 86

Fig. 63 –Correcção e fibragem do molde do UBIAN11 86

Fig. 64 – No novo carro houve duas zonas principais que foram alteradas: a zona frontal e as laterais do veículo. A inclinação da frente, os canais e as laterais foram alteradas de modo a que o carro pudesse vir a apresentar um melhor desempenho aerodinâmico. 86

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Malhas desenvolvidas para modelar o corpo de Ahmed. 35

Tabela 2 – Comparação entre os resultados obtidos para a Malha A e Malha D em relação a valores experimentais..... 41

Tabela 3 – Resultados dos testes aos vários tipos de malha calculados com o modelo *k-ω SST* para uma velocidade 30 m/s..... 42

Tabela 4 – Resultados obtidos com o modelo de turbulência de *Spalart-Allmaras* para as duas malhas e comparação com os valores de Kapadia et al. (2003). Para Ahmed (1984) $Re=4,29x10^6$ e para Kapadia et al. (2003) $Re=2,86x10^6$. 51

Tabela 5 – Ensaios numéricos para diferentes modelos numéricos para a velocidade de 40 m/s. 55

Tabela 6 – Ensaios para 30 m/s..... 56

Tabela 7 – Comparação dos dois ensaios numéricos para a mesma configuração, mas com diferente configuração nas rodas. 81

Tabela 8 – Comparação do ensaio experimental e numérico para as mesmas configurações. . 81

Tabela 9 - Coeficientes de resistência para as diferentes configurações do UBIAN10. O desvio reporta a diferença dos três tipos ensaios para a mesma configuração. 81

Tabela 10 – Ensaio dos casos com e sem rugosidade superficial 83

Lista de Acrónimos

CAE Computer Aided Engineering.

CFD Computational Fluid Dynamics.

DES Detached Eddy Simulation.

LDA Laser Doppler Anemometry.

LES Large Eddy Simulation.

PIV Particle Image Velocimetry.

$RANS$ Reynolds-Averaged Navier-Stokes.

RNG Re-Normalization Group.

RSM Reynolds Stress Model.

SST Shear Stress Transport.

SUV Sport Utility Vehicle.

$URANS$ Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes.

Lista de Símbolos

A Área de secção.

Cd Coeficiente de resistência.

Cl Coeficiente de sustentação.

Cp Coeficiente de pressão.

Cd_p Coeficiente de resistência de pressão.

Cd_v Coeficiente de resistência viscosa.

Cr Constante de atrito de rolamento.

D Força de resistência.

F Força.

$Facc$ Força de aceleração.

Fc Força devido a inclinação da estrada.

Fg Força de resistência devida.

Fr Força de resistência de rolamento.

Ft Força de tracção.

I Intensidade da turbulência.

L Força de sustentação.

Re Número de Reynolds.

V Velocidade.

g Aceleração da gravidade.

k Energia cinética turbulenta.

kp Energia cinética turbulenta.

l Escala de comprimento da turbulência.

m Massa.

$u, v\ e\ w$ Componentes em x, y e z do vector de velocidade.

α Ângulo da traseira do corpo de Ahmed.

β Ângulo de incidência.

ε Taxa de dissipação turbulenta.

ρ Massa específica.

σ_k Número de Prandtl para k.

σ_ε Número de Prandtl para ε.

μ Viscosidade dinâmica ou absoluta.

μ_t Viscosidade turbulenta.

ν Viscosidade cinemática ou relativa.

ω Taxa de dissipação específica.

y^+ Distância adimensional ao primeiro ponto da malha.

y_p Distância do no P à parede standard.

Capítulo 1

Introdução

O problema da poupança de energia é, actualmente, cada vez mais importante. Um dos campos em que há uma maior investigação sobre a redução dos consumos é na área da mobilidade. De facto, a redução do dispêndio energético nos veículos é um objectivo de muitos países e fabricantes de automóveis. A problemática da poupança de energia é cada vez mais sentida na sociedade. Têm sido feitos estudos, em diferentes áreas, para alcançar reduções nos consumos energéticos e conseguir uma compatibilidade entre as solicitações das novas tecnologias e o ambiente. Uma das possibilidades mais interessantes, com vista a reduzir os consumos energéticos e a poluição inerente, é o desenvolvimento de veículos terrestres, com baixo consumos de combustível. De facto, os veículos terrestres são um dos principais causadores da poluição. A redução da pegada ecológica dos veículos terrestres pode ser conseguida com o seu projecto optimizado. Uma das componentes a considerar nesse projecto é a aerodinâmica.

1. Aerodinâmica de veículos - evolução histórica

A concepção aerodinâmica é um dos principais elementos que têm contribuído para a evolução do desempenho dos veículos terrestres. A definição do desempenho dos veículos específicos de competição, deslocando-se em pista, ou dos veículos comerciais que andam em estrada depende de vários elementos. De entre eles destaca-se o motor, os pneus, a suspensão, o tipo de estrada, o comportamento aerodinâmico e, claro, o desempenho do condutor. A aerodinâmica automóvel tem ganho bastante popularidade no domínio dos veículos de competição, principalmente devido à utilização do designado conceito de *downforce* que tem estado associado a melhorias de desempenho significativas.

Nesta secção explicamos brevemente a importância da aerodinâmica em veículos terrestres e também a sua contribuição para as melhorias de desempenho que vêm sendo conseguidas. Atendendo à geometria complexa destes veículos, a interacção aerodinâmica entre os seus vários componentes é significativa, resultando na formação de vórtices que prejudicam o seu desempenho. Portanto, as técnicas de análise do escoamento em torno de veículos tais como, testes em túneis de vento, testes em pista, ou ainda usando a dinâmica dos fluidos computacional (CFD), constituem elementos importantes para o desenvolvimento e melhoria do projecto destes veículos.

As corridas de automóveis surgiram, e popularizaram-se, no início do século XX. A partir dessas competições iniciais este desporto cresceu de forma consistente, nem sempre seguindo as tendências de evolução da indústria automóvel de massas. Se observarmos os carros de competição contemporâneos podemos encontrar componentes, como sejam as asas invertidas e outros elementos aerodinâmicos com ângulos que se tornam pouco práticos, e por isso, inutilizáveis na indústria automóvel comercial. Em todas as formas de competição automóvel, o factor aerodinâmico tem sido considerado um factor importante para a concepção dos veículos. Ao longo dos últimos cem anos de existência do automóvel todos os veículos têm sempre apresentado elementos que contribuem para uma melhoria de desempenho aerodinâmico. Mas apesar de os fundamentos da aerodinâmica terem sido formulados há mais de duzentos anos, nem todos os seus princípios foram de utilização imediata na concepção de automóveis. Naturalmente, o desejo em obter uma baixa resistência aerodinâmica foi investigado, em Hucho (1998) descreve-se um dos primeiros carros a ser analisado aerodinamicamente de modo a ultrapassar a barreira dos 100 km/h. Este referia-se a um carro de corrida eléctrico que tinha um corpo cilíndrico, afunilado na frente e na traseira, com o objectivo de reduzir a resistência aerodinâmica. Com o rápido desenvolvimento da indústria automóvel, no início do século XX, surgiu um dos projectos mais significativo daquela época: o 1924 Tropfenwagen ("forma de gota" em alemão) (Hucho, 1998). A forma deste automóvel é dominada pelo perfil alar (particularmente visto de cima) e os testes recentes num túnel de vento da Volkswagen mostraram que o coeficiente de resistência é de 0,28, o que é um bom resultado mesmo pelos padrões actuais. Apenas quatro anos depois, já em 1929, um carro de competição da Opel foi construído a partir da estrutura de um foguete, sendo foi o primeiro a tentar usar asas na sua geometria. Estas asas prolongavam-se em ambos os lados do carro e eram orientadas num ângulo de ataque negativo de modo a criar *downforce*. Esta grande inovação foi completamente ignorada e demorou mais 36 anos para que os projectistas compreendessem e aplicassem este princípio. Finalmente, a ideia ressurgiu na forma do Chaparral 2C em 1965 (Richard Falconer, 1992). Este último usou uma asa na traseira do carro, a qual tinha um passo variável, para criar *downforce*. Este conceito influenciou fortemente a geometria dos carros de competição a partir daquela data.

A circulação do ar em torno de um veículo em movimento afecta todos os seus componentes. A admissão de ar no motor, a refrigeração, a ventilação interna, o arrefecimento dos pneus e o escoamento externo em geral, afectam significativamente a aerodinâmica do veículo. O nosso estudo, no entanto, foca-se apenas nos efeitos da aerodinâmica externa, mas há informação adicional muito importante sobre o escoamento interno que pode ser encontrada em várias publicações, tais como Hucho (1998).

Tanto os automóveis como os camiões são objecto intensa investigação, em particular na área do comportamento das forças aerodinâmicas, quer sejam forças de sustentação ou de resistência. Os consumidores, os fabricantes e os governos estão cada vez mais interessados na redução dos consumos energéticos dos automóveis. A melhoria na geometria dos veículos

resultou, ao longo dos anos, num decréscimo do coeficiente de resistência dos automóveis, como mostra a Fig. 1. Os carros modernos têm um coeficiente de resistência médio de 0,35 devido, em grande parte, à zona frontal do automóvel. A área frontal nos automóveis tem vindo a diminuir acentuadamente, tal como o seu coeficiente de resistência, como mostra a Fig. 1. O valor do coeficiente de resistência mínimo, apresentado num ensaio efectuado no ano 2000, é de aproximadamente 0,15 para um veículo em forma de gota. Este pode ser produzido assim que o consumidor mostre interesse em adquirir um veículo com este formato, o que não é usualmente o caso. A estética e o *design* dominam bastante as decisões inerentes à concepção de veículos.

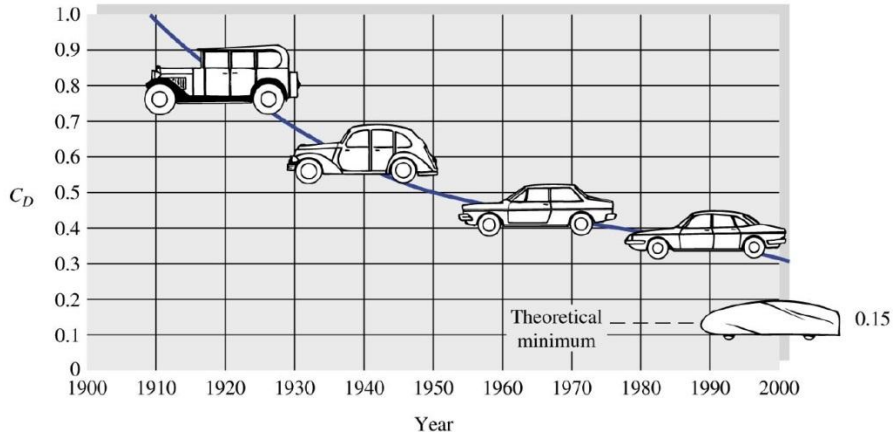


Fig. 1 – Evolução do coeficiente de resistência em veículos ou automóveis (White, 1998).

1.1. Considerações sobre o escoamento em torno de veículos terrestres

Vamos considerar que um veículo se desloca em linha recta e num piso horizontal, o escoamento que o envolve é dependente da velocidade do veículo e do vento no local. Como se mostra na Fig. 3 o vento tem um perfil de velocidade não uniforme, devido à topografia do local e à camada limite da Terra. De uma forma geral, a velocidade vai flutuando tanto na magnitude como na direcção, por efeito da turbulência atmosférica. Ao contrário do centro da gravidade do veículo que é fixo, o centro de pressão varia dependendo assim do escoamento e tende a avançar para a frente do veículo quando o veículo se desloca a velocidades elevadas (Richard Stone, 2004). As forças aerodinâmicas resultantes são apresentadas na Fig. 2 e pode observar-se que a componente na direcção do movimento do veículo deve ser superada pelo esforço da tracção e não pelo componente da força na direcção do movimento do ar, ou seja devemos considerar a componente relativa da velocidade.

Na Fig. 2 mostra-se o centro do coeficiente da força lateral, que é onde passa a linha de acção dessa força. O veículo será estável no seu movimento se o centro de pressão estiver atrás do centro do coeficiente da força lateral. Se o centro da pressão se situa à frente do

centro de gravidade a instabilidade dinâmica pode aumentar, uma vez que qualquer divergência da rota desejada introduz um momento de guinada no centro de gravidade, o que leva a aumentar ainda mais a divergência em relação à rota desejada para o veículo. Tendo em conta que a direcção de avanço do veículo e a velocidade do ar podem ser colineares, há um ângulo de guinada (*yaw*), α, e uma força resultante lateral.

Por outro lado, a força de sustentação o resultado do escoamento assimétrico acima e abaixo do veículo, um efeito que evidentemente irá ser muito influenciado pela presença de um ângulo de incidência β (Fig. 2).

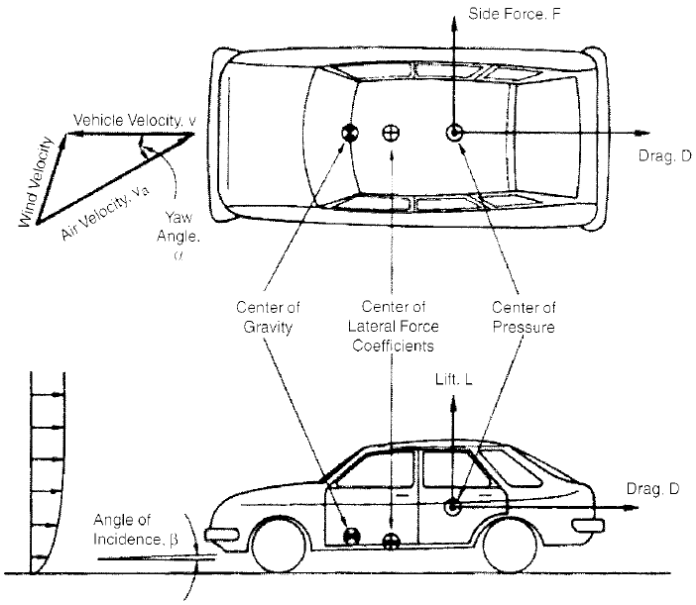


Fig. 2 – Forças aerodinâmicas num veículo em ambiente real, mostrando as relações entre a velocidade do veículo, a velocidade (absoluta) do vento e a velocidade relativa (Stone, 1989).

As características de resistência e de sustentação de um corpo são descritas pelos coeficientes adimensionais de resistência e sustentação, C_d e C_l. Estes são definidos pelas seguintes equações:

$$Força\ de\ Resistencia, D = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_d \qquad \textbf{(1.1)}$$

$$Força\ de\ Sustentação, L = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_l \qquad \textbf{(1.2)}$$

Onde,

ρ é a massa especifica do ar,

V é a velocidade relativa,

A é a área frontal do veiculo.

A força de sustentação L faz com que o veículo seja levantado do solo se for aplicada na direcção positiva e tiver um valor superior ao peso próprio do veículo. Aplicada na direcção negativa pode resultar num *downforce* excessivo. Os engenheiros tentam sempre manter este valor equilibrado, de modo a evitar excessos de *downforce* ou de sustentação. A força de resistência aerodinâmica age sobre o corpo do veículo e opõe-se ao seu movimento. Esta força é uma força importante a ser considerada no projecto do exterior do veículo, uma vez que abrange cerca de 65% das forças totais que actuam sobre o mesmo.

1.2. Considerações sobre as forças de resistência que actuam nos veículos terrestres

Nesta secção faz-se uma abordagem às forças de resistência que actuam nos veículos terrestres. São descritas as várias forças aerodinâmicas, a resistência de rolamento e a força de aceleração e desaceleração do veículo.

1.2.1. Resistência aerodinâmica

As forças que se opõem ao movimento do veículo, devido à resistência do ar, consistem principalmente em duas componentes: resistência de forma e resistência viscosa. Quando um veículo está em movimento, há uma zona na parte frontal do veículo onde a pressão do ar é alta e outra, na traseira do veículo, onde a pressão é baixa, a diferentes entre estas duas pressões resulta numa força que se opõem ao movimento do veículo. Esta força resultante é a força de resistência de forma ou de pressão. Esta segunda componente da resistência aerodinâmica, resistência viscosa, é criada pelas tensões de corte que o ar introduz em contacto com o veículo.

As forças aerodinâmicas são importantes e afectam a potência com o cubo da velocidade,

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot V^2 \quad e \quad P = D \cdot V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot V^3 \qquad \textbf{(1.3)}$$

onde ρ (kg/m^3) é a densidade do ar, C_d é o coeficiente de resistência aerodinâmica que caracteriza a forma do veiculo, A (m^2) é a maior área transversal do carro, e V (m/s) é a velocidade relativa do veículo. O coeficiente de resistência aerodinâmico pode variar entre 0,15, para um carro com formas aerodinâmicas, até 0,50 para um carro todo o terreno. Hucho (1998) afirma que a resistência aerodinâmica dos carros de tamanho médio contabiliza em torno dos 75-80% da resistência total ao movimento, a 100 km/h, e por isso contribui com

uma percentagem significativa para a economia de combustível no veículo. No entanto estes valores dependem muito da forma do veículo.

1.2.2. Resistência viscosa na superfície de veículos

Na superfície de um veículo o ar adere à parede, e ocorre uma tensão de corte que é comummente referida como resistência viscosa. Uma descrição detalhada sobre os mecanismos físicos associados à resistência viscosa pode ver-se em Houghton e Carpenter (1993), ver Fig. 3.

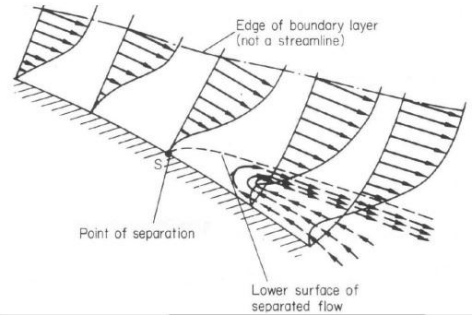


Fig. 3 – Desenvolvimento e separação da camada limite (E.L. Houghton, 1993).

Na camada limite há três fases distintas: a região laminar, a região de transição e a região turbulenta. Na região laminar a espessura da camada limite é pequena e aumenta gradualmente de zero, no início, até uma espessura significativa e surgir depois a região de transição. Na região de transição a mistura de partículas aumenta ainda mais a espessura da camada limite. Assim, à região de transição segue-se para uma camada limite turbulenta onde as tensões de corte são mais altas e a espessura cresce a uma taxa mais elevada. Estas tensões de corte, que são produzidas nas superfícies pela velocidade relativa entre o ar e o veículo na camada limite, são consideradas a maior fonte para a resistência de viscosa de superfície. Se o gradiente de pressao for adverso pode ocorrer separação do escoamento em regime laminar ou turbulento.

1.2.3. Resistência de pressão em veículos terrestres

De uma forma geral os veículos de passageiros são caracterizados por possuir um escoamento colado na parte frontal e na secção central. No entanto, quando o escoamento chega à traseira do veículo, ele em geral separa-se levando à formação da esteira. Esta separação resulta em gradientes de pressão altos, isto é, diferenças de pressão entre a frente e a traseira do veículo, que provocam uma força interna oposta à direcção do movimento, chamada de resistência de pressão (Hucho, 1998). Esta resistência de pressão é a principal fonte do coeficiente de resistência para geometrias de automóveis de passageiros. Assim, um

por esta razão que o ângulo de inclinação na traseira de um veículo desempenha um papel vital na determinação da intensidade desses vórtices.

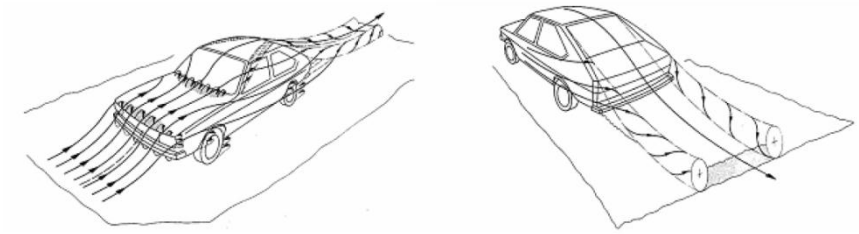


Fig. 5 – Geração de vórtices em torno de um veículo de passageiros (Hucho, 1998).

1.2.5. Aspectos relacionados com a resistência de rolamento

A resistência de rolamento é a energia que é perdida quando o pneu estar a rodar, e a principal razão para a perda de energia é a deformação constante do pneu que causa perdas por histerese. A histerese associada à deformação dos materiais dos pneus é a maior contribuinte para a resistência de rolamento dos pneus em superfícies duras. A histerese sobe quando a estrutura do pneu se deforma, provocando uma distribuição assimétrica das forças de reacção do solo no pneu. A histerese é minimizada quando se tem uma pressão alta no pneu e uma estrada com superfície dura. No entanto existem outros factores que afectam a resistência de rolamento, tais como o atrito entre o pneu e a estrada, a circulação de ar no pneu e o atrito mecânico. A força de resistência de rolamento é dada por

$$F_r = C_r \cdot m \cdot g \qquad \textbf{(1.4)}$$

Onde C_r é a constante de atrito de rolamento, m (kg) a massa do veiculo e g (m/s^2) é a aceleração da gravidade. O coeficiente de resistência de rolamento, C_r, é influenciado por parâmetros tais como: material do pneu, estrutura do pneu, temperatura do pneu, pressão dos pneus, geometria da banda de rodagem, rugosidade da estrada, material da estrada e a presença ou ausência de líquidos na estrada.

1.2.6. Efeito da inclinação da estrada

O peso de um veículo, quando este vai a subir ou descer uma colina, vai criar uma força. Esta força tem uma componente que se vai opor ao movimento, quando se sobe uma rampa, ou que vai contribuir para o movimento, quando se desce uma rampa. A força devida à inclinação da estrada é dada por,

$$F_c = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \qquad \textbf{(1.5)}$$

Onde m (kg) é a massa do veículo, g (m/s^2) é a aceleração da gravidade, e α (rad) é o ângulo de inclinação da estrada.

1.2.7. Força de aceleração ou desaceleração do veículo

A força de aceleração é o esforço de tracção total do veículo menos a soma das forças que se opõem ao seu movimento. A força de aceleração pode ser descrita em termos de movimento linear.

$$F_{acc} = m \cdot a \qquad \textbf{(1.6)}$$

Onde m (kg) é a massa e a (m/s^2) é a aceleração do veículo. A Fig. 6 mostra as forças que actuam no veículo em movimento, onde F_{acc} é a força de aceleração que tracciona o veiculo, F_a é a força de resistência aerodinâmica, F_r é a força de resistência de rolamento e F_g é a força de resistência de devido à inclinação da estrada.

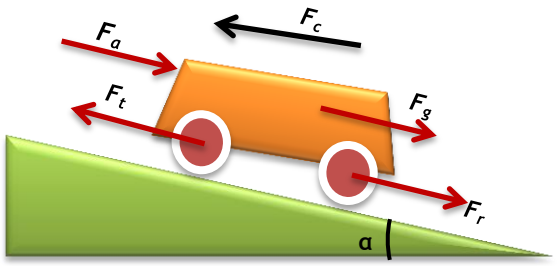


Fig. 6 – As várias forças que actuam num veículo em movimento.

1.3. Veículos de alto desempenho – o caso Shell Eco-Marathon

A *Shell Eco-Marathon* é uma competição de classe mundial onde participam equipas de Universidades, Institutos Politécnicos, Escolas Secundárias e outras Equipas Independentes. Os automóveis projectados, construídos e testados por estes grupos têm por objectivo fazer 7 voltas ao circuito (fechado) num total de 25,272 km, a uma velocidade média igual ou superior a 20 km/h e consumindo a menor quantidade de combustível possível. Esta competição teve origem em meados de 1939, e foi então designada *Shell Mileage Marathon*, e

resultou de uma discussão entre funcionários do laboratório de investigação da *Shell Oil´s*, em Wood River, no Illinois. As regras eram tão simples quanto o conceito: pretendia-se percorrer o maior número de quilómetros com o menor consumo de energia possível.

Os veículos que participam na *European Shell Eco-Marathon* são classificados pelo tipo de veículo (*Prototype* ou *UrbanConcept*, Fig. 7) e dentro desses dois grupos pelo tipo de combustível utilizado (Gasolina, Diesel, Etanol, GPL, Biodiesel, células de combustível, solar eléctrico ou baterias plug-in). Ao longo dos anos as equipas têm aplicado novas tecnologias e materiais, bem como o seu conhecimento acumulado ao longo dos anos, permitindo assim melhorar o desempenho destes veículos. Em resultado deste esforço, quase todos os anos foram atingindo novos recordes em termos de quilómetros percorridos com a mesma quantidade de combustível.

Fig. 7 – Prototype e UrbanConcept da Universidade de Chalmers (Chalmers, 2010b, Chalmers, 2010a).

Apesar de se pensar logo no comportamento do motor quando se fala em desempenho dos veículos há, na verdade, inúmeros factores a ter em conta. De entre eles destacam-se a aerodinâmica do veículo, o atrito mecânico e de rolamento, a massa global do conjunto e factores externos de origem ambiental: vento e qualidade do piso da pista.

1.4. Métodos experimentais e numéricos

Nesta secção faz-se uma síntese dos tipos de ensaios experimentais e numéricos usados na análise do escoamento em torno de veículos. Considerou-se ainda em separado os testes em túnel de vento e os testes em pista.

1.4.1. Testes Experimentais

A realização de ensaios experimentais é extremamente difícil para o caso dos veículos terrestres. Uma das razões prende-se com o facto de existir o solo. Em geral os testes podem ser feitos em túneis de vento ou em pista.

1.4.1.1. Testes em túnel de vento

Os coeficientes de resistência, de sustentação, bem como qualquer outra informação sobre o escoamento ou a distribuição de pressão à volta do veículo, podem ser determinados experimentalmente ou numericamente. De modo a efectuar simulações controladas recorre-se a túneis de vento ou ao ensaio em pista (numa situação experimental). A outra opção é o recurso a *software* que permite efectuar a simulação numérica, tendo de se ter em conta em qualquer das abordagens a correcta representação das condições atmosféricas. Devido ao custo dos ensaios em túneis de vento, que aumentam significativamente com o seu tamanho, muito do trabalho experimental é conduzido com o recurso a modelos à escala. Como nem todas as características de um veículo à escala real podem ser copiadas, nem reduzidas, adequadamente para a escala de um modelo surgirem naturalmente discrepâncias entre o modelo e os testes à escala real. A presença de um objecto no túnel de vento também altera o escoamento no túnel. No entanto, caso a área transversal do modelo seja apenas uma pequena percentagem da secção de trabalho do túnel, o efeito do bloqueio pode ser negligenciado. Num túnel de vento formam-se as camadas limite nas paredes do túnel, o que irá influenciar o escoamento principal. Os efeitos da camada limite, e do bloqueio da secção de trabalho, podem ser permitidos pois foram desenvolvidos métodos de correcção que são descritos em literatura para testes usando túneis de vento (Pankhurst, 1952).

Se o túnel de vento é operado com ar nas condições atmosféricas, então por exemplo, um modelo a um quarto de escala exigirá escoamentos de pelo menos quatro vezes a velocidade da escala real do veículo (E.L. Houghton, 1993). Apesar de o coeficiente de resistência ser bastante insensível ao número de Reynolds, a posição de qualquer zona de separação é susceptível de variar e logo isso vai alterar a posição do centro de pressão. Se um veículo é desenhado para andar a 135 km/h, então o seu número de Mach é 0.1 e os efeitos da compressão do ar podem ser negligenciáveis. Para um modelo a um quarto da escala, e com o mesmo número de Reynolds, o número de Mach deve ser 0,4 e os efeitos da compressibilidade podem tornar-se significativos. Isto requer testes à escala real, ou usando túneis de vento com ar pressurizado para aumentar a densidade do ar, de modo a que as velocidades usadas no ensaio do modelo possam ser mais baixas.

1.4.1.2. Testes em pista

Desde que a aerodinâmica se tornou essencial à concepção automóvel, a principal ferramenta de desenvolvimento têm sido os túneis de vento. Infelizmente, e para uma verdadeira simulação das condições da estrada, os túneis de vento convencionais têm as suas limitações. O chão é fixo relativamente ao veículo, permitindo que se desenvolva uma camada limite, e por outro lado as rodas do veículo de teste não rodam (G. Bischof, 2004). Além disso, os

dados experimentais obtidos a partir de diferentes túneis de vento revelam um certo nível de dispersão.

Neste trabalho houve necessidade de obter os diferentes coeficientes de resistência para um veículo que circula em condições reais de estrada. Entre estes coeficientes foram considerados como mais significativos as resistências aerodinâmica e de rolamento. A sua importância leva-nos à necessidade de avaliar realisticamente o desempenho do veículo. Entre as técnicas experimentais, usadas em estrada para determinar os coeficientes de resistência, a mais comum é o método de *coast-down*. O método de *coast-down* é uma técnica bem estabelecida e largamente usada pela indústria automóvel para medir a resistência total do veículo. Nesta técnica, o veículo é conduzido até a uma velocidade ligeiramente superior à velocidade de interesse, seguidamente é posto em ponto morto e permite-se que desacelere livremente. Esta técnica é geralmente prejudicada pelas condições de teste em pista, que não são constantes, em particular devido a ventos cruzados e à falta de uniformidade da estrada. No Capítulo 5 descrever-se-á melhor a técnica usada nas medições experimentais.

1.4.2. Modelação computacional do escoamento em torno de veículos terrestres

Em alternativa aos testes experimentais, existe a abordagem computacional que se baseia na dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*- CFD). No entanto, e apesar dos grandes progressos ocorridos nesta técnica, ela tem apresentado dificuldades em modelar geometrias reais de veículos, em parte devido às fragilidades associadas aos modelos de turbulência bem como à complexidade das malhas adequadas à geometria do veículo em estudo. A crescente disponibilidade de capacidade computacional, e as melhorias ocorridas nos modelos numéricos, tornaram possível utilizar o CFD para modelar o escoamento em veículos com geometrias complexas à escala real.

Inicialmente, a fim de contornar os problemas associados à modelação aerodinâmica de um veículo real, usaram-se modelos experimentais e numéricos simplificados (S.R. Ahmed, 1984) (Geoffrey M. Le Good, 2004) (H. Lienhart, 2000). Mesmo não obtendo um valor absoluto e totalmente correcto para os coeficientes aerodinâmicos, o uso de dados de túneis de vento e RANS em geometrias simplificadas permitiu aos projectistas seguirem no caminho certo, de modo a melhorar a performance do veículo, quer fosse com o objectivo de melhorar a sua estabilidade dinâmica, quer para obter uma redução no consumo de combustível.

Apesar de útil para analisar a geometria adequada em termos de melhorias de desempenho, o uso de CFD para estudos aerodinâmicos de veículos resultou em discrepâncias entre os valores numéricos obtidos pelos diversos autores, para a mesma geometria, sendo que a mesma

situação ocorreu em ensaios experimentais. Isto é verdade até mesmo para modelos com geometrias simples como é o caso do corpo de Ahmed (Haecheon Choi, 2008). Os problemas que afectam a dispersao de valores encontrados nas previsões de CFD têm a ver com a complexidade da geometria, a qualidade da malha e o modelo de turbulência utilizado. Como a maioria das perdas ocorrem na esteira, atrás do veículo, deve ser considerada uma modelação refinada nessa região. Na verdade, a capacidade de prever com precisão a esteira tornou-se um critério para considerar qual o modelo de turbulência a usar. Esta é uma das razões pelas quais, neste trabalho, se usou inicialmente o corpo de Ahmed antes de se modelar o veículo UBIAN10 que participou na competição *Shell Eco-Marathon*. Para tal, resolvemos as equações de *Navier-Stokes* para o escoamento médio (RANS) em conjunto com modelos de turbulência.

Mais recentemente tem havido esforços na aplicação de *Large Eddy Simulation* (LES) para corpos de carros simplificados, sendo que tem havido dificuldades em obter os recursos computacionais extremamente elevados e necessários para obter resultados a elevados números de Reynolds (T. Nakashima, 2008). Estes problemas estão associados com a exigência de malhas altamente refinadas, especialmente junto da região da parede. Uma forma mais realista de cálculo, para aplicações do dia-a-dia, é o uso de RANS não estacionário devido à sua capacidade de prever os movimentos do fluido, de grande escala energética, na zona de separação. Além disso os dados são fornecidos ao longo do tempo.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo iremos destacar alguns dos trabalhos publicados que foram consultados para a elaboração desta dissertação. De uma forma geral, fez-se um estado da arte dos modelos de análise do escoamento que existem e como surgiram, e também se aborda os artigos que foram usados para comparar os seus resultados com os resultados obtidos.

2.1. Modelação do escoamento no corpo de Ahmed

O corpo de Ahmed é uma das geometrias padrão usadas para estudar o escoamento em carros. Esta secção engloba a descrição de trabalhos com resultados experimentais e numéricos que tratem do estudo do corpo do Ahmed. Isto permite-nos adquirir um corpo de conhecimentos que nos permitirá analisar a qualidade das malhas e dos modelos de turbulência usados em modelação numérica, bem como prever o coeficiente de resistência, o coeficiente de pressão e as estruturas de vórtices.

2.2. Modelos experimentais

Um dos aspectos mais importantes do escoamento em carros é o que se refere ao comportamento da esteira. A influência do ângulo na traseira do veículo sobre o coeficiente de resistência foi inicialmente estudado por Morel (1978). Este autor descobriu que o ângulo na traseira de um modelo simplificado de um veículo de passageiros influencia significativamente o coeficiente de resistência do veículo. Ele observou, através das suas experiencias (usando um modelo simplificado e com um ângulo variável) que, quando o ângulo aumentava de 0º a 60º, este era acompanhado por um aumento do coeficiente de resistência. Acima de 60º havia um aumento, quase para o dobro, dos valores do coeficiente de resistência anteriores. Além disso, após este ângulo critico, os coeficientes de resistência decrescem drasticamente aproximando-se dos valores do coeficiente de resistência na configuração de 0º.

Este fenómeno, quando analisado em detalhe, revelou a presença de dois regimes de escoamento distintos. O primeiro ocorre para ângulos de inclinação que podem ser comparados com o que acontece em modelos de veículos com pequena, ou quase nenhuma,

inclinação na traseira. O outro regime de escoamento corresponde a uma combinação do primeiro regime associado a um conjunto de vórtices altamente tridimensionais, que surgem a partir das laterais ao longo da zona inclinada (Figura 8).

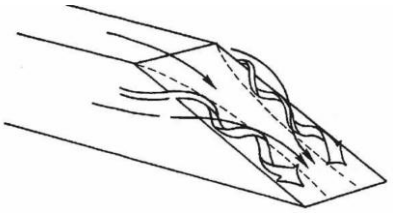


Fig. 8 – Modelo do comportamento da estrutura do escoamento proposto por Morel (1978).

Em Ahmed e Ramm (1984), propôs-se a geometria de um modelo simplificado de veículo designado por corpo de Ahmed. A partir dessa data têm sido elaborados vários estudos numéricos e experimentais sobre o escoamento em torno desta geometria. Este autor estudou a influência do ângulo da zona inclinada na traseira do veículo. Verificou-se que à medida que variava o ângulo, e este se aproximava dos 30º de inclinação, as características do escoamento na parte traseira deste modelo simplificado se alteravam de forma significativa. Este estudo despoletou um conjunto de estudos numéricos e experimentais sobre o escoamento em torno deste corpo.

Mais tarde Lienhart and Becker (2000) efectuaram estudos sobre a validação de modelos de turbulência para o corpo de Ahmed usando para comparação valores reais. Estes dados reais foram medidos num túnel de vento de baixa velocidade usando um anemómetro de laser Doppler (LDA) que foi apontado ao corpo de Ahmed. As medições foram feitas para dois ângulos de inclinação da traseira do veículo (25º e 35º), e a uma velocidade do ar de 40 m/s.

Em Bayraktar et al. (2001) investigou-se o efeito do número de Reynolds no escoamento à volta do corpo de Ahmed com ângulos na traseira de 0º, 12.5º e 25º. Além disso, registaram-se os efeitos dos ventos laterais na força de resistência do modelo. Embora este efeito também tivesse sido estudado por Ahmed nas suas experiencias originais, estas serviram para verificar a simetria do escoamento, e não constituíram uma parte integrante da investigação, e como tal, não existiam resultados anteriores sobre este efeito.

Sims-Williams et al. (2003) publicaram resultados experimentais, não estacionários, para o corpo de Ahmed para um ângulo de 25º. As medições foram feitas usando uma sonda colocada na esteira do modelo. Os ensaios foram obtidos usando uma única sonda de fio quente e ainda uma sonda de pressão de 5 buracos, e com todas as medições gravadas a 800Hz. Estes dados adicionaram à literatura existente nova informação relevante, uma vez que anteriormente apenas havia resultados para regime estacionário.

Mais tarde, Ivan Korkischko (2006) apresentou resultados experimentais e também computacionais. Estes foram descritos em termos de coeficiente de resistência (Cd) e também para o escoamento em torno do corpo de Ahmed usando PIV (*Particle Image Velocimetry*). A visualização do escoamento em redor do corpo de Ahmed concentrou-se na traseira do modelo, e na visualização da estrutura da esteira, pois essa região é a maior responsável pela resistência aerodinâmica. Para a modelação computacional foram usados como modelos de turbulência o $k-\omega\, Standart$, o $k-\omega\, SST$, e o $\mathrm{Spallart}-\mathrm{Allmaras}$, sendo que os dois últimos modelos produziram simulações cujos resultados apresentaram excelente concordância com os resultados experimentais de Ahmed e Ramm (1984), enquanto o modelo $k-\omega\, Standart$ apresentou resultados pouco satisfatórios.

Em Gilliéron et al. (2010) analisou-se o escoamento no corpo de Ahmed e foram apresentados resultados experimentais. Este artigo tem uma maior incidência no estudo da influência do ângulo traseiro do modelo de Ahmed, de modo a estudar e contribuir para um melhor entendimento da formação da esteira. Foram apresentados resultados para diferentes ângulos, incluindo o ângulo de 25° são descritos resultados para a pressão estática e a tensão de parede nos dois lados da traseira do modelo, que é onde se formam os vórtices. Os resultados mostram a influência do ângulo de inclinação na formação da estrutura de vórtices, e mostram ainda que o processo de rebentamento de vórtices pode ser promovido se forem usados pequenos ângulos na traseira do veículo. A montagem experimental foi conduzida no túnel de vento Lucien Malavard no PRISME Institute em França. É um túnel de vento de circuito fechado, e a velocidade testada para os diferentes ângulos foi 30 m/s, o modelo foi equipado com 43 tomadas de pressão ao longo de uma das zonas laterais da zona inclinada da traseira.

2.3. Modelos Computacionais

Para além dos estudos experimentais sobre o corpo de Ahmed também vários autores fizeram estudos numéricos sobre esta geometria. Esta serviu para estudar e compreender o escoamento em torno de corpos cheios, mas também para validar modelos de turbulência. Seguidamente faz-se uma síntese de algumas das publicações usadas como base do presente estudo.

2.3.1. Modelos RANS

(Han, 1989) apresenta uma modelação computacional baseada na resolução das equações de *Navier-Stokes* para o escoamento médio (RANS), em conjunto com as equações do modelo de turbulência $k-\varepsilon$. As equações foram resolvidas numericamente usando um sistema de coordenadas curvilíneas, o que permitiu calcular o escoamento tridimensional em torno do

corpo de Ahmed e Ramm (1984). Os cálculos numéricos foram feitos para várias inclinações da traseira do corpo e a um número de Reynolds constante de $Re = 4.3x10^6$, sendo este baseado no comprimento do corpo. Foi usado um esquema de segunda ordem para discretizar o termo convectivo, de forma a reduzir a difusão numérica. Este autor confirmou a maioria das características essenciais do campo de escoamento em redor do corpo de Ahmed, bem como as que ocorrem na proximidade do chão. De entre estas destacam-se a formação de duas estruturas de vórtices laterais e uma região do escoamento separado.

Também Liu e Moser (2003) estudou o escoamento em torno do corpo de Ahmed usando um modelo numérico baseado em RANS. Este autor comparou o desempenho de vários modelos de turbulência e demonstrou-se que o modelo $k - \varepsilon - v^2$ de Durbin (1995) foi o mais preciso, em particular no cálculo da camada limite. Foram usadas funções de parede para o modelo $k - \varepsilon - v^2$, de modo a evitar a divergência numérica quando é usada uma malha muito fina em geometrias complexas. Comparam-se ainda neste trabalho os resultados obtidos com outros métodos ($k - \varepsilon + WF$ ($k - \varepsilon\ com\ funções\ de\ parede$), $k - \varepsilon - v^2$, SSG, RSM, SST), isto para um ângulo de inclinação da traseira do corpo de Ahmed de 35º, sendo os resultados comparados com os de Ahmed e Ramm (1984) e por Lienhart e Becker (2002).

Korkischko e Meneghini (2006) apresenta um trabalho com resultados experimentais e computacionais. Estes foram obtidos a uma velocidade de 30 m/s e incluem o coeficiente de resistência e a visualização do escoamento em torno do corpo de Ahmed usando PIV (*Particle Image Velocimetry*). A visualização do escoamento ao redor do corpo de Ahmed concentrou-se na traseira do modelo, e na estrutura de vórtices da esteira, pois essa região é a maior responsável pela resistência aerodinâmica. Foram usados como modelos de turbulência o $k - \omega\ Standard$, $k - \omega\ SST$, e $Spallart - Allmaras$. Estes dois últimos modelos produziram simulações cujos resultados apresentaram excelente concordância com os resultados experimentais de Ahmed e Ramm (1984), enquanto o modelo $k - \omega\ Standard$ apresentou resultados pouco satisfatórios.

Guilmineau (2008) apresenta um trabalho com resultados numéricos, mas em que resolve as equações URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes*) para ângulos de inclinação da traseira do corpo de Ahmed de 25º e 35º. A comparação é feita com os resultados experimentais obtidos por Lienhart et al. (2000) e Lienhart e Becker (2002). Este autor estuda o comportamento de vários modelos de turbulência. Utiliza modelos algébricos e também um modelo baseado nas tensões de Reynolds (RSM) referido como RSM SSG model. Todos estes modelos de turbulência foram comparados com o modelo clássico de duas equações $k - w\ SST$, proposto por Menter (1993) e com o modelo de uma equação de Spalart e Allmaras (1992).

Em Saqr e Musa (2010) descrevem-se os resultados obtidos usando RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) para a simulação numérica do escoamento em torno do corpo de Ahmed, às velocidades de 65 km/h e 94 km/h. O objectivo deste estudo é identificar quantitativamente

a cinemática do escoamento e a disponibilidade de energia cinética em torno do corpo de Ahmed. Este autor apresenta graficamente os gradientes espaciais de pressão, turbulência e velocidade num espaço cartesiano (a três dimensões e regime estacionário) à volta do corpo. Esta visualização revela-se muito útil para entender o comportamento do escoamento.

Em Strachan (2006) o trabalho dividiu-se em duas fases. A primeira fase corresponde à análise experimental usando um anemómetro de laser-Doppler do modelo simplificado corpo de Ahmed, com variação do ângulo traseiro em túnel de vento. Foi assim possível obter medições de pressão estática e das forças aerodinâmicas. Adicionalmente foram conduzidas simulações numéricas usando *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) com o modelo de turbulência $RNG\ k-\varepsilon$. Este trabalho serviu para ampliar o conhecimento prévio do escoamento em torno do corpo de Ahmed e para analisar os efeitos dos suportes de apoio do veículo, e do piso em movimento. A fase dois deste estudo usou métodos semelhantes para investigar o modelo de Ahmed sob o efeito de proximidade a uma parede lateral estática. Os resultados da segunda fase são comparados com estudos de efeito de parede já anteriormente efectuados, a fim de compreender os efeitos de proximidade da parede sobre o escoamento.

2.3.2. Modelos DES e LES

O modelo LES (*Large Eddy Simulation*) é usado para cálculo de escoamentos turbulentos. As suas características permitem resolver explicitamente os grandes vórtices e, implicitamente os pequenos vórtices usando uma escala de *subgrid*. O modelo DES (*Detached Eddy Simulation*), é uma mistura do LES e RANS. Tem como objectivo tratar o escoamento global com RANS e calcular apenas os grandes vórtices libertados com LES.

Em Kapadia et al. (2003) apresenta-se um estudo usando *Detached Eddy Simulation* (DES), em que o calculo é baseado no modelo de turbulência de *Spalart-Allmaras*. A geometria em estudo é também o corpo de Ahmed, para ângulos de traseira de 25º e 35º, usando malhas não estruturadas e utilizando o código *Cobalt*. Foram feitas comparações com resultados experimentais medindo as velocidades, com laser Doppler, bem como com as medições de pressão na superfície do corpo, que foram posteriormente integradas para obter a força de resistência. O número de Reynolds é $2{,}78x10^{6}$, e é baseado no comprimento do corpo. A camada limite aproxima-se da inclinação traseira em escoamento totalmente turbulento. Segundo os dados experimentais o escoamento no topo da inclinação apresenta-se colado para 25º e separado para 35º. Isto provoca uma grande descida na força de resistência, com o aumento do ângulo de inclinação, à medida que os vórtices nas laterais da inclinação vão enfraquecendo devido à separação. Estes aspectos introduzem problemas nos modelos de turbulência, devido à necessidade da correcta previsão da separação da camada limite na zona inclinada, bem como à necessidade de prever com precisão a pressão na região da base, onde há uma grande zona de separação. O DES prevê uma pequena separação aos 25º de

inclinação, ao contrário dos resultados experimentais. No entanto os valores da resistência aerodinâmica estão relativamente perto dos valores obtidos nas experiências. Aos 35º de ângulo de traseira, o DES apresenta concordância com as experiências, enquanto o RANS prevê uma maior resistência em relação ao DES.

Em Guilmineau et al. (2011) apresenta-se outro estudo sobre o corpo de Ahmed usando *Detached Eddy Simulation* (DES) baseado no modelo de turbulência $k - w\ SST$. Este foi feito para as mesmas condições testadas em Lienhart e Becker (2002) permitindo assim testar a qualidade dos resultados usando o DES e qual o melhor modelo de turbulência.

Franck e D'Elía (2004) usa o modelo designado de *Large Eddy Simulation* (LES). Neste estudo mostra-se pormenorizadamente as malhas geradas para calcular o escoamento, o que é útil para outros autores que pretendem replicar o trabalho em LES. Para além da visualização comparam-se ainda os resultados numéricos obtidos com os resultados publicados por Ahmed e Ramm (1984), isto para um ângulo de 12.5º de inclinação da traseira do corpo de Ahmed.

Em Krajnović e Davidson (2005) apresenta-se um estudo detalhado do escoamento em torno do corpo de Ahmed, para um ângulo de inclinação da traseira de 25º, usando LES. É feita uma análise detalhada do escoamento na zona a seguir à separação, no topo da traseira do corpo de Ahmed. Na verdade, estes autores conseguiram obter simulações muito próximas dos resultados experimentais. Em conclusão, usando LES é possível modelar bem o escoamento em torno do corpo de Ahmed para um ângulo de 25º. Estes autores fizeram um segundo estudo (Davidson, 2005) onde descrevem em maior detalhe o escoamento, baseando-se nos resultados anteriores (S. Krajnović, 2005). O escoamento é extremamente complexo e por isso apenas algumas áreas é que foram discutidas nesse artigo. Em particular, observou-se que acima das arestas, na zona inclinada traseira do corpo de Ahmed, formam-se dois vórtices (um em cada lado) com forma de cone. Estes vórtices longitudinais contribuem para a resistência total do corpo de Ahmed, e à medida que se vão afastando do corpo de Ahmed vão aumentando e descendo em direcção do solo.

Fröhlich e Terzi (2008) também usou o modelo LES acoplado com modelos *Reynolds-Averaged Navier–Stokes* (RANS). Os modelos de tipo RANS têm constituído a principal estratégia para reduzir drasticamente o custo computacional de forma a tornar o LES acessível a uma ampla gama de complexas aplicações industriais. O artigo apresenta uma análise coerente das várias abordagens propostas na literatura para modelar numericamente o escoamento. Inicialmente, são introduzidos os conceitos básicos, e as principais estratégias de resolução, culminando num regime geral para classificar as abordagens LES/RANS híbridas. Seguindo a estrutura desta nova classificação, foram descritos e avaliados um vasto número de métodos diferentes. Os principais métodos são discutidos em maior detalhe, e ilustrados com exemplos retirados da literatura ou de resultados obtidos pelos próprios autores. O objectivo desta revisão é fornecer informação sobre as características dos diferentes métodos, de modo a promover a compreensão das dificuldades e a conhecer as limitações inerentes aos mesmos. Por outro

lado, os resultados tiveram sucesso e demonstram o grande potencial desta abordagem híbrida. No código comercial *Fluent* esta abordagem é designada de *Large Eddy Simulation* (LES).

Em Hinterberger et al. (2004) foram feitas simulações de modo a poder comparar os resultados numéricos com valores obtidos por Lienhart e Becker (2002). Os testes foram feitos para a velocidade de 40m/s e a um número de *Reynolds* de $Re = 2{,}8x10^6$ (baseado no comprimento do corpo L=1,044 m). Este é da mesma ordem de grandeza, embora mais baixa que a do teste original de Ahmed e Ramm (1984) onde $Re = 4{,}3x10^6$. O método numérico usado foi baseado num código de Volumes Finitos designado LESOCC2 (*Large Eddy Simulation On Curvilinear Coordinates*), que é uma versão melhorada e totalmente paralelizada do código LESOCC (Rodi, 1996).

2.4. Modelação do escoamento em veículos de baixo consumo

Biancolini et al. (2007) estudou o problema da avaliação da resistência aerodinâmica numa competição de veículos de tipo *Kart*. O estudo é inserido num projecto que pretende bater o recorde de velocidade em terra (*Land Speed Record Project*) e tem como objectivo avaliar a velocidade máxima do veículo na sua configuração original. Com o fim de investigar como é que as várias componentes do veículo afectam a resistência total foi realizado um teste numérico usando *software* comercial de CFD. De modo a estimar quantitativamente os resultados em pista foram feitos vários testes de *"coast down"*. O veículo foi equipado com um *data logger* para recolher os dados da velocidade ao longo do ensaio de *"coast down"*.

Krishnani (2009) estudou, no âmbito da sua dissertação de mestrado, a fiabilidade do uso de dispositivos externos para reduzir a resistência aerodinâmica de um SUV (*Sport Utility Vehicle*). Este modelo de SUV, de tipo genérico, foi criado no âmbito de investigações anteriores e, juntamente com o corpo de Ahmed, são considerados como geometria de referência para a validação dos resultados da simulação numérica. Foram re-projectadas e simuladas algumas partes da geometria do SUV usando os *softwares Fluent*, *Gambit*, *T-grid* e *Solidworks*, de modo a conseguir uma optimização do escoamento.

Em Michalowski et al. (2009) apresentou-se um estudo sobre as reduções no consumo de combustível de veículos. A engenharia assistida por computador (*Computer Aided Engineering* - CAE) fornece os recursos que permitem optimizar o projecto do veículo. A utilização destes meios de concepção é demonstrada num exemplo, neste caso com recurso à geometria de um carro de baixo consumo que participa na *Shell Eco-Marathon*. Neste artigo faz-se o estudo de dois veículos, que concorrem a duas categorias, a *Prototype Group* e a *UrbanConcept Group*. Neste trabalho os autores usaram o código *PowerFlow*.

Em Larsson e Martini (2009) desenvolveram-se trabalhos que conduziram a uma dissertação de mestrado, e cujo objectivo é quantificar a possível redução na resistência aerodinâmica através do redesenho da área de entrada de ar de refrigeração num *Volvo FH16*. Foram usadas duas abordagens: o primeiro método foi tapar a área da grelha do veículo pesado e o segundo método foi bloquear o conjunto de arrefecimento. Os resultados foram obtidos usando dois *softwares* comerciais, o *ANSA* e o *StarCCM+*.

Capítulo 3

Modelação computacional

Neste capítulo faz-se uma descrição das equações de governo e dos modelos de turbulência que foram utilizados no cálculo do escoamento. Estes, e outros modelos, estão disponíveis no manual da Fluent (Fluent, 2006). No manual do programa pode fazer-se uma consulta mais pormenorizada, uma vez que na presente dissertação foram usados como uma ferramenta, e não se analisou matematicamente cada método.

3.1. Equações de governo

O método de volumes finitos é uma técnica numérica usada na resolução de equações diferenciais parciais. As equações de governo são escritas na forma conservativa e posteriormente são discretizadas. As dimensões do espaço são discretizadas em elementos de volume, isto é, volumes de controlo "i" (Fig. 9). No centro do elemento de volume são armazenados os valores médios no tempo das variáveis nas células, por exemplo pressão e velocidade.

As três equações da quantidade de movimento de *Navier-Stokes* podem ser escritas numa forma compacta como:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + v\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \qquad \textbf{(3.1)}$$

Decompondo as variáveis numa componente média e de flutuação,

$$u_i = \overline{u_\iota} + u_i', p = \bar{p} + p' \qquad \textbf{(3.2)}$$

Efectuando as necessárias substituições e aplicando a média de Reynolds:

$$\rho\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho\frac{\partial \overline{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho\bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} + \left[-\bar{p}\delta_{ij} + 2\mu\bar{S}_{ij} - \rho\overline{u_i' u_j'}\right] \qquad \textbf{(3.3)}$$

Onde,

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}\right) \qquad \textbf{(3.4)}$$

Portanto, o objectivo em modelos de turbulência RANS é representar o termo desconhecido das tensões de Reynolds em função de termos conhecidos (escoamento médio).

$$\rho\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho\frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho\bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} + \left[-\bar{p}\delta_{ij} + 2\mu\bar{S}_{ij} - \rho\overline{u_i' u_j'}\right] \qquad \textbf{(3.5)}$$

As tensões de Reynolds ($\overline{u_i' u_j'}$)) são obtidas a partir dos modelos de turbulência.

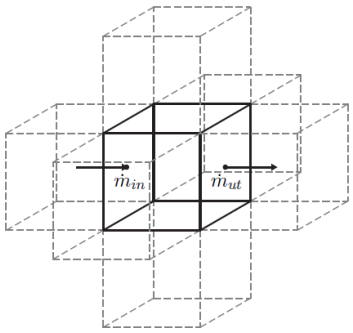


Fig. 9 – Volume de controlo "*i*", com os elementos que o rodeiam (E.L. Houghton, 1993).

3.2. Modelação da turbulência

O escoamento sobre um veículo em movimento ocorre tipicamente a um número de Reynolds da ordem de 10^5-10^7. Isto faz com que o escoamento seja turbulento. Este é caracterizado por grandes flutuações de velocidade e consequente flutuação de quantidade de movimento e energia. Estas flutuações, que são de pequena escala e alta frequência, acabam por fazer com que o cálculo seja bastante complexo e trabalhoso. Na literatura já existem citações de estudos onde as equações de *Navier-Stokes* são resolvidas na sua totalidade para todo o escoamento (*Direct Numerical Simulation*), incluindo os pequenos vórtices. Porém isso só é possível usando geometrias relativamente simples e/ou com recursos computacionais muito avançados, o que torna a actividade extremamente cara. Desta forma, é praticamente impossível a resolução de um escoamento realista por este processo.

Para permitir a solução estes problemas foram criados modelos de turbulência, que são formulações matemáticas relativamente simplificadas que procuram descrever os fenómenos ocorridos no escoamento turbulento e solucionar o escoamento com um certo nível de

precisão. Actualmente existe uma grande variedade de modelos de turbulência disponíveis, mas infelizmente ainda não há um consenso sobre qual é o mais adequado a cada tipo de escoamento e qual prevê melhor as diferentes estruturas de vórtice. Sendo assim, é necessário conhecer bem a natureza do tipo de simulação que se pretende executar e escolher entre os vários modelos existentes, o mais adequado ao estudo que estamos a executar. O *software Fluent* possui diversos modelos de turbulência, entre os quais podemos destacar o $k-\varepsilon$, $k-\omega$, $k-\omega\, SST$, $Reynolds\ Stress$, $Spalart-Allmaras$ e LES. Um dos métodos mais promissores que foi escolhido para este trabalho foi o $k-\omega\, SST$. Os motivos da escolha estão descritos com detalhe na secção 4.5 mais à frente.

3.2.1. Modelo de turbulência *Standard k-ε*

O modelo de turbulência $Standard\ k-\varepsilon$ é actualmente o mais amplamente aplicado aos problemas práticos de engenharia, uma vez que é robusto, económico e fornece uma precisão razoável para uma ampla gama de escoamentos. A equação de transporte para k é fisicamente correcta, todavia a equação de transporte para ε é altamente modelada. As equações de transporte para k e ε, para estado estacionario e escoamento incompressível, são dadas na literatura, nomeadamente no manual do *Fluent* (2006) como:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k\overline{u_i}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + G_k - Y_k \qquad \textbf{(3.6)}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon\overline{u_i}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + G_\varepsilon - Y_\varepsilon \qquad \textbf{(3.7)}$$

Nas equações anteriores, σ_k e σ_ε são o números de Prandtl turbulento para k e ε, respectivamente. Mais detalhes sobre o modelo, são apresentados no manual do *Fluent* (2006).

3.2.2. Modelo de turbulência *Realisable k-ε*

O modelo de turbulência $Realisable\ k-\varepsilon$ difere do modelo $Standard\ k-\varepsilon$ de duas maneiras distintas. Primeiro porque contém uma nova formulação para a viscosidade turbulenta, e segundo porque foi derivada uma nova equação de transporte para ε a partir de uma equação exacta para o transporte do valor médio da função vorticidade *Fluent* (2006).

No modelo de turbulência $Realisable\ k-\varepsilon$, a equação de transporte para k é idêntica à do modelo $Standard\ k-\varepsilon$. Todavia, os termos de produção e difusão na equação de transporte para ε diferem ligeiramente.

3.2.3. Modelo de turbulência *Standard k-ω*

O modelo de turbulência $Standart\ k-\omega$ incorpora modificações para efeitos de baixos números de Reynolds. As taxas de propagação do escoamento apresentam boa concordância com as medições efectuadas para esteiras afastadas e camada de mistura e, é portanto, aplicável aos escoamentos na zona da parede (Fluent, 2006).

3.2.4. Modelo de turbulência *k-ω SST*

O modelo de turbulência $k-\omega\ SST$ é uma junção da formulação declaradamente robusta e precisa do modelo $Standart\ k-\omega$, na zona junto à parede, e do modelo $Standard\ k-\varepsilon$ na zona mais afastada da parede onde este apresenta melhor comportamento. O modelo $k-\omega\ SST$ é, segundo alguns autores, mais preciso e fiável. Isto para uma classe de escoamentos mais vasta do que o $Standart\ k-\omega$, incluindo escoamentos com gradientes de pressão adversos (Fluent, 2006).

No modelo de turbulência $k-\omega\ SST$, a equação de transporte modelada para k é idêntica à do modelo $Standart\ k-\omega$, contudo a equação de transporte para ω difere ligeiramente pela inclusão de um termo de difusão cruzada.

3.2.5. Modelo de turbulência *Spalart-Allmaras*

O modelo de uma equação *Spalart-Allmaras* (P.R Spalart 1994) resolve uma equação diferencial parcial para uma variável $\tilde{v}$, que está relacionada com a viscosidade turbulenta. O modelo inclui um termo de anulação da parede que reduz a viscosidade turbulenta na subcamada laminar. O modelo toma a forma,

$$\frac{D\tilde{v}}{Dt} = c_{b1}\tilde{S}\tilde{v} - c_{w1}f_w\left[\frac{\tilde{v}}{d}\right]^2 + \frac{1}{\sigma}\left[\nabla\cdot\left((v+\tilde{v})\nabla\tilde{v}\right) + c_{b2}(\nabla\tilde{v})^2\right] \qquad \textbf{(3.8)}$$

A viscosidade cinemática turbulenta é obtida de,

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} = \tilde{v}f_{v1}; f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3}; \chi = \frac{\tilde{v}}{v} \qquad \textbf{(3.9)}$$

Os detalhes são apresentados em *Fluent* (2006).

3.2.6. Modelo de turbulência *Reynolds Stress Model (RSM)*

Os modelos de turbulência de duas equações ($k-\varepsilon$ e $k-\omega$) oferecem boas previsões para as características físicas da maioria dos escoamentos. Em escoamentos onde o transporte turbulento, ou onde os efeitos de não-equilíbrio são importantes, há a suposição de que a viscosidade turbulenta já não se torna válida e que os resultados dos modelos de viscosidade turbulenta podem ser imprecisos. Os modelos de *Reynolds Stress* incluem, naturalmente, os efeitos da curvatura das linhas de corrente, e permitem mudanças bruscas na taxa de deformação, e apresentam bons resultados para calcular escoamentos secundários comparando com modelos de turbulência que usam nos cálculos a aproximação da viscosidade turbulenta. Pode-se usar o modelo de turbulência Reynolds Stress nos seguintes tipos de escoamento:

- Escoamentos com camada de corte que possua uma forte anisotropia, com uma componente com um vórtice forte. Isso inclui fluidos em rotação;
- Escoamentos com mudanças bruscas na taxa de deformação média;
- Escoamentos onde os campos de deformação são complexos, e reproduzem a natureza anisotrópica da turbulência;
- Escoamentos com uma curvatura de linha corrente forte;
- Escoamentos secundários;
- Escoamento flutuante.

Os modelos de turbulência baseados em *Reynolds Stress* têm mostrado uma capacidade superior para prever o escoamento em comparação com modelos de viscosidade turbulenta nos casos referidos. Esta é principal justificação para a utilização dos modelos de *Reynolds Stress*, que são baseados em equações de transporte para os componentes individuais das tensões de *Reynolds* e da taxa de dissipação. Estes modelos são caracterizados por um maior grau de universalidade. O custo inerente a esta flexibilidade é um alto grau de complexidade resultante do sistema da equação. O aumento do número das equações de transporte conduz a uma redução da robustez numérica, requer maior esforço computacional e muitas vezes impede o seu uso nos escoamentos mais complexos.

Teoricamente, os modelos *Reynolds Stress* são mais adequados para escoamentos mais complexos, porém, na literatura verifica-se que muitas vezes não são superiores a modelos de duas equações. Note-se que o modelo de tensão de *Reynolds* em comparação com o $k-\varepsilon$ tem seis equações de transporte adicionais que são resolvidas para cada passo tempo no cálculo do escoamento. Os termos de fonte nas equações de *Reynolds Stress* são também mais complexos do que os usados no modelo $k-\varepsilon$. Como resultado destes factores a convergência pode ser mais lenta no modelo *Reynolds Stress* do que no modelo $k-\varepsilon$.

3.2.7.Detached-Eddy Simulation (DES)

O *Detached-Eddy Simulation* (DES) foi proposto em 1997 (Spalart PR, 1997) e foi inicialmente baseado no modelo de turbulência de *Spalart-Allmaras* (descrito acima). A precisão das previsões do DES tem sido tipicamente superior às dos métodos de estado estacionário e não-estacionário baseados em RANS, enquanto ao mesmo tempo se evita as limitações de número de *Reynolds* que assolam as simulações em LES. A objecção ao LES puro é simples e centra-se no custo computacional. A camada limite domina todo o seu custo, pelo que é necessário aos investigadores resolverem o problema da modelação da parede em LES.

O DES é uma versão modificada da versão do modelo de uma equação *Spalart-Allmaras* (P.R Spalart 1994) e pode-se considerar uma alternativa mais prática ao LES para prever os escoamentos com altos números de *Reynolds*. O DES combina uma versão RANS não-estacionário, que une o modelo *Spalart-Allmaras*, com uma versão filtrada do mesmo modelo para criar duas regiões separadas dentro do domínio do escoamento: uma que é baseada em LES, e outra que é dominada pelo RANS. A região LES é normalmente associada com altos números de *Reynolds*, onde as grandes escalas de turbulência desempenham um papel dominante. Nesta região, o modelo DES recupera o modelo LES puro com base no modelo de uma equação.

3.2.8.Large-Eddy Simulation (LES)

No caso do LES as variáveis nas equações de *Navier-Stokes* são decompostas. A razão para isto ocorrer, é para distinguir as escalas do escoamento, em particular as escalas pequenas e grandes. As escalas mais pequenas, chamadas de escalas de *sub-grid* do escoamento, são mais interessantes para modelar com o modelo de turbulencia (Davidson, 2010). Estas escalas são modeladas usando o modelo *Smagorinsky*, que é um modelo de viscosidade turbulenta. As escalas de *sub-grid* influenciam os vórtices maiores, e isso tem de se ter em conta. As escalas mais pequenas são consideradas universais, isto é, não são dependentes da geometria do escoamento como as escalas grandes são. As escalas pequenas são também isotrópicas, isto é, elas são igualmente distribuídas em todas as dimensões do espaço e por isso não são dependentes da direcção. As pequenas escalas turbulentas são difíceis de resolver porque são pequenas e caóticas uma vez que mudam aleatoriamente ao longo do tempo, daí serem calculadas pelo modelo de turbulência.

3.3. Condições de fronteira

As condições de fronteira têm de ser definidas em cada fronteira do domínio de cálculo. A velocidade é conhecida e vai definir a condição fronteira na entrada no túnel de vento ou na

entrada do domínio da caixa onde está o veículo (Fig. 21). Na saída todos os gradientes são iguais a zero, o que significa que, por exemplo, a velocidade não se altera quando passa na saída. No piso, tecto e paredes do túnel de vento ou do domínio computacional (caixa exterior), as condições fronteira são definidas como de não escorregamento, também no corpo a ser testado são definidas como de não escorregamento. A condição de aderência significa que o fluido junto às paredes tem a mesma velocidade que a parede em si, neste caso zero.

3.4. Funções de parede utilizadas no cálculo

O uso de funções de parede para modelar a região junto à parede pode reduzir significativamente os requisitos do processamento, e de armazenamento de um modelo numérico, e produzindo um grau aceitável de precisão. A principal característica da função de parede é a de fazer a ponte entre o escoamento viscoso, junto à parede, e as células mais afastadas da parede. As funções de parede devem ser usadas onde há várias células na camada limite, desde que exista uma malha bem construída junto à parede. Deve ser evitado o uso excessivo de malhas finas junto à parede, uma vez que a sua validade pode ser questionável (Fluent, 2006).

Em relação ao parâmetro da distância adimensional à parede, y^+, os valores pretendidos são entre 30 e 300 no caso de uso de funções de parede, e de $y^+<1$ no caso de não usar funções de parede:

$$y^+ = \frac{\rho\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_w}}y_p}{\mu} \qquad \textbf{(3.10)}$$

Na equação anterior, y_p é a distancia do primeiro nó computacional até à parede e o w refere-se às propriedades na parede.

3.4.1. Funções de parede Standard

As funções de parede Standard são aplicadas usando a lei de parede logarítmica para a velocidade média, este é dada na literatura em *Fluent* (2006) como:

$$U^* = \frac{1}{\kappa}\ln(Ey^*) \qquad \textbf{(3.11)}$$

Onde:

$$y^* \equiv \frac{\rho C_\mu^{0.25} k_P^{0.5} y_P}{\mu} \quad \textbf{(3.12)}$$

k_P é a energia cinética turbulenta, P é o nó no centro da célula e y_P é a distancia do nó P até à parede. κ e E são constantes iguais a 0.42 e 9.81 respectivamente.

Em *Fluent* (2006) apresenta-se em detalhe o cálculo das quantidades da turbulência nas células junto à parede usando funções de parede Standard. As funções de parede Standard funcionam razoavelmente bem para uma vasta gama de escoamentos na camada limite, no entanto, quando o escoamento começa a afastar-se das condições ideais, tais como gradientes de pressão adversos, a precisão das suas previsões possivelmente piora (Fluent, 2006).

3.4.2. Funções de parede de não-equilíbrio

A grande diferença entre as funções de parede Standard e as funções de parede de não-equilíbrio é que a lei de parede para a velocidade média é sensível a efeitos do gradiente de pressão, e é um conceito baseado em duas camadas. Este conceito é aplicado para calcular a produção de energia cinética turbulenta, tomada como valor médio na célula, bem como a dissipação nas células adjacentes à parede.

3.4.3. O *Enhanced Wall Treatment*

O *Enhanced Wall Treatment* é um método da modelação do escoamento perto da parede que utiliza a combinação de um modelo baseado em duas camadas com funções de parede mais sofisticadas. Este tratamento de parede é adequado tanto para malhas consideravelmente finas bem como para malhas mais esparsas (ou "malhas de funções de parede").

Se a malha é suficientemente fina para resolver a subcamada laminar (na ordem de y^+=1), então o tratamento da parede é idêntico ao modelo de duas camadas porém, este tipo de malha pode requerer significativas capacidades de processamento e armazenamento. Para mais detalhes sobre o modelo de duas camadas, as funções de parede e o seu método de implementação, pode-se consultar directamente em *Fluent* (2006). O modelo *Enhanced Wall Treatment*, com modelação perto da parede, é particularmente necessário para escoamentos envolvendo gradientes de pressão adversos levando à separação da camada limite.

Capítulo 4

Cálculo do escoamento no corpo de Ahmed

Neste capítulo vamos descrever em detalhe a modelação do escoamento em torno do corpo de Ahmed. Descreve-se a forma da criação da malha, a implementação do modelo numérico e apresentam-se os resultados obtidos.

4.1. Descrição da geometria em estudo

Ahmed e Ramm desenvolveram uma forma de automóvel *standard* conhecido por "corpo de Ahmed" em 1984 (S.R. Ahmed, 1984). É um corpo cheio com uma zona frontal redonda, uma zona central rectangular e uma zona inclinada na traseira (cujo ângulo especifico é variável), e é uma adaptação ao modelo usado previamente por Morel (1978). O modelo de geometria de Ahmed, incluindo o sistema de eixos usado no presente trabalho é mostrado na Fig. 10. O modelo tem aproximadamente 1 metro de comprimento, 0,4 metros de largura e 0,3 metros de altura. Este representa de uma forma bastante simplificada e à escala de $^1/_4$ um automóvel de tamanho médio. O modelo incluía 10 traseiras permutáveis, que iam de um ângulo de traseira de 0º a 40º. Em cada caso, o comprimento destas zonas inclinadas permanecia constante. O corpo foi criado de forma a ter uma zona livre de separação na frente e exibe muitas das características do escoamento de um automóvel, alterando a sua geometria na traseira. Esta forma do corpo também foi projectada para garantir que uma experiência possa ser realizada com referência a apenas uma característica aerodinâmica importante, ou seja, a zona na traseira. Isto simplifica muito as experiências, bem como a influencia aerodinâmica de áreas distintas que devem ser contabilizadas quando se utiliza uma geometria complexa de um carro. Esta é também uma das razões por que se usa extensivamente o modelo de Ahmed na análise de CFD.

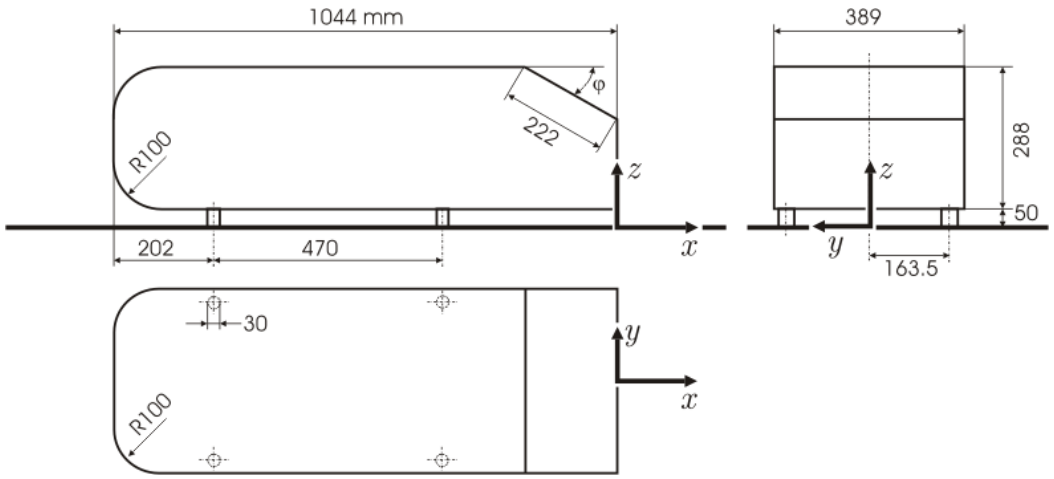


Fig. 10 – Geometria do corpo de Ahmed com indicação das dimensões do corpo (S.R. Ahmed, 1984).

4.2. Descrição do escoamento em torno do corpo de Ahmed

Nesta secção é dada uma descrição geral do escoamento no corpo de Ahmed, segundo o que é apresentado em Ahmed e Ramm (1984).

Há uma zona de estagnação do escoamento na parte da frente do corpo de Ahmed e depois o escoamento acelera nas zonas redondas na parte frontal do modelo. A velocidade do ar é quase constante sobre a superfície superior, e é acelerada localmente perto da aresta, no início da inclinação da traseira. Como tal, o coeficiente de pressão (Cp) varia de um máximo, na frente do corpo, até a um mínimo nos locais onde há aceleração de velocidade, como é o caso das arestas na frente arredondada e no inicio da inclinação traseira.

O escoamento sobre a secção inclinada na traseira do modelo é dependente do ângulo específico a ser investigado. Há dois ângulos críticos que foram relatados por Ahmed e onde ocorre uma mudança significativa no regime do escoamento ao longo desta secção: 12.5º (o primeiro ângulo critico) e 30º (o segundo ângulo critico). As três estruturas principais de escoamento exibidas ao longo da gama dos ângulos da traseira (α) são descritas abaixo:

$\mathbf{0 < \alpha < 12.5º}$

Abaixo do primeiro ângulo critico, o escoamento do ar sobre a secção angular da extremidade traseira permanece totalmente colado. A camada de corte enrola nas arestas superior e inferior da base vertical para formar duas regiões de recirculação marcadas a *"A"* e *"B"* na Fig. 11 (a). A um ângulo traseiro de 5º essas duas regiões têm uma ordem de magnitude comparável, mas a região de recirculação superior *"A"* torna-se mais dominante com o aumento do ângulo (α). A camada de corte dos lados da secção traseira angular enrola para formar dois vórtices longitudinais, marcados a *"C"* na Fig. 11 (a), excepto na proximidade das

arestas laterais, onde o escoamento é afectado por esses vórtices longitudinais. O escoamento sobre a superfície angular parece ser bidimensional.

$\mathbf{12.5º < \alpha < 30º}$

Entre os dois ângulos críticos, o escoamento em torno na zona inclinada torna-se altamente tridimensional. Os dois vórtices contra rotativos longitudinais, que têm origem a partir dos lados no topo da zona inclinada, são maiores do que aqueles formados abaixo do primeiro ângulo crítico, como mostrado esquematicamente na Fig. 11 (b). Este aumento do tamanho do vórtice afecta o escoamento sobre toda a zona traseira, causando o escoamento tridimensional. Estes vórtices são também responsáveis por manter o escoamento colado sobre a secção traseira até ângulos de aproximadamente 30º.

$\boldsymbol{\alpha > 30º}$

Para todos os ângulos acima deste segundo ângulo crítico e o escoamento na secção inclinada é totalmente separado. Mais uma vez, duas regiões de recirculação *"A"* e *"B"* são formadas na traseira, mas neste caso a região superior é formada a partir da separação do escoamento a partir do topo do modelo em vez de partir do topo da base vertical. As duas regiões previamente separadas, *"A"* e *"E"*, já não são se distinguem e podem agora ser consideradas como uma única região de maior dimensão. Quando o escoamento está neste estado é encontrada uma pressão quase constante em toda a traseira.

Segundo Ahmed e Ramm (1984), a camada de corte que sai da aresta lateral da inclinação, enrola e forma um vórtice longitudinal. Nas extremidades do topo e base da zona vertical na traseira do veículo, a camada de corte enrola como indicado na Fig. 11 (a), em duas regiões de recirculação *"A"* e *"B"*, situada uma em cima da outra. As recirculações *"A"* e *"B"* podem ser consideradas como sendo geradas a partir dos dois vórtices em forma de ferradura, situado um em cima do outro, na bolha de separação indicado por D. Estes vórtices nascem aproximadamente paralelos à superfície da base. O vórtice superior *"A"* alinha-se posteriormente com a direcção do escoamento, e une-se com o vórtice *"C"* que chega da zona inclinada. Segundo estes autores, houve dificuldades em analisar o desenvolvimento, ou a dissipação, do vórtice mais baixo *"B"*, a jusante, durante este e estudos anteriores. Por isso, não podem ser feitas afirmações conclusivas sobre este vórtice. A partir da camada limite, que separa nas laterais verticais da base, parte delas sobe até ao vórtice *"A"* e vórtice *"C"*. A outra parte provavelmente une-se ao vórtice B. Fig. 11 (a), as linhas de corrente na superfície da base indicam este processo.

À medida que o escoamento passa na superfície inclinada, é influenciado pelo vórtice *"C"*, que tem origem nas laterais. A magnitude do vórtice *"A"* está dependente da magnitude do vórtice *"C"*. Desde que o escoamento continue colado na superfície da inclinação, a magnitude do vórtice *"C"* depende do ângulo a que está a inclinação. Consequentemente a magnitude do vórtice *"C"* também depende do ângulo. A magnitude do vórtice *"B"* depende primeiramente das condições do escoamento na zona por baixo do corpo. Este vórtice está

indirectamente ligado à base da inclinação acima dos vórtices *"A"* e *"C"*. Claramente visíveis as recirculações *"A"* e *"B"*.

Também se pode identificar uma bolha de separação *"D"*. As velocidades do escoamento perto da base do modelo e na região onde a bolha de separação fecha, são pequenas e difíceis de medir.

Para inclinações de traseira de 30º, o escoamento na parte central da inclinação separa a montante. A presença dos dois vórtices laterais impede uma ampliação lateral desse escoamento. Também nessa parte central, há uma região de circulação fechada com a forma de meia elipse marcado a *"E"*, ladeada por duas regiões de escoamento colado *"F"* triangulares. Com isto, pode-se assumir que sejam gerados por um quarto vórtice, cujos eixos estão alinhados com a parte central do escoamento circulatório *"E"*. A parte central do vórtice lateral é alimentada com baixa energia da região de separação na base da inclinação. A presença desta região de separação baixa o nível da pressão predominante na superfície da inclinação. Isto contribui para um aumento dramático da resistência de pressão.

4.3. Criação de malhas para o modelo computacional

O processo de criação de malhas engloba vários passos e é uma das fases mais morosas, e importantes, em mecânica dos fluidos computacional. Neste capítulo, iremos abordar os três tipos de malhas que foram utilizadas, bem como as técnicas que se aplicaram para obter malhas de boa qualidade.

Estas malhas irão envolver o corpo que se pretende testar. A malha deve preencher todo este espaço onde há ar, o que significa que deve preencher o espaço que o envolve e não o volume interno da geometria do corpo a ser testado. Para isso, é necessário definir esse espaço que envolve o veículo, no qual será gerada a malha. Outro factor importante nesta fase, para além da criação da malha, é a certificação de que o domínio computacional (ou caixa) à volta da geometria em estudo não interfira nas condições do escoamento em análise. A caixa, tal como num caso experimental em túnel de vento, deve ter uma dimensão suficiente para que não haja perturbações do escoamento.

4.3.1. Criação da malha não-estruturada

A utilização de malhas tem como função preencher com elementos de volume elementar todo o espaço onde se encontra ar no volume analisado. É através desses pequenos volumes que é possível calcular o comportamento do escoamento que os percorre. Por questões matemáticas, o tamanho e a forma desses volumes é de extrema importância para uma boa precisão dos resultados. Dessa forma, e de uma maneira simplista, pode dizer-se que quanto

mais pequenos forem os elementos mais fácil será a adequação deles à geometria e mais preciso será o calculo do escoamento. Por outro lado, os elementos menores geram, para um mesmo volume analisado, um número muito maior de elementos, o que exige mais capacidade de processamento. Sendo assim, durante a criação da malha em torno da geometria, deve-se ter o cuidado para que os elementos tenham formas homogéneas e tamanhos compatíveis com a região do volume onde se encontram. Também se deve considerar a importância e a complexidade do escoamento prevista para essa região, tendo sempre em mente que um número de elementos demasiado elevado irá dificultar a execução dos cálculos numéricos. Nas secções seguintes pode-se verificar esta ideia: uma malha composta por um milhão de nós tem resultados muito próximos a uma malha de cem mil nós.

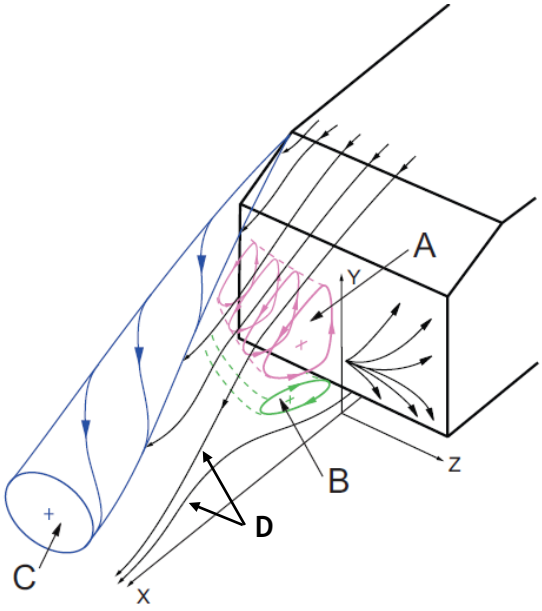
Uma das principais preocupações com a criação de malhas é a sua adaptação à geometria, às condições previstas para o escoamento no problema proposto e à capacidade de processamento computacional disponível. O processo que permite chegar a malhas que apresentem bons resultados é moroso, por isso foram realizados vários testes de malhas usando o modelo simplificado denominado corpo de Ahmed (S.R. Ahmed, 1984). Este autor propôs esta geometria, e estudou-a, realizando os testes em túnel de vento com os quais foi possível estudar vários factores, tais como coeficientes de resistência e pressão, e comportamentos dos vórtices. Com base nesta geometria surgiram vários trabalhos numéricos e experimentais. Assim, foi possível ir comparando os resultados obtidos com os resultados publicados à medida que se melhorava a malha.

Quanto a *softwares* de geração de malhas, houve a possibilidade de usar o *Gridgen* e o *Pointwise*. O uso do *software Pointwise* é simples e lógico, o que permite que não se perca muito tempo a aprender ou a lembrar como se usa. Isto permitiu que se utilizasse esse tempo para melhorar as malhas criadas e para analisar os resultados. Apesar de este *software* ser simples de usar, isso não interfere na qualidade da malha e não torna o processo de criação das malhas um processo fácil. Este processo pode dividir-se em várias fases, na primeira fase importou-se para o *Pointwise* a *database* do corpo de Ahmed (feita no *SolidWorks*) e a partir desta verificou-se se havia conectores múltiplos sobrepostos que originassem erros. Numa fase posterior, e a partir da *database,* foram criados os conectores onde são colocados e distribuídos os nós. Estes são distribuídos para que se ajustassem à geometria de modo a criar elementos uniformes.

Tendo em conta a necessidade de responder aos ensaios numéricos foram criados dois tipos de malha: estruturada e não estruturada. Para os testes em RANS optou-se por usar malhas não estruturadas uma vez que, segundo Elsey (2005), são malhas que se adaptam melhor à geometria. Quanto à malha estruturada, foi usada para se obter um y^+=1, uma vez que é mais fácil a sua aproximação à geometria do modelo. Começamos por criar os domínios que definem o volume, estes devem ser submetidos a um segundo processo de refinamento, quer da malha, nas zonas mais importantes, quer da própria malha ao longo da geometria.

Homogeneizam-se assim os elementos que compõem esses domínios. Após a criação dos domínios criaram-se os blocos de malha a três dimensões usando como faces os domínios.

a)



b)

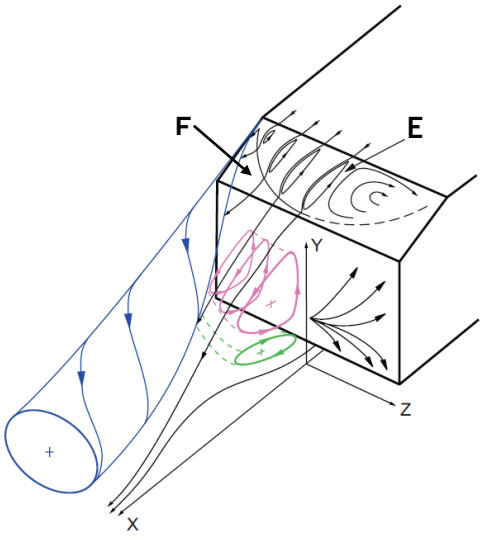


Fig. 11 – Diagrama esquemático do sistema de vórtices na esteira do modelo Ahmed (S.R. Ahmed, 1984).

4.3.2. Utilização da malha estruturada

Os modelos computacionais capazes de simular escoamentos com grandes escalas de turbulência são conhecidos como LES (*Large Eddy Simulation*). Este modelo é reconhecido por vários autores pela sua capacidade de obter resultados confiáveis, particularmente

simulações onde se encontram pequenas zonas de separação. No nosso caso, temos interesse em analisar os resultados obtidos por este modelo e confirmar se são mais precisos que os resultados dos outros modelos. Também podíamos analisar qual a sua capacidade de previsão de vórtices e verificar, para o caso do corpo de Ahmed, se existe uma bolha de separação no topo da zona inclinada, para o ângulo de 25º. A literatura refere a existência de uma bolha de separação aos 35º.

Apesar de vários autores referirem o modelo LES como muito fiável, há o problema de requerer um poder computacional bastante elevado. Para além do poder computacional, e uma vez que o LES não usa funções de parede, é necessário que a distancia adimensional à parede, y^+, seja próxima de 1. Tendo em conta que as malhas das simulações com funções de parede tinham de estar a uma distância da parede entre 30 e 300, houve a necessidade de criar outra malha.

Após testar vários tipos de malhas estruturadas e não-estruturadas, com diversas características, conseguiu-se uma malha em que a distância y^+, do primeiro nó computacional até à parede fosse perto de 1. Isto foi conseguido através de uma malha híbrida, usando malhas estruturadas junto ao corpo de Ahmed e malhas não-estruturadas na zona mais afastada. A seguir estão as características da última malha que foi testada.

Na Fig. 12 é apresentada a malha final que conseguiu obter as condições para correr em LES ou em RANS com $y^+<1$. Tendo em conta a necessidade de aproximação da malha ao corpo de Ahmed, tiveram de se criar pequenos blocos em cada superfície, permitindo assim restringir muito mais a malha junto à parede. Este caso tinha 21 blocos em torno do corpo de Ahmed, sendo o 22º bloco, o bloco que ligava as faces exteriores destes blocos às faces da caixa externa. Após várias tentativas e melhorias da malha não se conseguiu reduzir os 4 681 419 nós que o caso tinha, pelo que já se adivinhava que era um caso extremamente pesado para o *cluster* de computação paralela que se estava a usar.

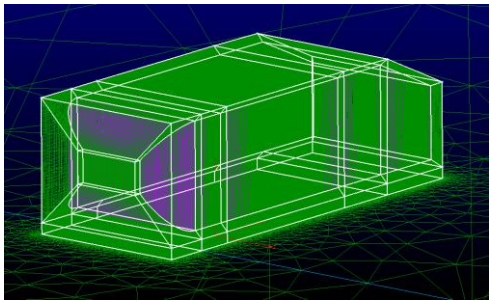


Fig. 12 – Definem-se a branco, as linhas dos 21 blocos junto ao corpo de Ahmed, o 22º bloco vai englobar as faces exteriores destes blocos e as faces da caixa externa, não visível na figura.

Podemos observar com mais detalhe nas figuras Fig. 13 e Fig. 14, os domínios auxiliares internos que foram utilizados para criar os blocos. Os pontos de cada malha foram distribuídos de modo a estarem mais perto da parede.

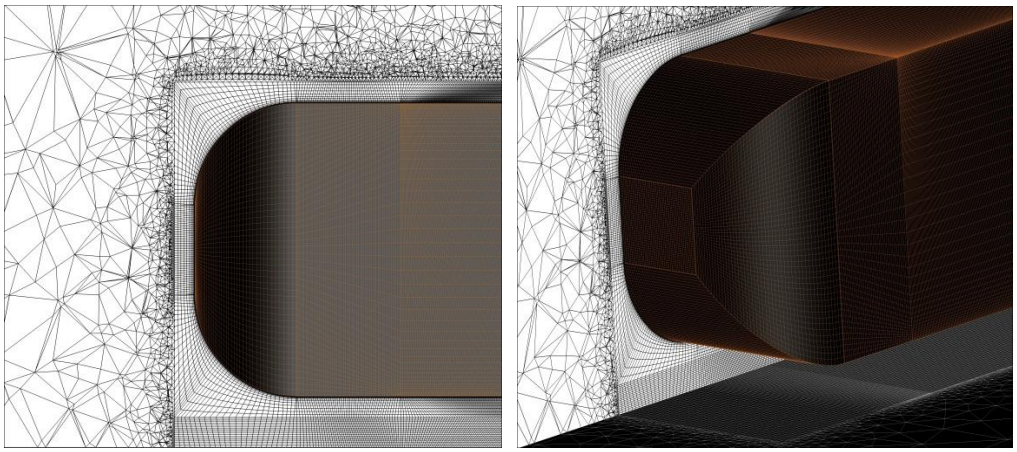


Fig. 13 – Malha estruturada refinada junto ao corpo de Ahmed e malha não estruturada refinada na zona exterior.

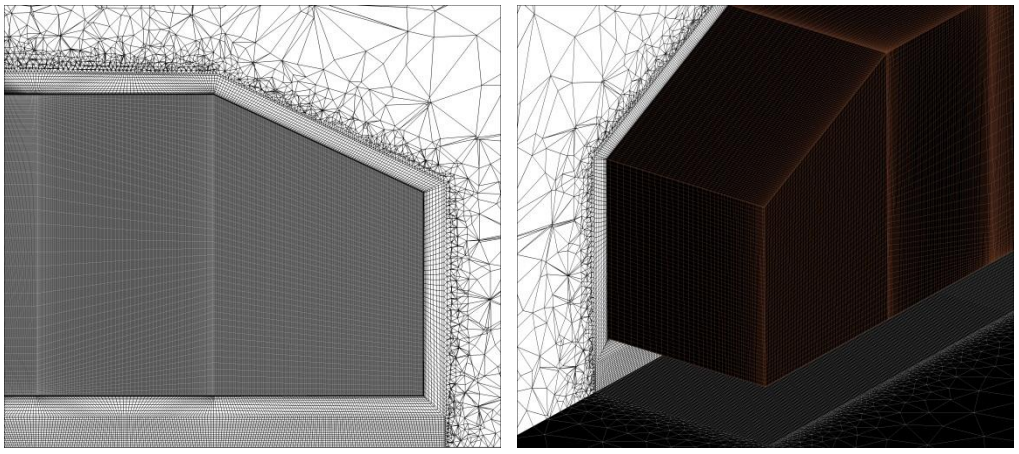


Fig. 14 – Detalhe da traseira inclinada do corpo de Ahmed onde se pode observar a malha estruturada dos blocos internos e a malha não-estruturada do bloco exterior.

Tendo em conta o tamanho computacional do caso do ponto de vista da malha e do modelo numérico LES, optou-se por convergir primeiro os casos com o modelo de turbulência $k-w\ SST$ a uma velocidade de 40 m/s. Só depois de confirmar se o caso tinha um y^+=1, é que se lançaria o caso convergido em LES. Ao analisar a Fig. 15, verifica-se que o corpo de Ahmed tem uma distribuição com valores de y^+ abaixo de 1, e que as pequenas zonas acima deste valor, têm um máximo de 3,5, pelo que se iniciou o cálculo em LES. No entanto foi possível, com esta malha, obter resultados usando o modelo RANS sem funções de parede.

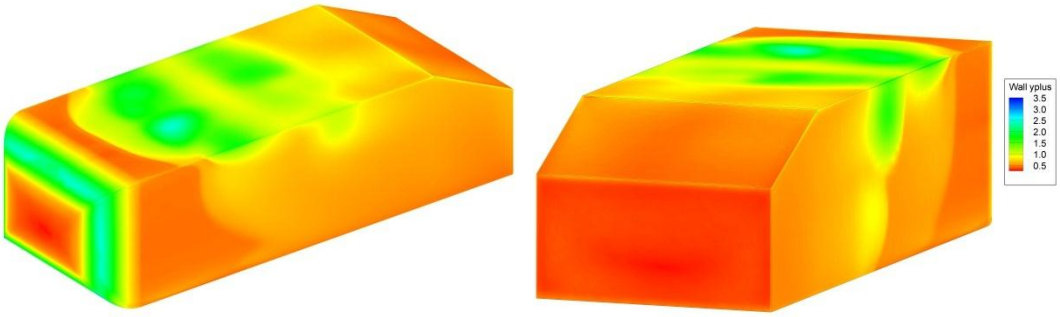


Fig. 15 – Distribuição do y^+ no corpo de Ahmed para a malha de 4 681 419 nós, representada na Fig. 14 e Fig. 15.

Quando se tentou lançar o caso em LES, houve o problema da capacidade de cálculo do cluster que, apesar de trabalhar em paralelo com dois computadores de 8 processadores com 8Gb de RAM cada, não conseguiu fazer a simulação por causa da falta de memória RAM. O caso corria usando um processador de cada CPU, de modo a usar os 8Gb de RAM de cada máquina, mas mesmo assim não conseguiu resolver o caso.

4.3.3. Qualidade da malha

Foram ensaiadas várias malhas usando o modelo numérico $k-\omega\ SST$ até chegar a um grupo de malhas que obtinham bons resultados. Das várias malhas ensaiadas, foram seleccionadas cinco para uma análise mais profunda. As malhas finais usadas foram as quatro malhas não-estruturadas e uma malha híbrida, como mostra a Tabela 1:

Tabela 1 – Malhas desenvolvidas para modelar o corpo de Ahmed.

Malhas não estruturadas	Blocos	Número de nós
A	1	1 185 028
B	1	487 323
C	2	261 487
D	4	150 956
Malha Híbrida	22	4 681 419

A qualidade da malha pode ter um impacto importante nos resultados da análise computacional. Este impacto pode influenciar a qualidade da solução e o tempo para a obter. Deste ponto de vista, a avaliação da qualidade da malha é muito importante, e útil, porque fornece algumas indicações de como uma dada discretização no espaço é adequada para o tipo de análise em consideração.

Na Fig. 16 é possível analisar uma das primeiras malhas que apresentaram bons resultados (malha A) e uma das últimas malhas, que está mais refinada e computacionalmente mais "leve" (malha D). A malha D está mais refinada junto ao corpo de Ahmed e, à medida que se afasta do corpo, esta vai ficando mais esparsa. Quanto à malha A, e apesar de estar refinada à volta do corpo de Ahmed, tem uma malha com demasiados nós em zonas onde não é necessário tê-los.

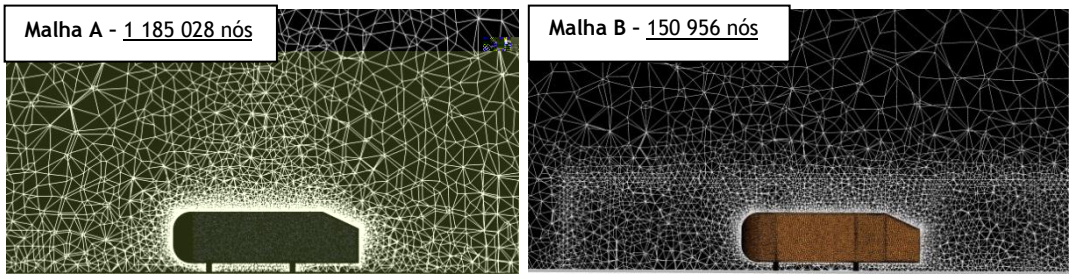


Fig. 16 – A malha D (com quatro blocos) está mais refinada junto ao corpo de Ahmed do que a malha A (um bloco).

Ao comparar as duas malhas na Fig. 17 e Fig. 18, pode observar-se que apesar de a Malha D ter menos nós isso não afectou a malha junto ao corpo de Ahmed. Esta redução trouxe benefícios computacionais em termos de tempo de convergência e de carga de cálculo. De notar que se teve o cuidado de refinar a malha, não só à volta do veículo, mas também na sua esteira. A zona da esteira é uma zona muito importante por causa dos vórtices que nela se geram e era portanto necessário que houvesse uma previsão correcta dos mesmos.

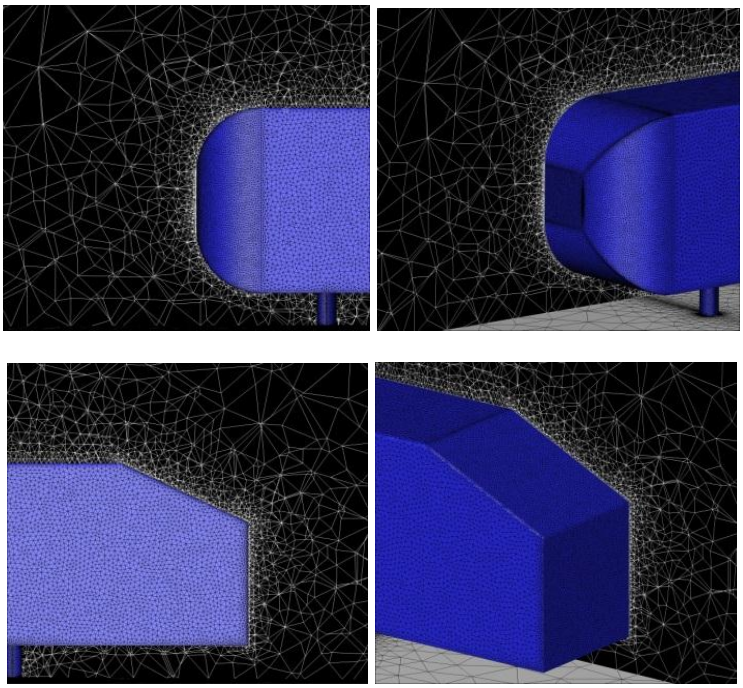


Fig. 17 – Representação da malha A composta por 1 185 028 nós e 1 bloco.

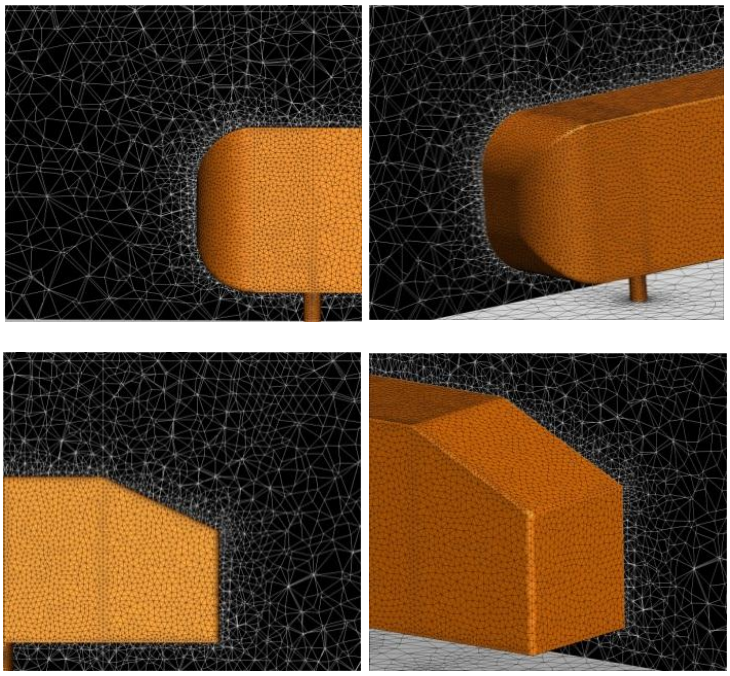


Fig. 18 – Representação da malha D composta por 150 956 nós e 4 blocos.

Como referido anteriormente, a análise da qualidade da malha engloba vários parâmetros. Neste caso também foi testada a qualidade de cada malha em relação a dois parâmetros principais: a *skewness* e o y^+. A Fig. 19 representa a forma de um elemento da malha, nesta imagem mostra-se que este elemento deve ser o mais uniforme possível. Esta uniformidade faz que ocorram menos erros de arredondamento quando o *Fluent* estiver a calcular o escoamento que passa por cada um dos elementos. Quanto ao y^+, e apesar de não ser propriamente um factor de qualidade da malha, mas sim a distância adimensional do primeiro ponto da malha no fluido à parede, a sua análise é importante visto que uma malha de boa qualidade não é apenas uma malha com elementos uniformes, mas também, com uma distância à parede dentro dos parâmetros definidos pelo tipo de cálculo usado junto da parede. A distância adimensional pretendida, quando se usam funções de parede, está entre os valores 30 e 300 e deverá ser menos de 1 quando não se usam funções de parede (como é o caso do LES). Ao contrário da *skewness*, o y^+ só pode ser analisado após se iterar o caso no *Fluent,* por isso, faz que este factor introduza um atraso no tempo maior que o predominado para ajustar a *skewness*. Enquanto a *skewness* é analisada e corrigida no gerador de malhas, o y^+ só pode ser analisado após montar o caso, iterá-lo e, então se a malha não estiver à distância normalizada, terá de se voltar ao gerador de malhas e corrigir o problema, lançando novamente o caso. Na Fig. 20 mostra-se a distribuição do y^+ num caso em que se usam funções de parede.

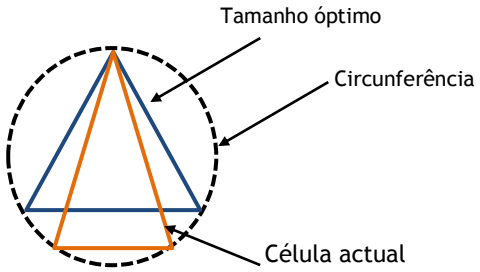


Fig. 19 – Exemplo de um elemento uniforme que deve ser usado na geração da malha nos domínios.

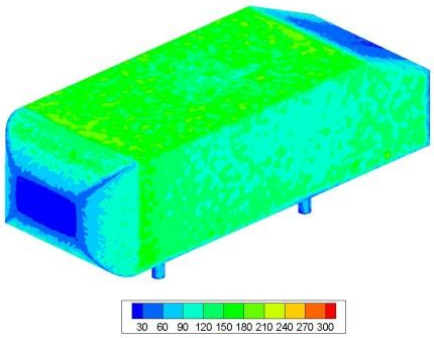


Fig. 20 – Exemplo do processo de análise da distribuição do y^+ num caso de teste.

4.4. Condições de fronteira

As condições de fronteira que foram implementadas nas faces da caixa exterior mostrada na Fig. 21 foram as seguintes: na entrada do volume de controlo, a montante, impôs-se uma velocidade que foi variando ao longo do presente estudo e que dependia do tipo de caso que se estava a montar. As velocidades impostas (*velocity inlet*) foram de 30, 40 e 60 m/s, com intensidade de turbulência de 0.25 % e uma escala de comprimento da turbulência de 1% da altura do veículo. Estas velocidades foram escolhidas de modo a que permitissem comparar os resultados obtidos com os resultados publicados nas mesmas condições. Na face a jusante, impôs-se uma saída do escoamento (*outflow*) de modo a que o escoamento nessa zona não interferisse nos resultados. Em relação ao topo e domínios laterais da caixa foi imposta a mesma velocidade da entrada, de modo que o caso convergisse mais rapidamente, esta velocidade tinha apenas uma componente, a do eixo dos xx, de forma a seguir a tendência do escoamento exterior. O modelo e o solo foram considerados paredes. O facto de, logo no início do projecto, dividimos a caixa e o modelo simplificado em blocos permitiu impor mais facilmente as condições de fronteira, e analisar mais tarde cada domínio individualmente.

Quanto ao tamanho da caixa (Fig. 21) poder-se-á dizer que deve ser o maior possível, no entanto um volume de controlo maior necessita de mais elementos para o preencher. Isto iria sobrecarregar o caso com nós e elementos desnecessários. Dessa forma, é necessário que se estime um limite onde as perturbações ao escoamento deixem de ser significativas e

considerá-lo como a fronteira desse volume. Estudos realizados por Ahmed e Ramm (1984) com corpos genéricos em túnel de vento, mostram a proporção ideal entre as dimensões do corpo analisado e do volume de controlo. Segundo este autor, o comprimento do túnel de vento, real ou virtual, deve ser cerca de oito vezes o comprimento do veículo e, em relação à altura e largura, duas vezes o comprimento do veículo. No nosso caso testaram-se dois casos com volumes de controlo diferentes: um com cinco vezes o comprimento, largura e altura do veículo; e outro caso dez vezes o comprimento, largura e altura do veículo.

O corpo de Ahmed tem uma grande área frontal em comparação com o resto das suas superfícies, por isso, para além da esteira, o cálculo do coeficiente de resistência é também dependente da previsão correcta da pressão de estagnação nesta superfície. Isto provou ser problemático no passado (Graysmith J. L., 1994), e a previsão incorrecta da pressão de estagnação nestas áreas tem sido uma das principais razões para a discrepância dos resultados do coeficiente de resistência aerodinâmica que se pode observar em anteriores publicações. Por esta razão, é necessário não só ter uma malha refinada na esteira do modelo mas também na frente. Além disso, a distancia às paredes do volume de controlo também se revela muito importante quer na entrada quer na saída do escoamento. Se aumentarmos ainda mais este volume de controlo teremos pouco efeito sobre a previsão dos resultados, e servirá apenas para aumentar o tamanho do domínio computacional.

As condições de fronteira a jusante têm de estar a uma distância suficiente para capturar toda a esteira do escoamento e estar a uma distância onde a pressão estática do escoamento voltou ao seu valor inalterado de modo, de modo a usar a condição de fronteira de tipo *outlet*. Isto foi mostrado por Gillieron e Chometon (1999), onde uma malha refinada a uma distância de cinco vezes o comprimento do carro, para jusante, é suficiente para alcançar bons resultados.

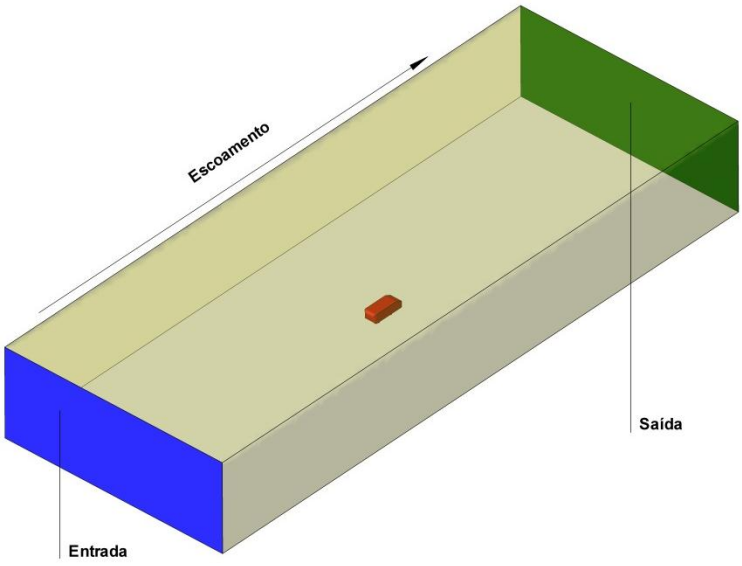


Fig. 21 – Dimensões da caixa ou domínio computacional que envolve o corpo. Note-se a proporção entre as dimensões que aqui são representadas à escala.

4.5. Resultados em RANS

Como descrito no capítulo 3.2 usaram-se as equações de transporte, aplicadas aos volumes elementares da malha, para calcular o escoamento do ar. Esse cálculo é efectuado pelo *software Fluent*. De acordo com a literatura consultada, em particular Korkischko e Meneghini (2006), e após vários testes com diferentes modelos de turbulência, verificou-se que o modelo de turbulência que melhor se adequava ao presente estudo, e que traria resultados mais precisos, era o modelo de turbulência $k-\omega\ SST$.

Um dos parâmetros importantes a considerar quando se monta o caso no *software Fluent* é a imposição da velocidade do ar na entrada o domínio computacional. As velocidades impostas à entrada foram seleccionadas de modo a poder comparar os resultados obtidos com os resultados publicados.

Para obter resultados que se pudessem comparar com resultados publicados houve uma fase de aprendizagem, onde foram feitas várias simulações com diferentes malhas, tamanhos do domínio computacional e diferentes modelos numéricos. Assim que se obtiveram bons resultados, houve uma fase de revisão e refinamento da malha, para que os casos fossem computacionalmente mais leves. Neste processo houve sempre cuidado para que esta redução, e refinamento, não interferissem nos resultados. Cada malha testada tinha as suas características, mas as grandes diferenças entre elas diziam respeito ao modo como se abordava o problema. O corpo de Ahmed foi testado com várias densidades de malha e vários números de blocos, veja-se a secção 4.3. Foram criados vários tipos de malhas que apresentaram diferentes características, quer na distribuição dos nós, quer na construção dos domínios da própria malha.

Como já referido anteriormente usaram-se dois tipos de malhas: estruturadas e não-estruturadas. As malhas não-estruturadas foram as mais usadas nos ensaios numéricos e, só nos ensaios para $y^+<1$ é que se usou a malha estruturada em conjunto com malhas não-estruturadas. Para o caso com $y^+<1$ usou-se esta malha híbrida, com malhas estruturadas e não-estruturadas, devido à necessidade de ter uma malha muito refinada junto à parede.

Nos vários casos estudados é necessário usar uma discretização espacial de segunda ordem, mas, para atingir mais rapidamente a estabilidade, colocaram-se as discretizações espaciais em primeira ordem, alterando depois para segunda ordem. A discretização em segunda ordem permite captar com maior rigor as variações no escoamento. Quando as malhas tinham pior qualidade, havia mais dificuldade em convergir, levando a mais tempo de cálculo e a que os resíduos não baixassem para além dos 10^{-2}. Nestas situações, houve a necessidade de forçar a convergência para baixar ainda mais esse valor, isto, foi conseguido reduzindo os valores dos coeficientes de sub-relaxação no modelo numérico do *Fluent*.

As primeiras simulações numéricas do corpo de Ahmed permitiram obter experiência, bem como verificar e analisar os modelos numéricos mais adequados. Com estes ensaios, conseguiu-se adquirir a experiencia necessária, acerca do tamanho e qualidade das malhas, bem como dos modelos numéricos a usar. A partir destes estudos todas as simulações numéricas para o veículo UBIAN10 seguiram esta metodologia.

4.5.1. Resultados obtidos com o modelo de turbulência $k-\omega\ SST$

Foram realizados vários testes com este modelo, uma vez que era o modelo que tinha um bom equilíbrio entre previsão de resultados e o peso computacional. Portanto, fizeram-se testes a várias malhas com a intenção de saber o coeficiente de resistência e coeficientes de pressão. Para estes ensaios, com este modelo de turbulência, usaram-se várias malhas e fizeram-se vários estudos e ensaios para velocidades de 30, 40 e 60 m/s, de modo a poder corroborar os nossos resultados com os publicados.

4.5.1.1. Comparação dos resultados das malhas A e D com os resultados de Ahmed e Ramm (1984)

Este ensaio numérico serviu para comparar os coeficientes de resistência com os dados publicados por Ahmed e Ramm (1984). Estes autores usaram tomadas de pressão uniformemente distribuídas pelo modelo simplificado, existindo um maior número, dependendo do ângulo de inclinação, na parte traseira.

Tendo em conta a Tabela 2, a malha D obteve um Cd 0,63% superior ao publicado no artigo. Quanto ao caso construído com a malha A, obteve-se uma diferença maior, de cerca de 3%. É notório que houve uma melhoria de resultados à medida que se refinava as malhas.

Nas secções seguintes fazem-se varias comparações a dados publicados por outros autores.

Tabela 2 – Comparação entre os resultados obtidos para a Malha A e Malha D em relação a valores experimentais.

Malhas	Número de nós	Velocidade testada (m/s)	Cd obtido	Resultados experimentais do Cd publicados por Ahmed e Ramm (1984)	Diferença (%)
A	1 185 028 nós (1 bloco)	60	0,2635	0,2948	3,13
D	150 956 nós (4 blocos)		0,3050		0,63

4.5.1.2. Comparação entre resultados obtidos com as várias malhas e diferentes Cd para 30 m/s

No processo de criação de malhas e no teste da sua qualidade conseguiram-se algumas malhas que, apesar de permitirem obterem bons resultados, continuavam a ser grandes computacionalmente. Por isso, ao longo do tempo, tentou encontrar-se várias estratégias para as refinar cada vez mais, em particular reduzir o número de nós de cada uma sem afectar os resultados. Na Tabela 3 apresentam-se os resultados para algumas das malhas testadas. A partir desta tabela pode concluir-se que o uso de blocos permitiu reduzir bastante o número de nós sem afectar os resultados. Entre a Malha A e a Malha D há uma diferença de um milhão de nós e apenas 0.47% de diferença entre os dois coeficientes de resistência.

Tabela 3 – Resultados dos testes aos vários tipos de malha calculados com o modelo *k-ω SST* para uma velocidade 30 m/s.

Malha	Blocos	Número de nós	Velocidade (m/s)	Resultados de Cd obtidos
A	1	1 185 028	30	0,3063
B	1	487 323	30	0,3288
C	2	261 487	30	0,3096
D	4	150 956	30	0,3110

Na Fig. 22 apresenta-se os resultados do coeficiente de resistência à medida que se reduz o número de nós. Pode observar-se que, a malha B apresenta um valor mais alto de Cd, mas está apenas 2% acima do valor dos coeficientes de resistência das malhas A e D. O objectivo deste estudo era conseguir reduzir o número de nós, sem que isso afectasse os resultados e, como verificado, o numero nós foi reduzindo, ao longo do processo, mas o valor do coeficiente de resistência teve apenas uma pequena variação.

Tirando o ponto 0,3288, verificou-se uma tendência de convergência para a solução experimental.

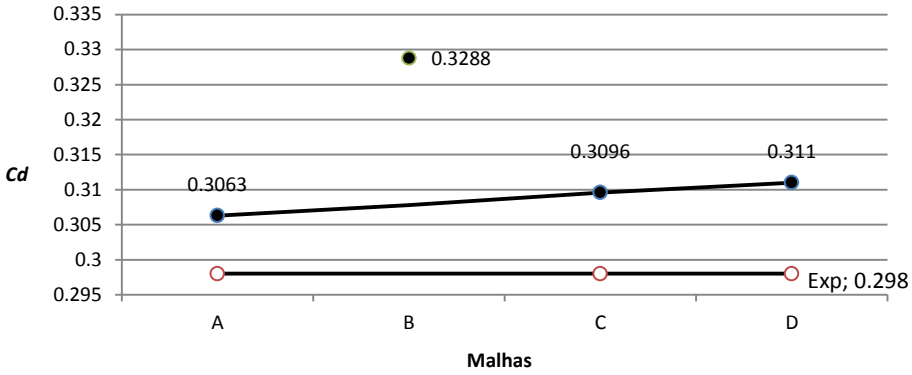


Fig. 22 – Evolução da redução do numero de nós da malha em funçao do coeficiente de resistencia (*Cd*).

4.5.1.3. Comparação dos resultados numéricos com os experimentais de Gilliéron et al. (2010)

Gilliéron et al. (2010) analisaram o corpo de Ahmed e apresentam os resultados experimentais para o coeficiente de pressão. A montagem experimental, levada a cabo por estes autores, foi implementada no túnel de vento *Lucien Malavard* no *PRISME Institute*. Trata-se de um túnel de vento de circuito fechado, a velocidade ensaiada para diferentes ângulos da traseira do corpo foi de 30 m/s. O modelo foi equipado com 43 tomadas de pressão ao longo de uma das laterais da zona inclinada, como se mostra na Fig. 23.

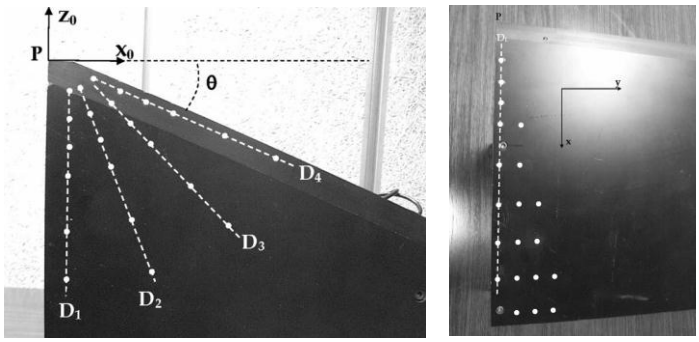


Fig. 23 – Localização das tomadas de pressão estática na zona inclinada do carro (Patrick Gilliéron, 2010).

O cálculo numérico, foi feito com o modelo de turbulência $k-\omega\ SST$, e foi usada a malha D nas mesmas condições de escoamento na entrada. Foi então feita uma análise mais detalhada dos resultados comparando os dados numéricos obtidos com os resultados experimentais publicados. Neste caso foi analisado o coeficiente de pressão por um corte a 5 cm da lateral do corpo de Ahmed (Fig. 24). Esta zona é das mais complexas de analisar, uma vez que estamos perto da aresta e perto da parede lateral. A comparação directa implica que os resultados numéricos capturem adequadamente a estrutura de vórtices nessa região. No entanto, as tomadas de pressão são construídas de modo a obter valores médios suavizando

qualquer instabilidade pelo que só é possível a comparação com resultados de estado estacionário (B J McKeon, 2002).

Na Fig. 24 pode observar-se uma grande zona de estagnação na frente do corpo de Ahmed. E na zona traseira, junto às arestas laterais da zona inclinada, há um decréscimo de pressão causada pela geração de vórtices.

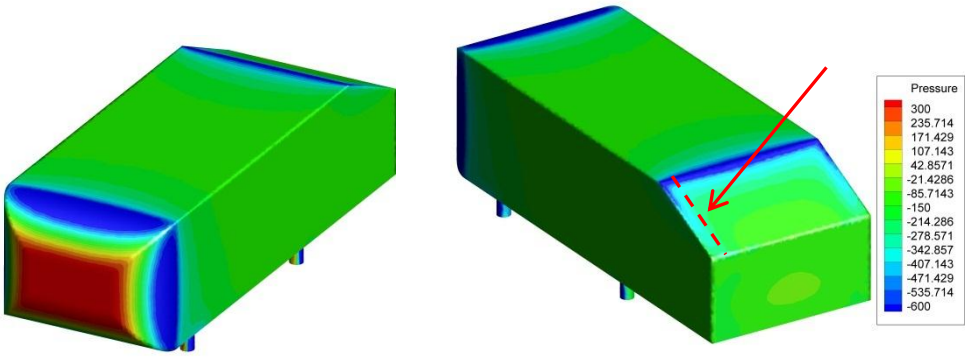


Fig. 24 – Distribuição da pressão no corpo de Ahmed, obtido usando o modelo de turbulência *k-ω SST* e a malha D.

Na Fig. 25 fez-se uma comparação entre os resultados obtidos numericamente e os resultados experimentais. Pode-se constatar que a distribuição do coeficiente de pressão experimental é muito idêntica à numérica. Apesar das isolinhas apresentarem algumas discrepâncias, pode-se observar que as maiores características do escoamento estão presentes nos resultados numéricos, e coincidem com os resultados experimentais.

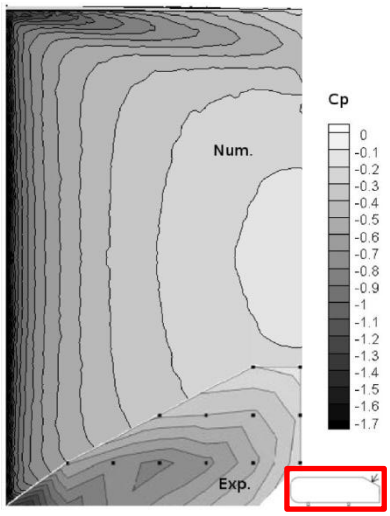


Fig. 25 – Comparação entre os resultados numéricos usando o modelo de turbulência *k-ω SST* e a malha D, com os resultados publicados por Gilliéron et al. (2010).

Na distribuição do coeficiente de pressão (Fig. 26), os quadrados correspondem aos valores numéricos e estes acompanham a linha preta criada a partir de valores experimentais de Gilliéron et al. (2010). No caso da simulação numérica, os factores que mais contribuem para esta discrepância a relacionados com o uso de funções de parede, que só por si são funções com resultados aproximados, e com o modelo de turbulência.

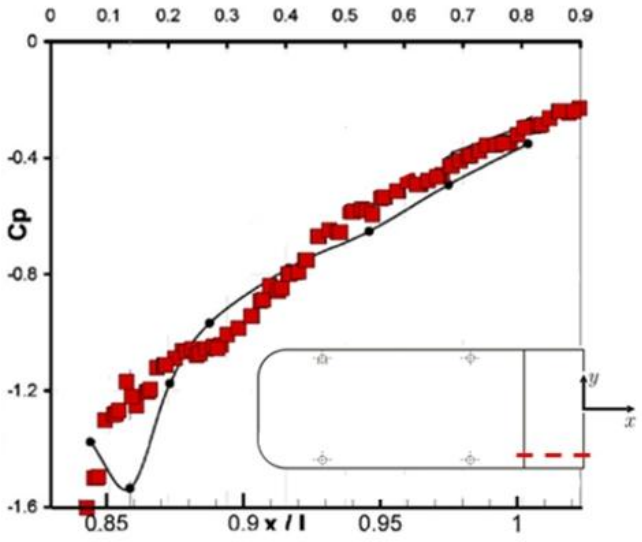


Fig. 26 – Confrontação entre resultados experimentais e resultados numericos obtidos. A linha preta representa os valores experimentais obtidos por Gilliéron et al. (2010) e os quadrados representam os valores obtidos numericamente para as mesmas condições.

4.5.1.4. Influência da qualidade das malhas na previsão dos resultados

Usando os mesmos ensaios publicados por Gilliéron et al. (2010), é possível analisar o efeito da qualidade das malhas, comparando os valores numéricos com os experimentais (Secção 4.5.1.2). Desta comparação surgiu o gráfico presente na Fig. 27. Há algumas variações nos resultados de cada malha, e em comparação com os valores obtidos experimentalmente. Praticamente todas as soluções conseguem acompanhar a linha preta, havendo pequenas variações no início e no fim da zona inclinada da traseira (como explicado na secção 4.5.1.2). Uma das principais razões por, apesar disto, a malha não ter influenciado tanto os resultados do coeficiente de pressão como seria previsto, tem a ver com o facto de este ter sido tirado num corte junto à superfície do veículo. Nessa zona junto à parede, o escoamento não é resolvido directamente pelo modelo de turbulência mas sim por funções de parede que fazem uma aproximação do escoamento naquela zona.

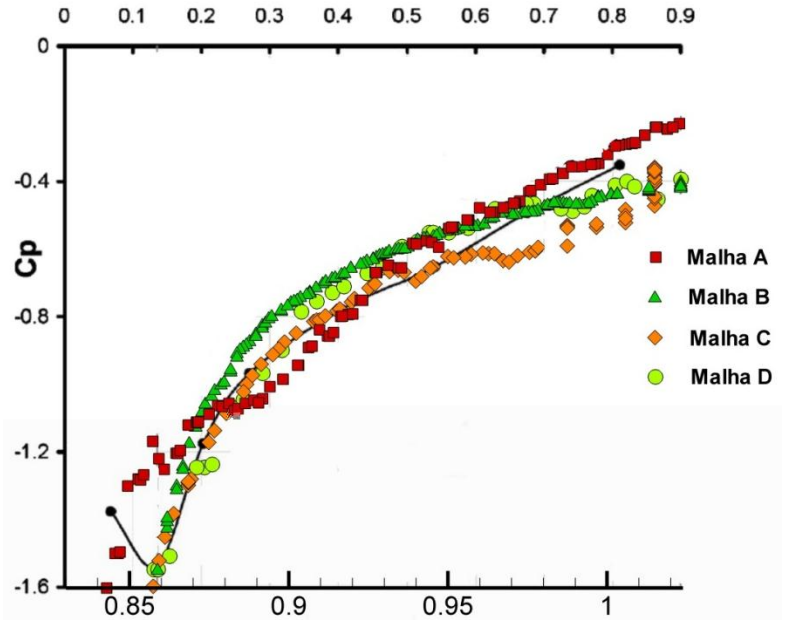


Fig. 27 – Demonstração da influência das malhas usadas no cálculo numérico no resultado do coeficiente de pressão e com os dados publicados por Gilliéron et al. (2010).

4.5.1.5. Comparação entre os resultados numéricos e os valores de Lienhart e Becker (2002)

Os resultados obtidos experimentalmente por Lienhart e Becker (2002) foram obtidos com recurso a um anemómetro de laser doppler (*Laser Doppler Anemometry*). Estes autores obtiveram resultados para 7500 posições de medição discretas, localizadas em 13 planos. Cada local de mediçao teve que ser medido duas vezes, primeiro para os componentes U e V de velocidade e depois para os componentes U e W.

Lienhart e Becker (2002) apresentam os planos vistos na Fig. 28. Estes planos estão dispostos na esteira do veículo, com vista a examinar a progressão das estruturas de vórtices, à medida que o escoamento se afasta do corpo. Tal como indicado por estes autores, é esperada uma estrutura de vórtices mais pequena junto ao corpo de Ahmed, uma vez que é no topo da inclinação que estes são gerados, e à medida que se afastam do corpo, esta estrutura de vórtices vai aumentando e descendo em direcção ao solo.

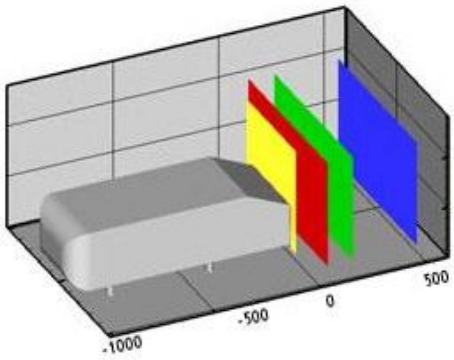


Fig. 28 – Planos de corte onde foram colhidos os dados experimentais atrás do corpo de Ahmed, a x=0, x=80, x=200 e x=500 (H. Lienhart, 2002).

Na Fig. 29 apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente por Lienhart e Becker (2002) e os obtidos numericamente. Nesses planos estão distribuídos os valores médios da velocidade medidos através de LDA. Também se apresentam os vectores da velocidade, permitindo assim uma melhor análise do comportamento do escoamento, nomeadamente dos vórtices. A imagem dos vectores, em contraste com os dados da velocidade, permite um melhor entendimento acerca do comportamento escoamento.

Para uma melhor visualização dos resultados obtidos fez-se uma justaposição das imagens dos dados numéricos obtidos com os dados experimentais publicados. Houve o cuidado de as sobrepor com mesma escala de cores e no mesmo sistema de eixos, com vista a fazer uma comparação correcta dos dois tipos de dados. Este estudo serviu para verificar se o modelo de turbulência escolhido, $k-\omega\, SST$, era capaz de prever o comportamento do escoamento, e em particular dos vórtices. Para além disto também se podem tirar outras conclusões desta análise, nomeadamente sobre a diferença entre resultados experimentais e os resultados numéricos.

No plano x=0, que é o plano mais próximo do corpo de Ahmed, o modelo numérico prevê a geração dos vórtices, ainda que sejam menores do que os vórtices obtidos experimentalmente. Quanto à distribuição da velocidade prevê-se uma zona de menor intensidade na zona central, entre os vórtices. Esta zona de menor velocidade existe devido à geração dos dois vórtices paralelos no topo da inclinação que, ao rodar para o centro do corpo de Ahmed criam uma zona com pressões mais altas.

Os valores numéricos para o plano x=80 têm comportamentos similares aos resultados experimentais, incluindo a previsibilidade dos vórtices. No entanto há uma grande diferença na zona onde se prevê haver menores valores de velocidade. Este plano foi o que resultou em pobres previsões, em particular na zona central, ainda assim os valores experimentais estão entre 0 e -10 m/s enquanto os valores numéricos estão entre 0 e -7 m/s.

O plano x=200 é um plano mais ou menos intermédio, reportando dados da zona média da esteira. Comparando os dois resultados verificou-se uma pequena diferença na zona de baixa velocidade, situada entre os vórtices, que mesmo assim estão dentro dos valores previstos experimentalmente. Neste caso o modelo de turbulência conseguiu prever o tamanho dos dois vórtices.

No último plano, em x=500, consegue-se observar que praticamente deixou de existir a zona central entre os vórtices, tendo esta uma velocidade mais baixa. Isto deve-se ao facto de os vórtices irem perdendo energia cinética à medida que se vão afastando do corpo e, por isso, já não têm tanta energia para influenciar o resto do escoamento

Tendo em conta o plano x=0 e o plano x=500, pode concluir-se que os vórtices têm um sentido descendente e vão aumentando de tamanho à medida que se afastam do corpo de Ahmed.

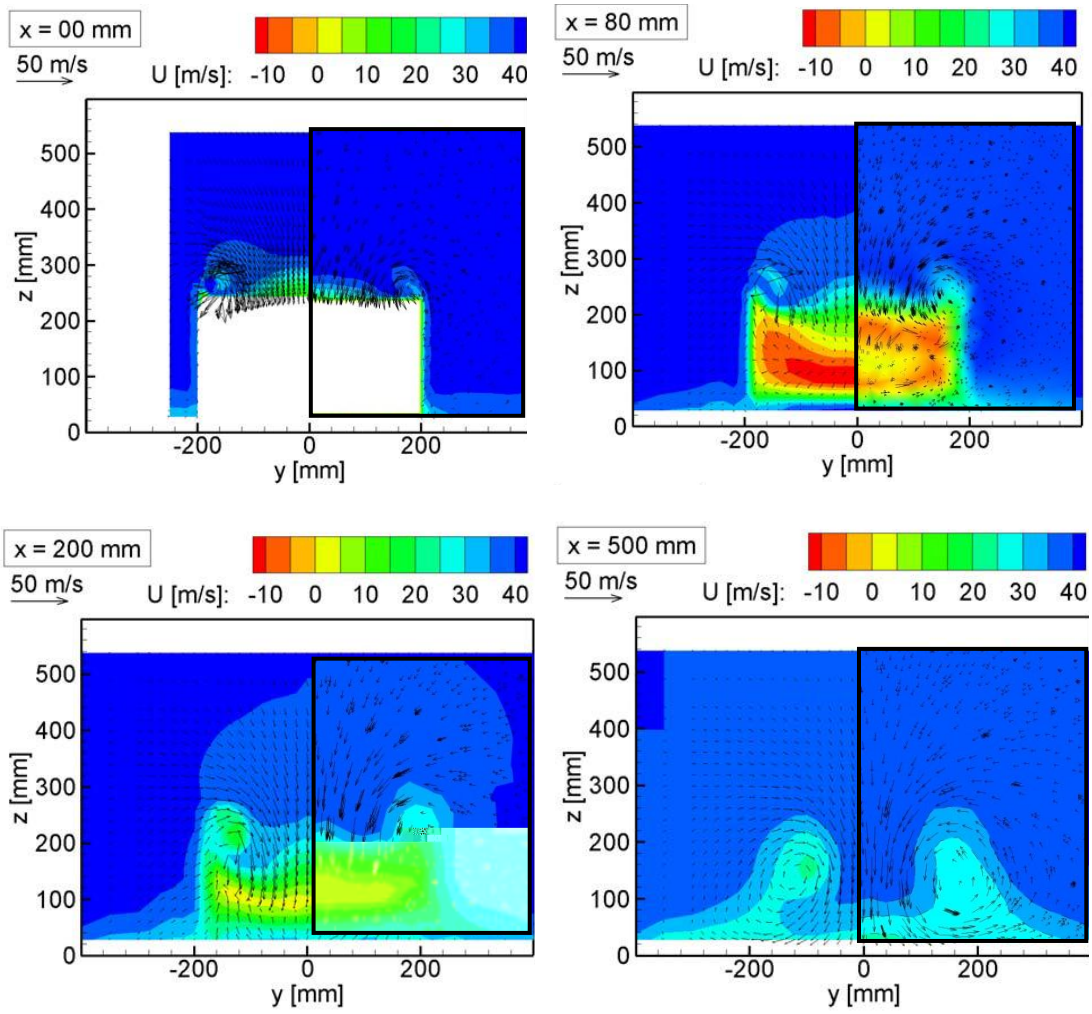


Fig. 29 – Comparação entre os dados experimentais, publicados por Lienhart e Becker (2002), e os resultados obtidos numericamente. Os resultados numéricos foram obtidos com o modelo de turbulência *k-ω SST* e usando a malha D.

4.5.1.6. Comparação entre os resultados numéricos e os valores experimentais de Strachan et al. (2004)

Strachan et al. (2004) fizeram vários ensaios e estudos sobre a geometria do corpo de Ahmed. Os ensaios experimentais foram feitos no túnel de vento *''D. S. Houghton''*. Uma correia permitiu o movimento do piso onde estava o corpo de Ahmed. Os ensaios foram feitos para 40 m/s e o piso foi sincronizado com a velocidade do ar. O número de Reynolds foi de aproximadamente $1{,}7 \times 10^6$ (baseado no comprimento do corpo). Tal como nos ensaios experimentais de Lienhart e Becker (2002), também aqui foi usado um anemómetro de laser Doppler que, nestes ensaios, foi instalado num sistema de três eixos controlado por computador. Os resultados são a média de medições a cada 20 segundos, com um máximo de 5000 leituras a serem tomadas para os dois componentes da velocidade em cada posição. Adicionalmente também fizeram cálculos numéricos.

Na publicação de Strachan et al.(2004) fazem-se vários estudos sobre o corpo de Ahmed apoiados nos ensaios anteriores de Lienhart e Becker (2002) e de Ahmed e Ramm (1984). Assim, foi possível a estes autores compararem, para as mesmas condições e mesmos planos, os seus resultados numéricos e experimentais. Na Fig. 30 está o plano x=500 com a distribuição da componente vertical da velocidade. Na figura da esquerda está o plano medido experimentalmente por Strachan et al.(2004) e à direita encontra-se o nosso resultado numérico para o mesmo plano, à mesma escala. Comparando a imagem com os dados experimentais e com os dados numéricos, concluiu-se que o modelo de turbulência usado no presente trabalho conseguiu prever os valores da componente vertical da velocidade para o plano a x=500 de distância do veículo.

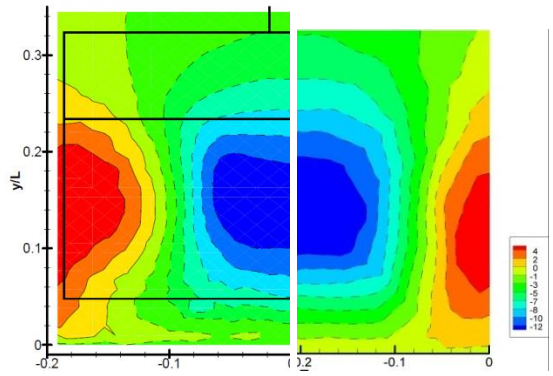


Fig. 30 – Na imagem da esquerda apresentam-se os valores para a distribuição da componente vertical da velocidade publicada em Strachan et al.(2004) e, na imagem da direita, a obtida no nosso cálculo numérico.

4.5.2. Comparação entre os valores obtidos por Lienhart e Becker (2002) e os valores numéricos usando o RSM

Tal como na secção 4.5.1.5, também aqui se obtiveram resultados numéricos, mas usando o modelo *Reynolds Stress Model, RSM*, com o objectivo de determinar a sua precisão na

obtenção de resultados. Neste teste foram comparados os mesmos planos sugeridos por Lienhart e Becker (2002) e presentes na Fig. 28.

Na Fig. 31 apresentam-se os planos com os dados experimentais da distribuição da velocidade propostos por Lienhart e Becker (2002) e, ao lado, os dados numéricos obtidos com o modelo RSM. Tal como no estudo anterior, também se apresentam os vectores, permitindo assim, uma melhor visualização dos vórtices. No plano x=0 o modelo numérico prevê a geração dos vórtices laterais, mas estes são de menor tamanho, no caso do modelo $k-\omega\ SST$ também houve este problema. Quanto à distribuição da velocidade, também é prevista uma zona de menor grandeza na zona central. Os dados dos planos x=80 e x=200 obtêm previsões dos vórtices, e da velocidade, muito similares às previsões obtidos com o modelo $k-\omega\ SST$. Quanto ao último plano, em x=500, o modelo RSM consegue prever melhor o vórtice.

Tendo em conta os resultados, e o peso computacional dos dois modelos, tem-se a confirmação que, apesar de o modelo RSM obter ligeiramente melhores previsões do que o modelo $k-w\ SST$, estas não são suficientemente boas para se considerar que este modelo é uma melhor alternativa.

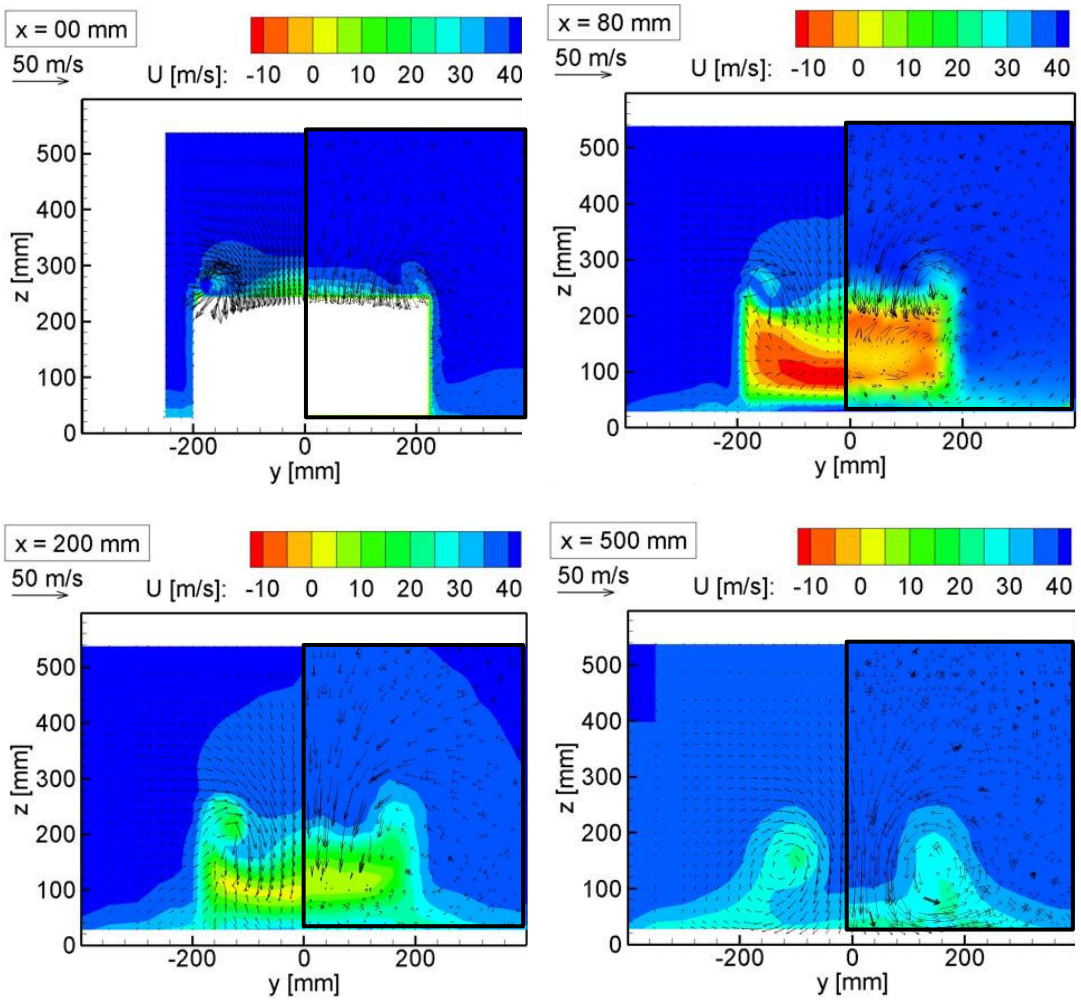


Fig. 31 – Comparação entre resultados experimentais de Lienhart e Becker (2002) e os resultados numéricos obtidos usando o modelo Reynolds Stress e a malha D.

4.5.3. Resultados obtidos com o modelo de turbulência $Spalart - Allmaras$

Os ensaios numéricos foram feitos para as duas malhas, A e D, usando-se o modelo de turbulência *Spalart-Allmaras*. Observando a Tabela 4 pode concluir-se que os valores numéricos obtidos e os valores publicados diferem em aproximadamente 6%. Kapadia et al. (2003) afirma que a sua simulação numérica com este modelo de turbulência previu um valor muito alto para o coeficiente de resistência, bem como para a sua distribuição de Cp. Os estudos sugerem que a precisão dos resultados está muito dependente da capacidade do modelo prever adequadamente a esteira (Sagar Kapadia, 2003). Tendo em conta que o valor do coeficiente de resistência obtido por estes autores a partir do modelo *Spalart-Allmaras* é elevado, adicionou-se na Tabela 4 outra simulação numérica desta vez não estacionária (*Detached-Eddy Simulation*) e também feita por estes autores. O cálculo DES é baseado no modelo de turbulência *Spalart-Allmaras*. Chegou-se à conclusão, comparado com os dados publicados, que o Cd obtido neste trabalho apresenta boa comparibilidade para as duas malhas, sendo que a malha D foi a que permitiu obter os melhores resultados.

Quanto à comparação com os resultados experimentais de Ahmed e Ramm (1984), verifica-se que a malha D também obteve melhores resultados que a malha A, mesmo assim, ainda apresentava uma diferença de 1,5%. Note-se que os valores experimentais de Ahmed e Ramm (1984) só estão disponíveis para $V = 60\ m/s$, $Re = 4{,}29 \times 10^6$.

Tabela 4 – Resultados obtidos com o modelo de turbulência de *Spalart-Allmaras* para as duas malhas e comparação com os valores de Kapadia et al. (2003). Para Ahmed e Ramm (1984) *Re=4,29x10^6* e para Kapadia et al. (2003) *Re=2,86x10^6*.

Malha	Velocidade (m/s)	Cd obtido	(Sagar Kapadia, 2003)				Cd exp. (S.R. Ahmed, 1984), $V = 60\ m/s$
			Spalart-Allmaras	Diferença (%)	S-A DES	Diferença (%)	
A	40	0,2726	0,338	6,34	0,281	0,84	0.2985
D		0,2835		5,45		0,25	

4.6. Resultados em URANS

O presente trabalho visa estudar o escoamento em corpos cheios não fuselados que, para os números de *Reynolds* em estudo, apresentam escoamentos não-estacionarios. A modelação deste tipo de escoamento pode ser feita usando modelos *Unsteady-RANS*. Os cálculos foram feitos usando a malha D, para a velocidade de 40 m/s. O escoamento foi calculado partindo de uma solução estacionária em 20 passos-tempo (*time-steps*) com 80 iterações por cada um,

ou seja, passos-tempo de 0,0001 segundos. Na Fig. 32 apresenta-se o Cd por cada *time-step*. Após atingir a estabilização, o Cd ficou a oscilar entre os 0,277 e 0,28.

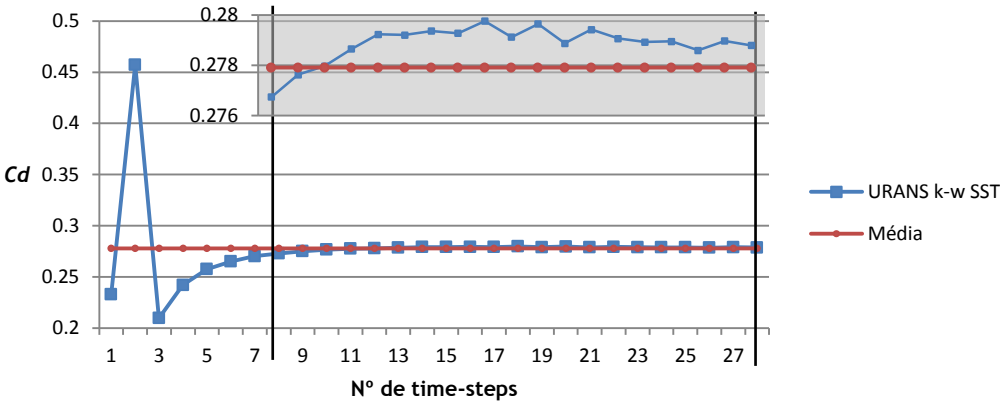


Fig. 32 – Evolução do coeficiente de resistência ao longo do tempo.

4.7. Resultados numéricos obtidos usando DES

No seguimento do estudo do trabalho de Kapadia et al. (2003) que usou o modelo DES, também neste trabalho foram feitos cálculos usando o modelo *Detached Eddy Simulation* (DES). Este é baseado nos modelos de turbulência de *Spalart-Allmaras* e $k-w\ SST$. O modelo *Spalart-Allmaras* é referido como capaz de prever a separação aos 25º de inclinação na traseira (Sagar Kapadia, 2003). Como tal foram feitos cálculos com a Malha D para a velocidade de 40 m/s, de modo a poder comparar os resultados obtidos com os resultados publicados por Kapadia et al. (2003). Esta simulação numérica foi inicialmente convergida com o modelo não-estacionário RANS $k-w\ SST$ e, após a convergência, foram feitas 20 *time-steps* com 80 iterações cada uma usando o DES.

No gráfico da Fig. 33 e Fig. 34 mostram-se os gráficos de resultados de coeficiente de resistência usando o modelo numérico DES. Fizeram-se dois ensaios, um usando como base, o modelo de turbulência *Spalart-Allmaras* e ou outro, usando o modelo de turbulência $k-w\ SST$. Também se compara com os resultados do modelo de turbulência $k-w\ SST$ estacionário. É possível analisar que os resultados médios obtidos pelo *DES S-A* estão mais próximos da linha do $k-w\ SST$ estacionário. Não se conseguir aferir a razão da variação do valor do coeficiente de resistência para valores negativos. Normalmente, quando se usa modelos numéricos do tipo DES e LES, usam-se malhas com $y^+<1$, essa é uma das razões para a oscilação dos resultados.

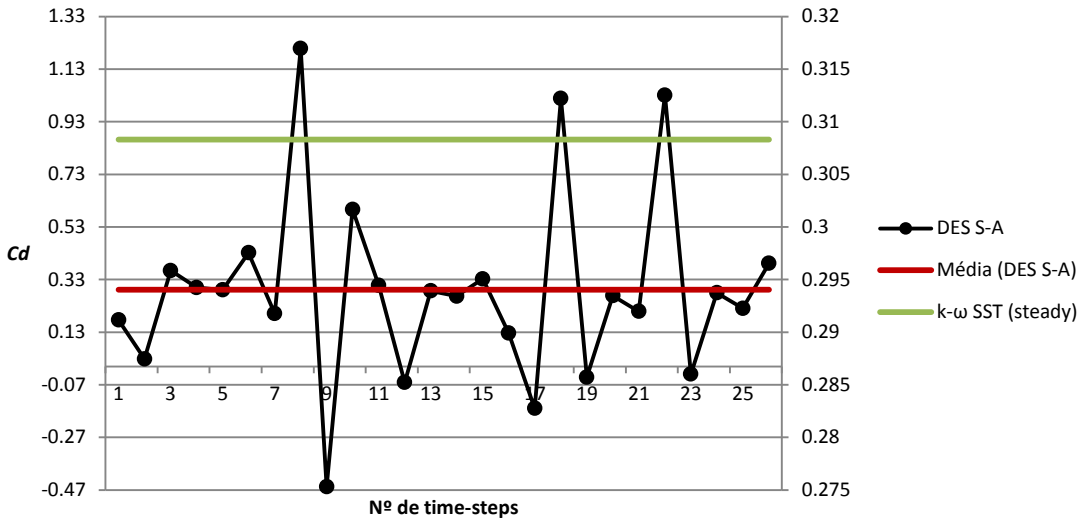


Fig. 33 – Ensaio com o modelo *DES S-A em comparação com o k-ω SST estacionário*.

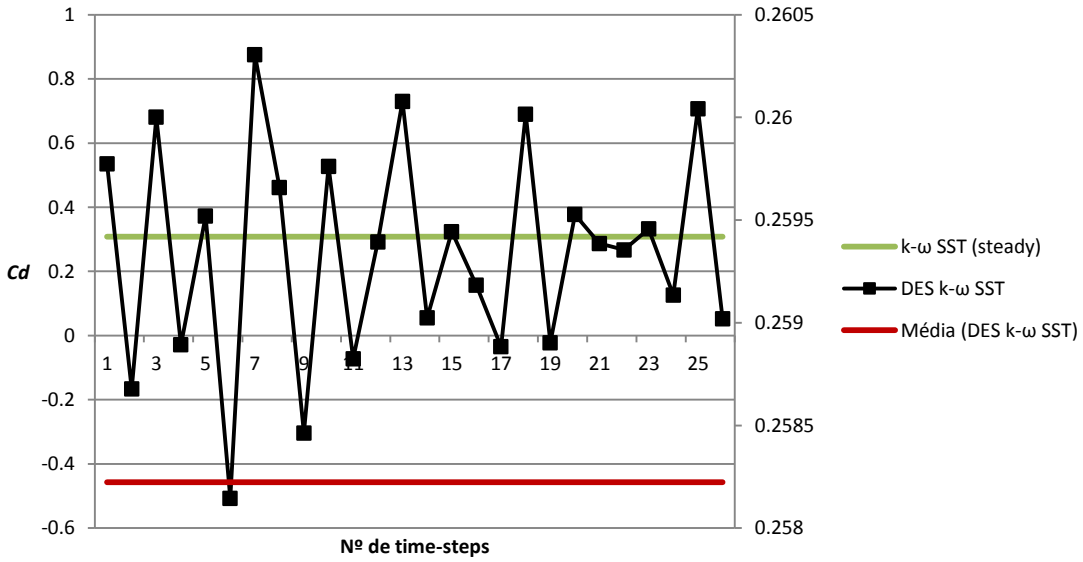


Fig. 34 - Ensaio com o modelo *DES k-ω SST em comparação com o k-ω SST estacionário*.

4.8. Eficiência computacional – cálculo em paralelo

Nesta secção faz-se uma comparação do tempo de processamento dos três casos não-estacionários. Os casos foram montados com a malha D e foram inicializados com o modelo de turbulência $k-\omega\ SST$ estacionário e, só depois de os casos estarem convergidos, lançaram-se a calcular em não-estacionário. Calcularam-se 20 *time-steps* de 80 iterações cada um.

Para efectuar o cálculo usou-se o *cluster* de computação de alto desempenho *Octopus*, com 16 processadores e 16Gb de RAM. Inicialmente cada caso estacionário convergido fez as

primeiras iterações não-estacionárias com apenas um processador em paralelo. Isto permitiu-nos perceber qual a memória utilizada e se podíamos aumentar o número de processadores atribuídos ao processo. Tendo em conta que os casos não estavam a usar a totalidade da memória, passou-se o cálculo para quatro processadores em paralelo.

Na Fig. 35 apresentam-se os três casos não estacionários. Os primeiros *time-steps* em DES duravam entre 3 e 7 horas, ao passo que o modelo URANS durava aproximadamente 3 horas. Quando se lançaram os casos com 4 processadores em paralelo, o URANS reduziu imediatamente o tempo de cálculo para os 30 minutos por *time-step*. Os casos em DES demoraram algumas iterações até começar a reduzir o tempo por iteração. Note-se que cada *time-step* era calculado com 80 iterações.

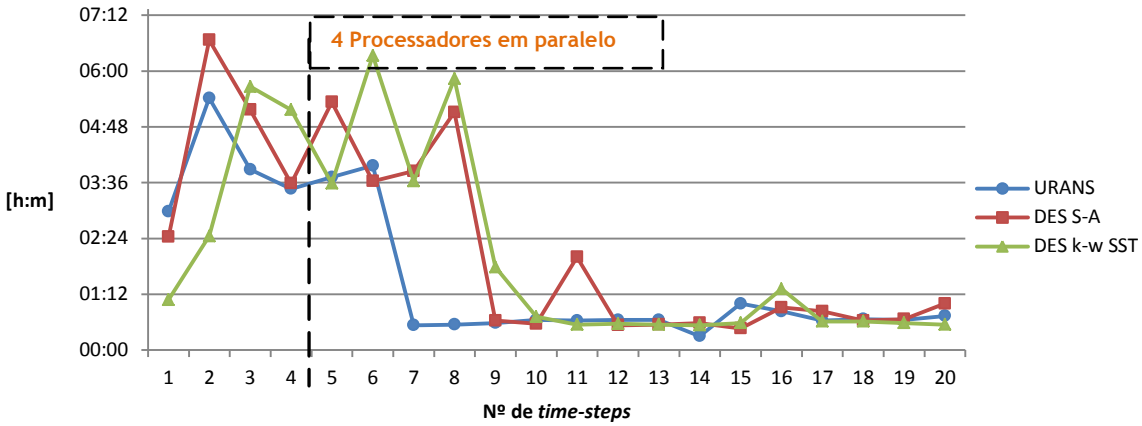


Fig. 35 - Eficiência computacional do cálculo em paralelo.

4.9. Comparação dos resultados obtidos para os vários modelos de turbulência

Nesta secção faz-se uma comparação dos vários modelos testados numericamente para as duas velocidades. Na Tabela 5 e Tabela 6 estão presentes os ensaios efectuados com êxito. Estes permitiram uma melhor visualização dos resultados experimentais e a verificação de qual o melhor modelo numérico a escolher.

Quanto à Tabela 5, e comparando com os resultados experimentais de Ahmed e Ramm (1984), o modelo $k-\omega\ SST$ obteve o melhor resultado com a malha D, seguido do $DES\ \ S-A$ com a malha D. A maior discrepância de resultados, em comparação os resultados numéricos obtidos, foi a obtida com recurso ao modelo $DES\ k-\omega\ SST$, este modelo sobrestimou o Cd em cerca de 14%. Verificou-se que o modelo $DES\ S-A$ foi o que produziu melhores resultados.

Na Tabela 6 apresenta-se o Cd obtido numericamente usando vários modelos de turbulência para $V = 30\ m/s$. Não temos disponíveis resultados para o Cd a esta velocidade. O objectivo fundamental destes cálculos, a $V = 30\ m/s$, era o de comparar as distribuições de Cp com o trabalho de Gilliéron et al. (2010).

Segundo Guilmineau et al. (2011) os modelos DES resultaram em melhores resultados em relação às simulações em RANS, no trabalho usando DES a separação na traseira do corpo de Ahmed é melhor prevista. Contudo, a bolha na inclinação da traseira do corpo, prevista em alguns ensaios experimentais e numéricos, não é prevista em simulações usando DES baseados no modelo $k-\omega\ SST$. Os vórtices laterais previstos numericamente também são menos intensos que os experimentais. Estes autores admitem também que a proporção entre o Cd na zona inferior do corpo e na zona inclinada, não é a mesma e, comparando com o coeficiente de resistência experimental de 0,3993, o resultado numérico está sobrestimado.

Tabela 5 – Ensaios numéricos para diferentes modelos numéricos para a velocidade de 40 m/s.

Modelo	Cd obtido	Resultados publicados	Diferença numérica (%)	Cd exp. a 60 m/s (S.R. Ahmed, 1984)
		LES (Serre, 2011)		
$k-\varepsilon\ RNG$	0.2964	0,317	2,06	0,2985

Modelo	Cd obtido	Resultados publicados	Diferença numérica (%)	Cd exp. a 60 m/s (S.R. Ahmed, 1984)
		LES (Serre, 2011)		
$k-\omega\ Standard$	0,3874	0,317	7,04	0,2985

Modelo		Cd obtido	Resultados publicados		Diferença numérica (%)		Cd exp. a 60 m/s (S.R. Ahmed, 1984)
			(Guilmineau, 2008)	LES (Serre, 2011)			
$k-\omega\ SST$	Malha A	0,3040	0,3012	0,317	0,28	1,3	0,2985
	Malha D	0,3083			0,71	0,87	

Modelo	Cd obtido	Resultados publicados		Diferença numérica (%)		Cd exp. a 60 m/s (S.R. Ahmed, 1984)
		(Yunlong Liu, 2003)	LES (Serre, 2011)			
$Reynolds\ Stress$	0,2766	0,2820	0,3074	0,54	4,04	0,2985

Tabela 5 – (Continuação)

Modelo		Cd obtido	Resultados publicados		Diferença numérica (%)		Cd exp. a 60 m/s (S.R. Ahmed, 1984)
			(Sagar Kapadia, 2003)	LES (Serre, 2011)			
$Spalart - Allmaras$	Malha A	0,2726	0, 3380	0,317	6,34	4,44	0,2985
	Malha D	0,2835			5,45	3,35	

Modelo	Cd obtido	Resultados publicados		Diferença numérica (%)		Cd exp. a 60 m/s (S.R. Ahmed, 1984)
		(Sagar Kapadia, 2003)	LES (Serre, 2011)			
$DES \quad S-A$	0,2918	0,2810	0,317	1,08	2,52	0,2985

Modelo	Cd obtido	Resultados publicados		Diferença numérica (%)		Cd exp. a 60 m/s (S.R. Ahmed, 1984)
		(Emmanuel Guilmineau, 2011)	$DES\ k-\omega\ SST$ (Serre, 2011)			
$DES\ k-\omega\ SST$	0,2582	0,3993	0,343	14,11	8,48	0,2985

Modelo	Cd obtido	Resultados publicados		Diferença numérica (%)		Cd exp. a 60 m/s (S.R. Ahmed, 1984)
		(Guilmineau, 2008)	LES (Serre, 2011)			
$URANS\ k-\omega\ SST$	0,2780	0.3074	0,317	2,94	3,9	0,2985

Tabela 6 – Ensaios para 30 m/s

Modelo		Cd obtido	Cd exp. (S.R. Ahmed, 1984), $V = 60\ m/s$
$k-\omega\ Standard$		0,4322	0,2985
$k-\omega\ SST$	Malha A	0,3063	
	Malha D	0,3110	
$Reynolds\ Stress$		0,2789	

4.10. Previsão dos vórtices na traseira do veículo

Nesta secção iremos comparar os dados publicados por Lienhart e Becker (2002) com os resultados dos vários modelos numéricos calculados.

A Fig. 36 mostra a comparação dos perfis da energia cinética turbulenta (k) no plano longitudinal. Os picos da energia cinética turbulenta estão, como previsto por estes autores, nas pequenas zonas de recirculação na traseira do veículo. Também se pode observar na Fig. 36 e Fig. 37 que o corpo de Ahmed apenas perturba o escoamento exterior a uma pequena distância da sua superfície.

Na Fig. 36 mostra-se a comparação de resultados para três modelos de turbulência com o ensaio experimental de Lienhart e Becker (2002). Não foi possível comparar à mesma escala os três modelos numéricos com o ensaio experimental, contudo foi possível comparar resultados a escalas diferentes e verificou-se que o escoamento tinha comportamentos semelhantes. Dos três casos o que obteve piores resultados foi o $k-\omega\ Standard$. Apesar de prever os vórtices e o seu tamanho, não conseguiu prever a distribuição da energia cinética turbulenta. Comparando os modelos RSM com os resultados experimentais, o modelo RSM prevê melhor do que o modelo $k-\omega\ SST$ a zona de maior energia cinética turbulenta. Contudo, os três modelos conseguem prever com alguma precisão o posicionamento dos vórtices e o seu tamanho.

A previsão do descolamento parcial da camada limite ao longo da inclinação continua a representar um grande desafio para todos os métodos ensaiados. Segundo Serre et al. (2011), só o LES é capaz de prever este pequeno descolamento da camada limite. O desenvolvimento do escoamento, colado ou descolado sobre a inclinação, está fortemente ligado ao cálculo correcto da camada limite na inclinação, bem como à determinação adequada da intensidade dos vórtices laterais. Nenhum dos métodos testados previu essa pequena bolha de separação no início da inclinação, apesar de no caso do modelo RSM haver uma pequena zona no topo da inclinação com um maior valor de k.

4.11. Visualização do escoamento na geometria do corpo de Ahmed

Até agora analisou-se apenas o escoamento a duas dimensões, pelo que era difícil compreender o comportamento associado à tridimensionalidade dos vórtices. Logo se percebeu que era importante visualizar este comportamento em toda a sua plenitude. Nas Fig. 38 e 37 apresenta-se a comparação de resultados usando a malha D e o modelo $k-\omega\ SST$. Na Fig. 38 apresenta-se o tubo de corrente que origina os vórtices laterais. O escoamento contorna a parte frontal do corpo, e avança colado junto à geometria até se separar perto do início da inclinação.

A Fig. 39 mostra a comparação entre os vórtices determinados experimentalmente por Ahmed e Ramm (1984), imagem da esquerda, e os vórtices obtidos numericamente (imagem central e da direita). Pode-se verificar que o modelo numérico conseguiu prever a localização e magnitude dos três vórtices com razoável precisão.

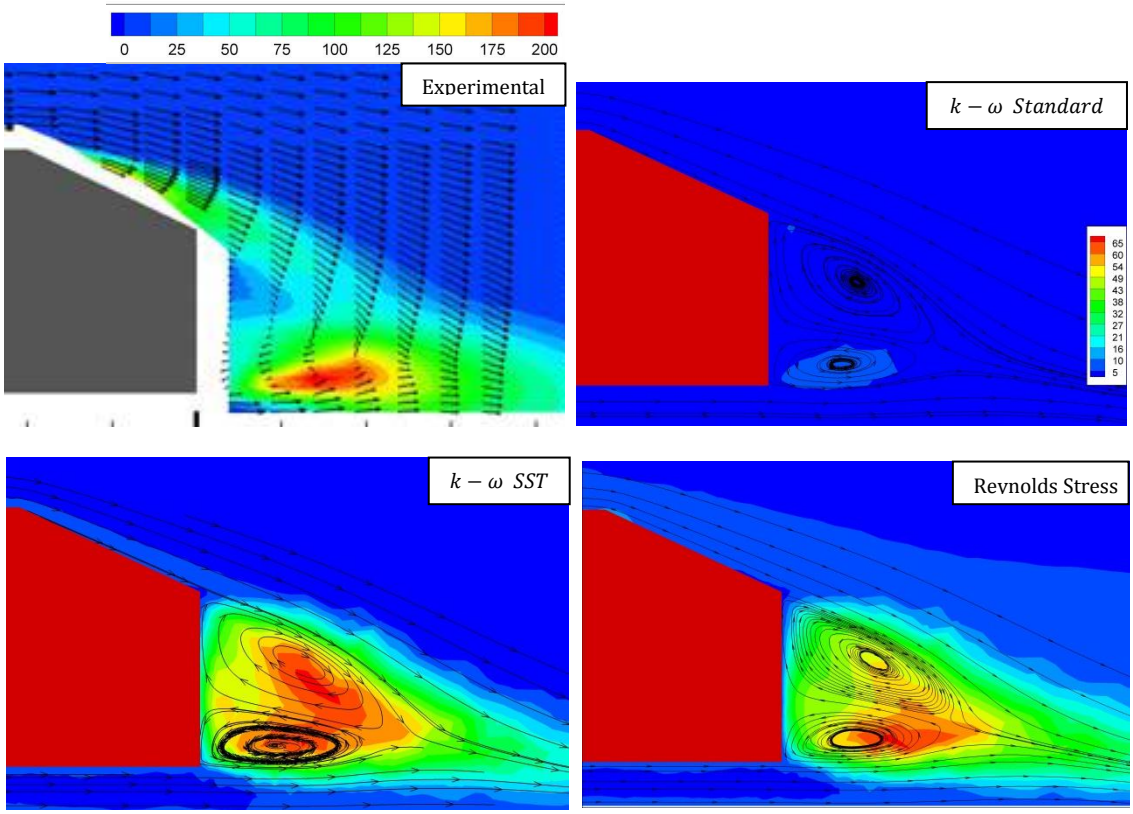


Fig. 36 – Contornos da energia cinética turbulenta, *k*, ao longo do plano longitudinal do corpo de Ahmed. As simulações numéricas obtidas prevêem uma maior área da turbulência que o caso experimental.

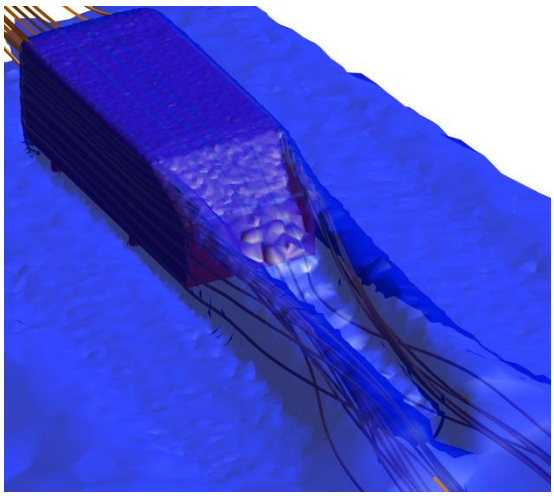


Fig. 37 – Energia cinetica turbulenta na traseira do corpo de Ahmed.

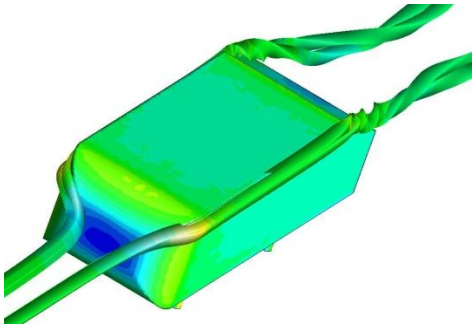


Fig. 38 – Tubo de corrente que origina os vórtices laterais. O escoamento vem colado junto ao corpo de Ahmed e assim que chega à zona inclinada geram-se dois vórtices. Note-se que os dois tubos de corrente foram colhidos na origem em pontos ligeiramente diferentes, pelo que não são simétricos.

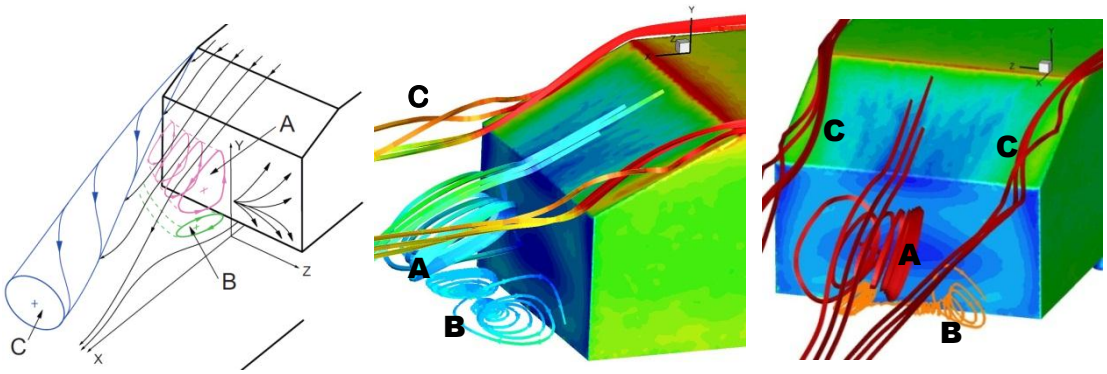


Fig. 39 – Resultados obtidos usando o modelo turbulência *k-ω SST* . Pode-se constatar que o modelo conseguiu prever os três vórtices descoberto experimentalmente por Ahmed e Ramm (1984).

Capítulo 5

Modelação do escoamento no veículo UBIAN10

Um dos principais objectivos deste trabalho foi a análise do escoamento em torno do UBIAN10. Este veículo participou em 2010 na competição *Shell Eco-marathon Europe* em representação da Universidade da Beira Interior, que decorreu em Leipzig, na Alemanha. Numa primeira fase fez-se a análise das áreas problemáticas do UBIAN10, nomeadamente das zonas de estagnação e zonas com geração de vórtices. A segunda fase englobou a correcção da sua geometria tendo em vista a obtenção de um veículo com uma melhor performance aerodinâmica.

Utilizando os resultados numéricos obtidos para o escoamento tentou-se alterar a geometria do veículo UBIAN10 com vista à obtenção de um melhor desempenho aerodinâmico. Embora fosse preferível a criação de uma geometria mais aerodinâmica de raiz, isso não foi possível. As alterações efectuadas estavam limitadas pelas regras da competição (Eco-marathon, 2010a) (Eco-marathon, 2010b), pelo orçamento da equipa, pelo tempo de construção e pela estrutura interior do veículo onde se iria fixar a nova carcaça. Em termos de dimensões, o carro teria de ter 120 a 130 cm de largura, 220 a 350 cm de comprimento e a altura do veículo ao solo teria de ser maior que 10 cm. Além disso, o peso do veículo não deveria ultrapassar, excluindo o condutor, os 205 kgf.

5.1. Ensaio experimental e apresentação da geometria do UBIAN10

Quando um veículo se desloca no ar há quatro grandes forças que actuam sobre ele: a força de tracção e as três forças que se opõem ao movimento do veículo (resistência do ar, resistência de rolamento e efeito da inclinação da pista). As forças que provêem da resistência do ar e da resistência de rolamento são perdas puras. As forças que provêem do efeito da inclinação da pista e a aceleração são, por outro lado, forças conservativas com a possibilidade de, pelo menos parcialmente, serem recuperadas.

O UBIAN10 foi desenhado e construído pela Universidade da Beira Interior. Embora a prova principal seja sobre o consumo de combustível, há outras modalidades da competição, nomeadamente a componente de *design* dos veículos. Em 2010, desenvolveu-se um veículo

que tivesse um bom aspecto estético e um bom acabamento, para que pudesse concorrer na prova de consumo e de *design*. Em resultado disso não houve um cuidado muito grande com o desempenho aerodinâmico. Ao observar o veículo da Fig. 40, pode-se concluir que as zonas que poderão ter maior influência no seu desempenho aerodinâmico são a zona frontal, os dois canais na frente e as laterais de forma côncava.

Fig. 40 - Veículo UBIAN10. As zonas que poderiam afectar mais o escoamento eram a parte frontal, os canais junto das rodas da frente e a lateral côncava.

O veículo, após a competição de 2010, ainda estava em boas condições para ser usado como caso de teste para a análise aerodinâmica.

O ensaio experimental pode ser feito em túnel de vento ou em pista. Neste caso, optámos por tentar efectuar o ensaio em pista, apesar da sua enorme dificuldade. Um dos métodos mais conhecidos para efectuar o ensaio em pista é o *coast-down (Joel A. Walter, 2001, M. E. Biancolini, 2007)*. No entanto, o uso de métodos de *coast-down* não é adequado para determinar o coeficiente de resistência para condições de baixos números de *Reynolds*, isto porque apenas dá um valor médio para o coeficiente de resistência. Recordemos que os resultados numéricos foram obtidos para uma única velocidade constante, por isso devemos comparar o coeficiente de resistência para essa velocidade.

Devido a estas condicionantes o ensaio experimental foi feito de outro modo. O ensaio consistiu em traccionar o veículo a uma velocidade constante com uma cúpula protectora que se pôde retirar mais tarde. O veículo era traccionado através de um cabo e a força foi determinada com uma célula de carga, com capacidade de 50 N, aplicada na parte frontal do veículo (Fig. 41 b) e c)). Um sensor de *Hall* foi aplicado numa das rodas traseiras para medir a velocidade. A célula de carga e o sensor de velocidade estavam por sua vez ligados a um computador portátil através do um *Picoscope* (Pico-Technology, 2011) que serviu para adquirir dados (Fig. 42). Este sistema permite converter os sinais analógicos em digitais.

A célula de carga foi adaptada de uma balança electrónica comercial (Fig. 41 a)). Após inspecção ao circuito electrónico da mesma, verificou-se que este era baseado num Amplificador Operacional LM124 da *National Instruments*. Depois de efectuado um ensaio de força identificou-se qual a porta que correspondia à saída amplificada do amplificador de instrumentação. Esta saída foi ligada ao *Picoscope* para efeitos de digitalização da força medida.

O sensor de *Hall* é composto por uma bobine que detecta a passagem de campos magnéticos. Numa das rodas traseiras foram distribuídos magnetos igualmente espaçados a um raio de 10cm (Fig. 43). O sensor de *Hall* fornece um pulso de tensão sempre que um dos magnetos se aproxima dele. Este sinal pulsado é também digitalizado usando o *Picoscope*. O *Picoscope* permitiu guardar em ficheiros os valores digitalizados da tensão eléctrica correspondente à força e aos pulsos do sensor de *Hall*, assim como o tempo.

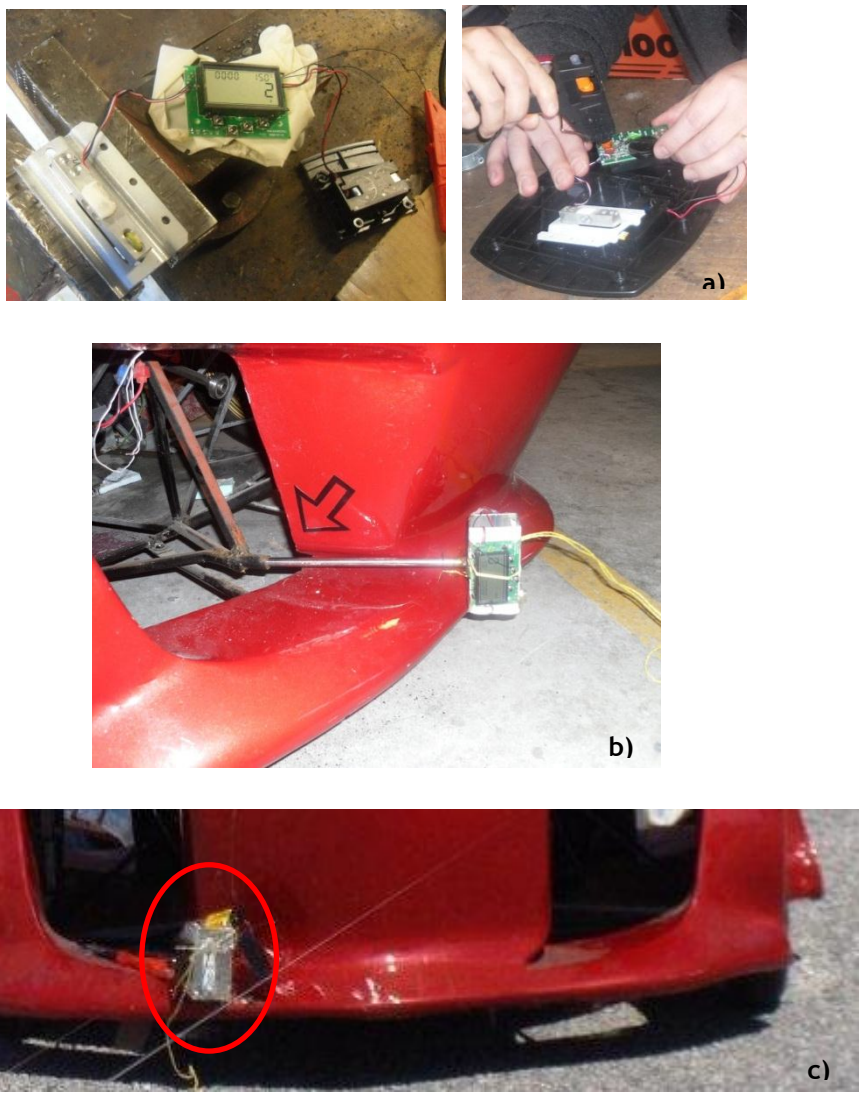


Fig. 41 – Nesta figura temos: adaptação da célula de carga com capacidade de 50N de uma balança comercial em a), e célula de carga aplicada na frente do veículo em b) e c).

Fig. 42 – *Picoscope* utilizado nas medições, este tem entradas analógicas e uma saída USB que liga ao computador portátil (Pico-Technology, 2011).

Fig. 43 – Roda com os quatro magnetos.

Com vista a poder converter os valores da tensão eléctrica em grandezas de força e velocidade foi construído um programa em *Matlab*. O código permite converter os valores da tensão eléctrica, referentes à força, no valor real da força usando uma recta de calibração que foi construída antes dos ensaios. A determinação da velocidade foi obtida calculando a tempo entre os picos de tensão, o que permitiu determinar a frequência dos pulsos e a velocidade tangencial da roda. Os valores da força e velocidade são posteriormente filtrados usando um filtro passa-baixo implementado no código *Matlab*.

Na Fig. 44 pode observar-se um dos gráficos das medições da força de tracção e velocidade. A forma do gráfico tem a ver com o facto de se ter começado a adquirir dados desde o início do ensaio até ao veículo parar. Existe uma rampa de aceleração, no início do ensaio, uma zona de velocidade constante e no fim, uma rampa de desaceleração. Em termos de valores, interessa-nos apenas o patamar da velocidade constante, visto que temos de comparar com os valores numéricos, que também são calculados para velocidade constante.

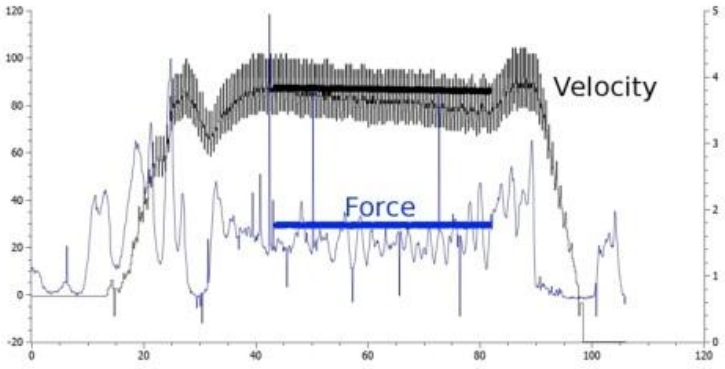


Fig. 44 – Gráfico das medições da força obtidas com a célula de carga e com o sensor de velocidade. Pode-se observar o patamar de velocidade e força constante como pretendido.

Tendo em conta que apenas queríamos a força de resistência aerodinâmica, e que no ensaio de tracção temos a resistência total que actua sobre o veículo, isolou-se esta componente traccionando-se o veículo com uma cúpula. A componente aerodinâmica foi assim obtida subtraindo a resistência de rolamento à resistência total (Fig. 45 e Fig. 46). A fórmula usada para isolar a força de resistência aerodinâmica foi:

$$F_{resistência\ aerodinamica} = (F_{sem\ shield}) - (F_{com\ shield}) \quad \textbf{(5.1)}$$

$$F_{resistência\ aerodinamica} = (F_{resistência\ aerodinamica} + F_{rolamento}) - (F_{rolamento}) \quad \textbf{(5.2)}$$

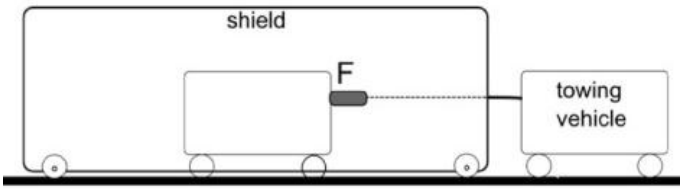


Fig. 45 – Representação esquemática onde é possível observar a estratégia idealizada para poder efectuar as medições necessárias. Este conjunto era composto por um veículo que traccionava o UBIAN10 (com ou sem escudo), por meio de um cabo de tracção.

Foram efectuados ensaios para várias velocidades para além da que é usada no presente trabalho. De referir que esta componente do trabalho faz parte do programa de trabalhos relacionado com a optimização do desempenho do veiculo UBIAN10.

Estudou-se também, usando esta metodologia, a resistência de rolamento em função da velocidade. Estas componentes do ensaio foram trabalhadas e investigadas por outros elementos da equipa do UBIAN10. A equipa que desenvolveu este trabalho incluiu os Professores Fernando Santos, Francisco Brójo e Paulo Fael. Os ensaios experimentais foram

ainda desenvolvidos com a colaboração dos alunos Francisco Navio, Tiago Carrola, Bruno Pontes e Nuno Rodrigues.

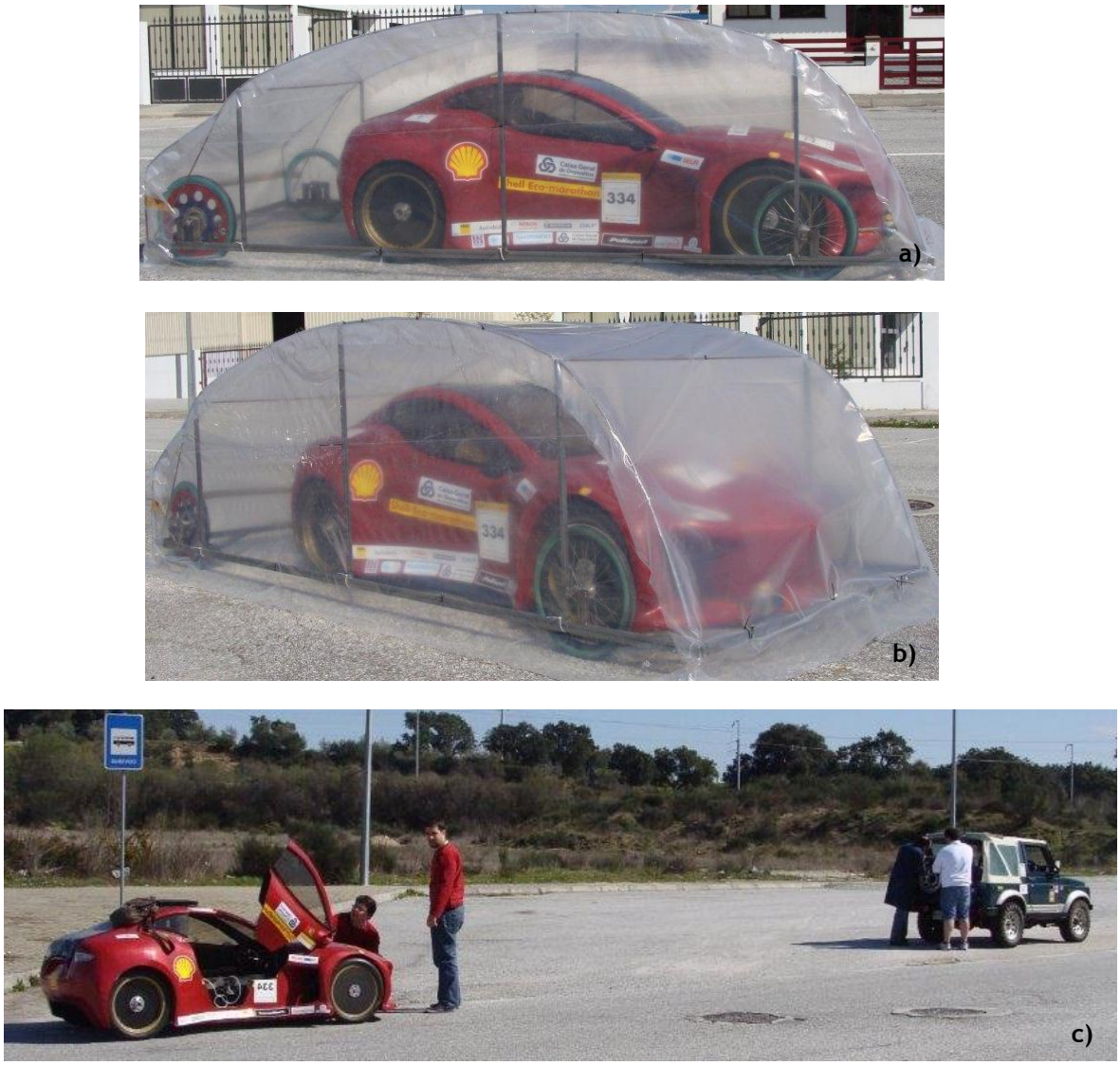


Fig. 46 – O veículo UBIAN10 é traccionado através de um cabo com uma célula de carga aplicada na frente do veículo. Traccionou-se o veículo com e sem escudo, de modo a obter a resistência aerodinâmica. Podemos observar o UBIAN10 com o escudo (em a) e b)) e o UBIAN10 sem escudo com o veículo de tracção (em c)).

5.2. Criação da malha para modelar computacionalmente o UBIAN10

O UBIAN10 possui uma geometria muito mais complexa do que o corpo de Ahmed e, por isso, a criação da malha foi mais morosa, para além de requerer uma malha bastante refinada. Devido ao facto de ser uma geometria mais complexa usaram-se malhas não estruturadas uma vez que se adaptam com maior facilidade à geometria (Elsey, 2005). Surgiram enormes problemas logo no início dos trabalhos. O primeiro problema teve a ver com a importação da geometria do UBIAN10 na forma de *database* para o *Pointwise*, sendo que esta tinha sido

criada previamente em *Rhinoceros*. Quando a geometria da *database* era importada surgiam nesta múltiplas linhas sobrepostas, que não eram logo detectadas (Fig. 47). Só fazendo uma grande aproximação à geometria é que era possível verificar que o que antes aparentava ser um simples conector eram na verdade 2 ou 3 conectores sobrepostos. É possível observar esses casos na Fig. 47, onde havia conectores sobrepostos e, em particular na Fig. 47 b) marcado com a linha preta, o ponto onde se intersectavam esses conectores estava afastado da geometria.

A forma usada para resolver este problema foi, nas zonas mais problemáticas, fazer um *merge* dos conectores. Esta opção do *Pointwise* permite unir conectores próximos até uma distância atribuída pelo utilizador. No entanto é necessário ter atenção redobrada, uma vez que esta técnica unia todos os conectores que estivessem sobrepostos, ou a essa pequena distância. Por isso foi preciso usar o *merge* praticamente conector-a-conector tendo o cuidado para não distorcer a geometria.

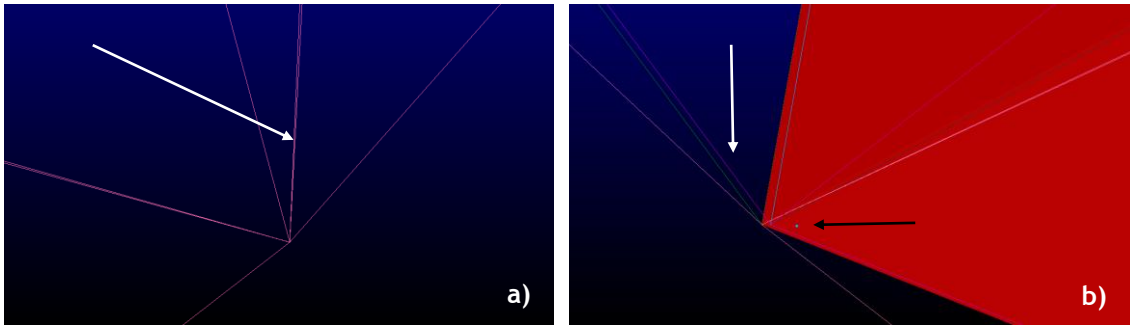


Fig. 47 – Quando se importava a *database* do *software Rhinoceros* para o *Pointwise*, esta surgia com vários conectores sobrepostos que só eram detectados quando se ampliava a geometria.

Na Fig. 48, marcadas a vermelho, estão as zonas que se revelaram mais problemáticas durante a criação dos domínios e a distribuição dos pontos. Estas zonas tiveram atenção redobrada, uma vez que eram zonas que tinham conectores em comum. Note-se que ao distribuir nós para uma zona da malha isso iria afectar automaticamente a distribuição dos nós noutra zona da malha, afectando a *skewness*.

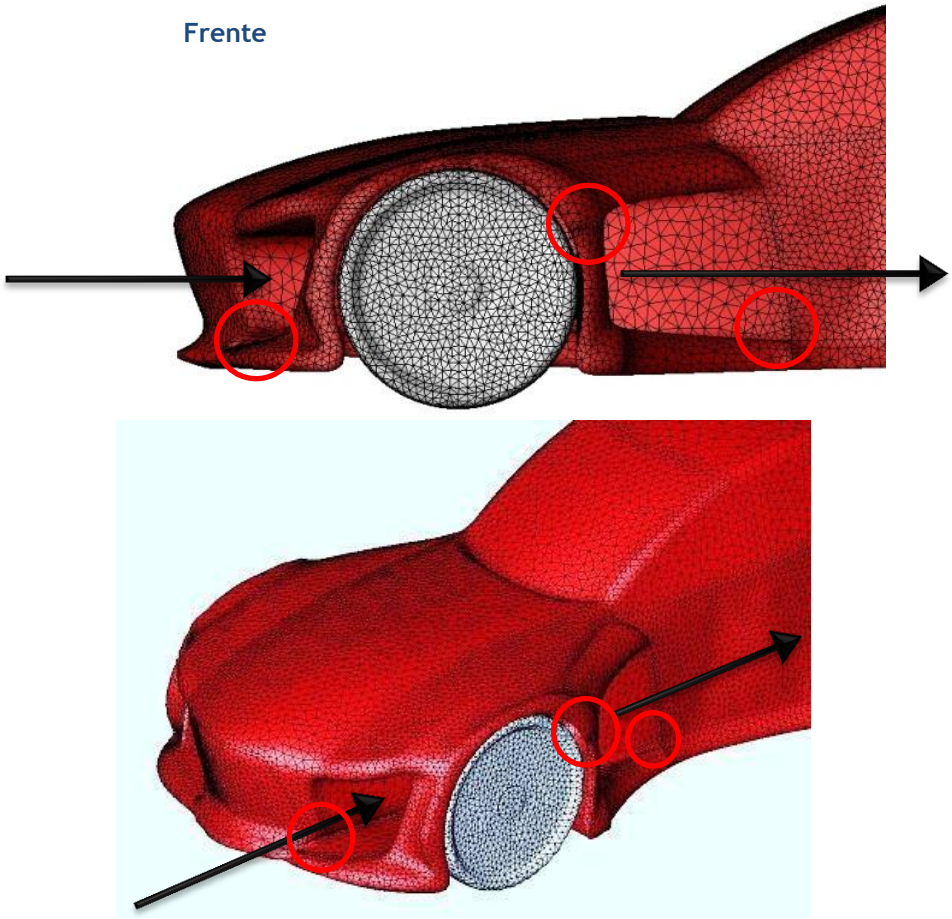
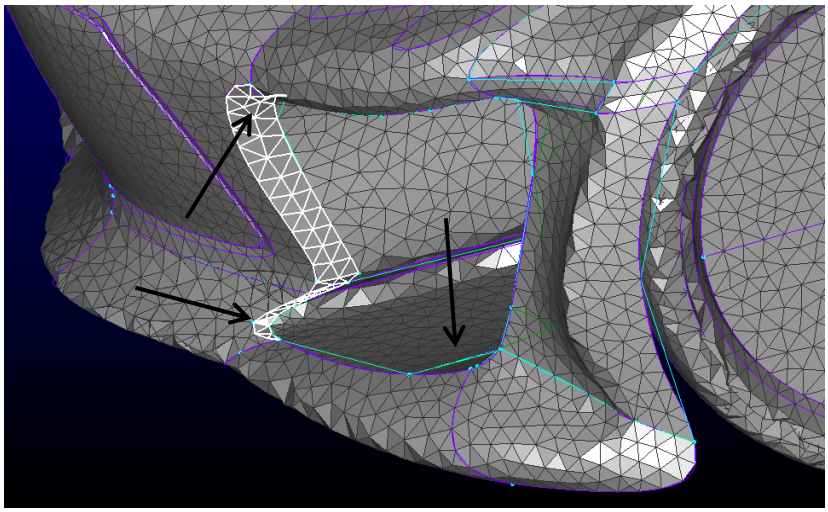


Fig. 48 – Zonas problemáticas na geração dos domínios. O facto de os domínios terem conectores em comum dificultava a tarefa da distribuição de pontos.

Durante a geração das malhas (ou domínios), houve muitos outros tipos de problemas. O *software Pointwise* tinha alguma dificuldade em "ver" o domínio a ser criado devido à complexidade da geometria (indicado com as setas na Fig. 49). Na Fig. 49 a), referente à parte frontal do UBIAN10, está marcado a branco, um domínio que teve de ser feito com muito cuidado. Foi necessário criar este domínio em separado, dado que se fizéssemos a malha ao longo do canal todo ela apresentava distorções. A estratégia utilizada consistiu em segmentar os conectores e o domínio, na parte onde surgiam mais problemas. Nesta imagem ainda se pode ver um conector antigo a sair da geometria. Quanto à Fig. 49 b), que é uma imagem do fundo do carro, havia uma sobreposição de domínios e uma distorção entre eles. A estratégia optada foi dividir e redistribuir a malha, mesmo assim havia dificuldades em a malha se ajustar perfeitamente à geometria.

a)



b)

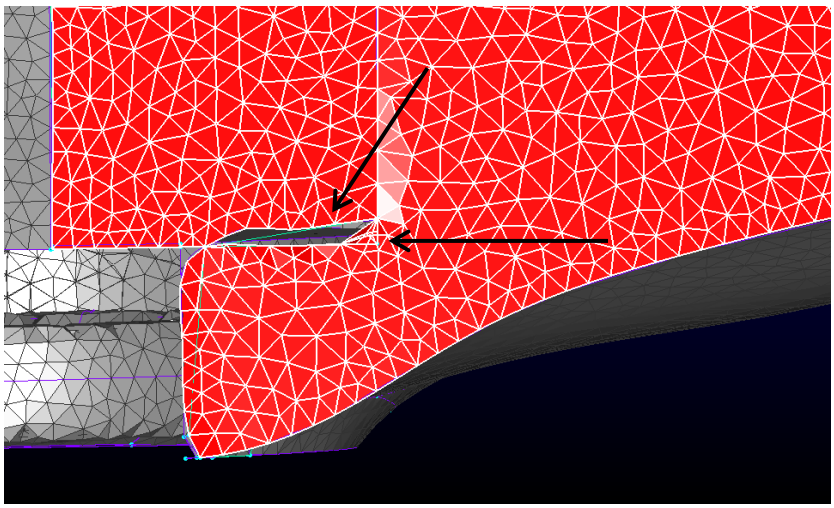


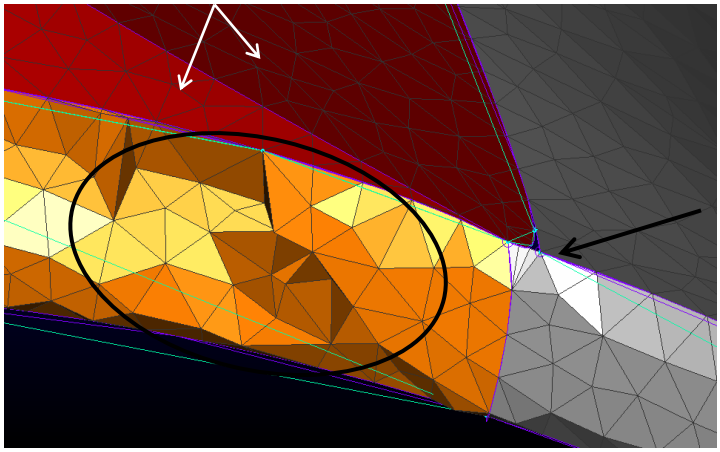
Fig. 49 – Na imagem da cima temos a parte frontal do veículo com o pormenor da malha no canal. Na imagem de baixo temos o fundo veículo, junto às cavas das rodas.

Na Fig. 50 encontram-se mais dois exemplos de problemas ocorridos durante a criação da malha. Nas imagens podemos ver o "enrugamento" da malha na zona a dourado (Fig. 50 a)) e na zona da roda (Fig. 50 b)). Esta situação era normalmente resolvida com a passagem de ferramentas denominadas *refine* e *decimate,* que reajustavam os elementos à forma da *database*. Quando estas duas ferramentas não eram suficientes tinha de reorganizar-se, redistribuir e alterar o número de nós. Outro problema que surgiu, e que se pode analisar na figura Fig. 50 a), marcada com a seta, tem a ver com a reunião de vários conectores no mesmo ponto. Neste caso, que era uma zona com uma ligeira concavidade, ao colocar mais pontos o conector ajustava-se melhor à geometria. No entanto, ao colocar mais pontos, isso iria interferir com a qualidade do resto da malha e aumentar o peso computacional. Isto demonstra que durante todo os processos de criação de malhas é necessário ter sempre um cuidado extremo ao refinar as malhas e distribui-las homogeneamente.

Há outra questão que pode introduzir problemas numéricos, e que se pode observar nas duas malhas vermelhas na Fig. 50 a), marcado com as setas brancas. Nestas situações, em que as malhas têm um ou mais conectores em comum, ocorrem problemas na distribuição dos seus nós. Isto porque uma boa distribuição de nós para uma malha não significa que o seja para a outra. A solução encontrada foi fraccionar o conector em questão, e ir alterando o numero de nós e a sua distribuição até obter bons resultados. Este processo de tentativa e erro foi feito com extremo atenção, tendo em conta que cada lado do carro e cada zona tinha as suas particularidades.

Quanto à da Fig. 50 b), a área marcada com o círculo preto, na zona da roda, mostra uma falha na malha. Embora se tenha criado a malha em toda a roda esta zona ainda apresentava falhas, pelo que houve a necessidade de refazer a malha e redistribuir os nós. A seta branca mostra uma zona que, tal como na imagem da esquerda, demonstra uma malha que não é homogénea e regular.

a)



b)

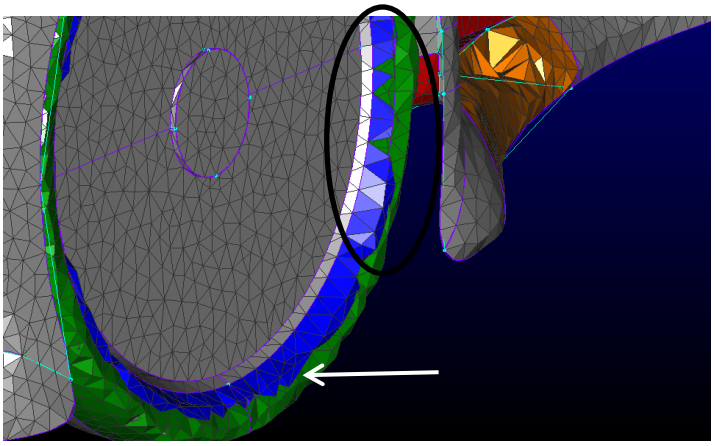


Fig. 50 – Pormenor das zonas problemáticas do UBIAN10. Podem-se observar irregularidades na malha, malhas com conectores em comum e falhas na malha.

Era nosso objectivo efectuar o estudo do UBIAN10 para várias configuração de escoamento, pelo que se preparou a malha do veículo de modo a ter que efectuar apenas pequenas

alterações nas configurações do *solver Fluent*, não havendo assim necessidade de refazer a malha para outras configurações do escoamento.

Uma das considerações a ter neste estudo é a análise da influência dos canais na aerodinâmica do UBIAN10. Inicialmente os canais foram fechados com malhas, uma na entrada e outra na saída do canal. Posteriormente, no *Fluent* apenas se tinha que alterar as condições fronteira, mudando estas quatro malhas de *interface* (canais abertos) para *Wall* (canais fechados) (Fig. 51). A partir destes resultados pôde-se analisar a influência dos canais no escoamento.

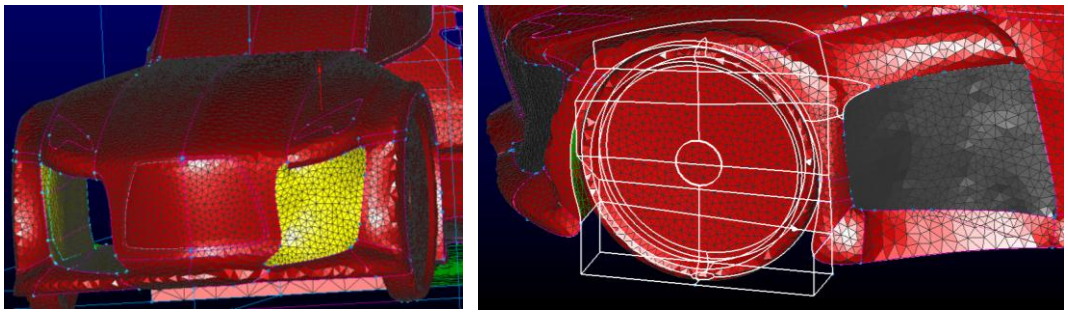


Fig. 51 – Parte frontal do veículo onde se colocou uma malha a tapar os canais (a amarelo e cinzento). Foi deixado um canal aberto e outro fechado para ajudar na visualização, mas no caso calculado estão os dois fechados.

5.3. Criação dos blocos da malha para o UBIAN10

O processo de geração de malhas e blocos para o corpo de Ahmed foi aqui replicado para o UBIAN10, sendo que, neste ultimo, o processo é mais moroso e complexo. Na geração dos blocos para este veículo tínhamos o problema acrescido de ser difícil usar o *software* para visualizar o problema como um todo. Assim, foi necessário dividir o carro em vários blocos para contornar este problema. O veículo foi inicialmente dividido em cinco blocos, mas estes não foram suficientes para resolver o problema devido a duas causas: a) selecção dos domínios e b) problemas com a geração dos elementos tridimensionais de volume dentro dos blocos. Ambos os problemas se relacionaram com a dificuldade do *software* "ver" os domínios seleccionados como um bloco. Este problema tinha origem na orientação das normais às faces (direccionadas para o interior ou exterior do bloco). Foi solucionado este problema diminuindo o tamanho dos blocos e dividido o problema em partes, facilitando a observação da zona que estaria a ocasionar problemas.

Como já referido em secções anteriores, o modo encontrado para constringir a malha junto à geometria foi a criação de blocos mais próximos desta, para isso, no caso do corpo de Ahmed, este foi divido em 3 partes usando conectores auxiliares colocados na geometria. No caso do

UBIAN10 surgiram problemas com a geração dos domínios, por isso não era conveniente tornar a sua geometria ainda mais complexa com conectores auxiliares. Estes conectores auxiliares serviriam para gerar domínios fictícios que, por sua vez, iriam gerar os blocos. A estratégia encontrada consistiu na utilização dos conectores do próprio veículo, e essa é a razão de alguns dos conectores não serem completamente direitos. É possível observar na Fig. 52 as setas brancas que indicam um desses conjuntos de conectores. As setas amarelas apresentam os conectores auxiliares que ligam o veículo ao solo permitindo gerar os domínios do bloco a laranja.

Na Fig. 52 é possível observar a verde a caixa que foi usada para isolar o interior da cava da roda e a roda. Como já referido, esta simplificação dos problemas permitiu tratar cada uma das zonas isoladamente. Este volume apresentou alguma dificuldade no processo de geração dos blocos porque inicialmente ele estava incluído no bloco que dividia o veículo. Mas os domínios das rodas, juntamente com os domínios das cavas e da superfície do carro, introduziram problemas de orientação das normais à superfície, e por isso, quando se tentava gerar os elementos tridimensionais dentro do bloco, o *software* dava erro. A solução encontrada foi fazer um bloco que englobasse apenas a roda e a cava da roda, mas para isso essa zona teria de ser fechada até ao solo. No fundo, o que se fez foi usar os domínios existentes e domínios auxiliares para fechar essa zona e gerar o bloco da Fig. 53. Na Fig. 53 a), marcado com a seta preta, é possível ver que as rodas de trás do veículo têm parte do cubo da roda saída. Nesta situação houve a necessidade de, tal como indica a seta da Fig. 53 b), criar-se outro domínio auxiliar para que a roda e o cubo da roda ficassem dentro desta caixa que define um bloco.

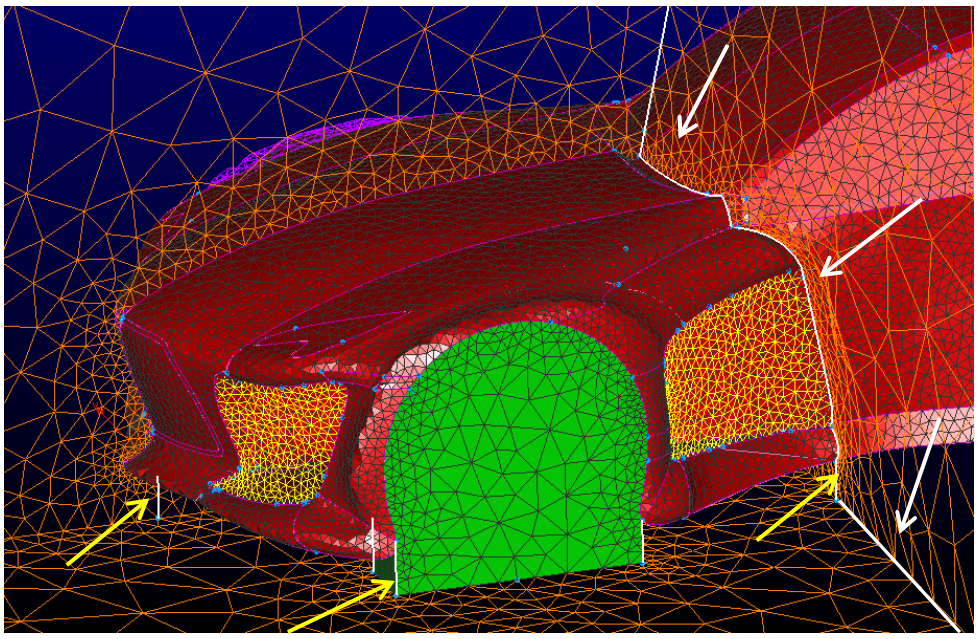
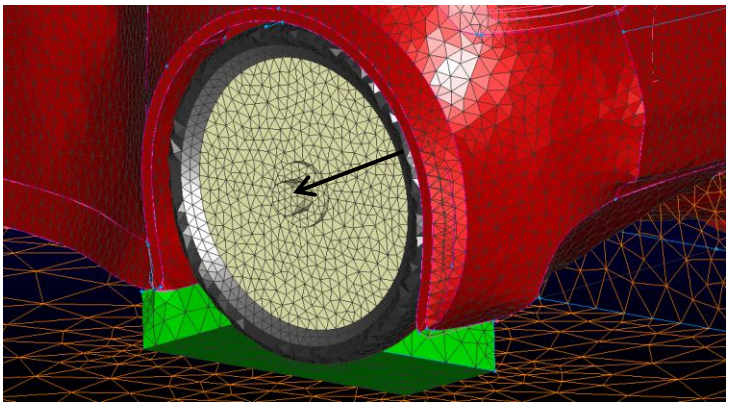


Fig. 52 - Pormenor de um dos blocos da frente do veículo. As setas brancas referem-se à linha do veículo. As setas amarelas mostram os conectores que ligam o veículo ao solo. Uma forma de isolar

os problemas durante a geração da malha e blocos foi dividir o veículo por zonas, nesta zona observa-se o bloco que inclui a cava da roda e a roda do carro.

a)



b)

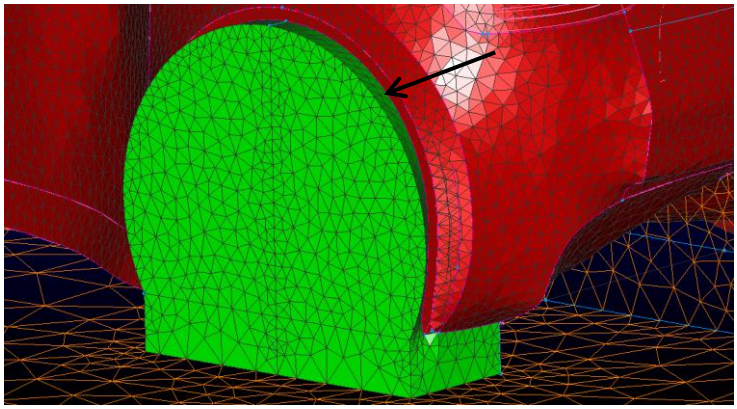


Fig. 53 – No caso das rodas traseiras o cubo da roda saía da geometria, pelo que teve de se usar um domínio extra (imagem de cima), isto permitiu que houvesse espaço para gerar o bloco sem intersecções entre blocos.

5.4. Imposição de condições fronteira no modelo numérico do UBIAN10

Para introduzir as condições de fronteira foi criada uma fronteira global exterior de modo semelhante ao efectuado para o corpo de Ahmed, Fig. 21.

As condições de fronteira impostas nas faces do volume de controlo global foram as seguintes: a velocidade foi imposta a montante assumindo um valor constante e está em sintonia com as velocidades obtidas nos ensaios experimentais. A velocidade imposta a montante foi de 6,94 m/s, a intensidade de turbulência foi 0,25 % e uma escala de comprimento da turbulência de 1% da altura do veículo. Esta velocidade foi escolhida pois, com base nas competições dos anos anteriores, a velocidade média em pista era de 6,94 m/s. Na face a jusante impôs-se uma saída do escoamento permitindo que o escoamento não tivesse pontos de estagnação e não interferisse nos resultados. Em relação ao topo e laterais da caixa que define o volume global foi imposta a mesma velocidade da entrada, de modo a que o caso convergisse mais

rapidamente, esta velocidade tinha apenas uma componente, a do eixo dos xx. O modelo e o solo foram considerados paredes. O facto de, logo no início do projecto da malha, termos definido nomes para as faces mais importantes permitiu impor mais facilmente as condições de fronteira, e analisar a influência de cada elemento numa fase posterior deste estudo.

No modelo numérico colocou-se também uma *rotational Wall* com velocidade relativa. Esta condição introduz no pneu a rotação a uma velocidade angular de 50,48 rad/s, centrada no eixo da roda (Fig. 54).

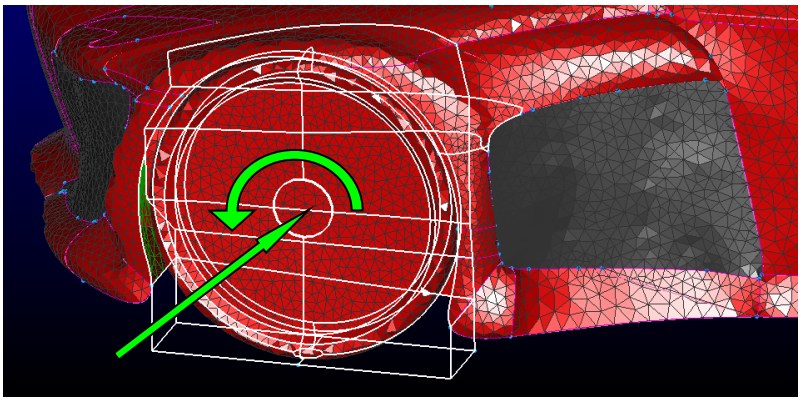


Fig. 54 - Diagrama da *rotational Wall* com velocidade relativa. Esta condição de fronteira impõe no pneu a rotação a uma velocidade angular, e é centrada no eixo da roda, permitindo assim observar a interacção do escoamento nas rodas, bem como o comportamento destas dentro da cava das rodas.

5.5. Resultados numéricos obtidos para o UBIAN10

Nesta secção apresentam-se os resultados para três configurações do escoamento calculadas para o UBIAN10. Este estudo serviu para analisar o escoamento em torno deste veículo e verificar as zonas que pudessem influenciar negativamente o escoamento. O UBIAN10 na versão que foi competir à Alemanha tinha redes a tapar os canais, e por isso era importante saber qual a sua influência no escoamento (Fig. 55). O facto de, durante a montagem do ensaio numérico, se terem colocado malhas na entrada e saída dos canais permitiu que se pudessem fazer pequenas alterações às suas condições fronteira. Estas condições fronteira foram: *interface* para canais abertos, *Wall* para canais fechados e *permeability* para os canais com rede. Para a permeabilidade, fez-se uma medição da área de um elemento aberto e, seguidamente, fez-se uma contagem destes elementos numa área de 100 cm^2 (Fig. 55). Após os cálculos verificou-se que a permeabilidade sólida da rede era de 0,287 cm^2.

Nesta secção faz-se a comparação entre os resultados obtidos para o veículo nas três configurações de escoamento: veículo com canais abertos, com rede na entrada e saída dos canais, e com os canais tapados. Este estudo permitiu analisar a influência destes canais no escoamento do veículo e no coeficiente de resistência.

A simulação numérica utilizou o modelo de turbulência $k-\omega\ SST$. A velocidade imposta a montante foi 6,94 m/s. Esta velocidade é uma das velocidades que foi ensaiada experimentalmente. O ensaio numérico e experimental, com a mesma velocidade e as mesmas condições, permitiu-nos aferir os resultados.

Na Fig. 56 mostra-se um corte longitudinal do UBIAN10. Pode examinar-se a distribuição de velocidade e as linhas de corrente. A partir destes elementos pode-se também observar uma zona de estagnação na frente do veículo e a geração de dois vórtices na traseira no veículo. Na Fig. 57 e Fig. 58 é possível observar mais detalhadamente o escoamento que percorre o UBIAN10.

Na Fig. 57 estão apresentadas vistas de topo e laterais para os três casos ensaiados. Estas imagens permitiram analisar mais facilmente o comportamento do escoamento e os vórtices formados. Na vista de topo do caso a-) é possível ver as zonas de estagnação, anteriormente previstas, na frente e laterais do veículo. A formação de vórtices nas laterais é notória no caso dos canais fechados, enquanto nos casos a-) e b-) não é possível observar nenhum. Também no caso c-), há uma menor perturbação do escoamento junto às rodas traseiras. Isto deve-se ao facto de o escoamento não circular nos canais como nos casos anteriores. Também se confirma uma maior zona de estagnação na frente do veículo, e uma menor zona nas laterais. Os canais fechados fizeram com que surgisse uma maior zona de pressões negativas junto à saída do canal, permitindo assim a geração destes dois grandes vórtices. Os vórtices estão melhor expostos na vista lateral. Os casos a-) e b-) têm praticamente o mesmo tipo de vórtice vertical junto à saída do canal, enquanto no caso c-) há a formação de grandes vórtices nas laterais.

Na Fig. 58, estão presentes visualizações a três dimensões do escoamento em torno do UBIAN10. No caso a-) e b-) geram-se vórtices junto à saída do canal. Apesar de no caso b-) o escoamento estar condicionado pela rede, este tem o mesmo comportamento que o caso com os canais abertos. Quanto ao caso c-) geram-se maiores vórtices e, analisando as linhas de corrente, é possível vê-las a serem puxadas para a zona côncava na lateral do veículo. A imagem d-) mostra mais em pormenor a formação de vórtices na traseira do veículo. A formação de vórtices na traseira do veículo é afinal muito similar nos três casos. Há formação de dois vórtices junto aos faróis traseiros, outros dois mais abaixo e ainda um vórtice central. Os dois vórtices junto aos faróis seguem o sentido do escoamento, enquanto nos outros três ocorre recirculação.

Como primeiro impacto da visualização das três imagens da Fig. 60 surge logo a imagem do carro com os canais fechados, com a grande área de estagnação. Tapando-se os canais aumentou-se a zona de estagnação na frente do veículo. O escoamento no veículo ensaiado com as redes nos canais introduz uma redução da velocidade à passagem do ar por estas, mas é menor do que no caso dos canais fechados. Comparando as imagens referentes às laterais dos veículos constata-se que é o veículo com os canais fechados que tem menor área de

estagnação do escoamento nessa zona. Isto deve-se ao facto de o escoamento que circulava nos canais, e incidia naquela zona côncava, ter sido evitado com o fecho dos canais. Mas o fecho dos canais também fez com que se gerassem grandes vórtices onde antes não existiam.

O comportamento do escoamento do UBIAN10 para a situação com os canais abertos e com rede é muito similar. Assim optamos por apresentar uma imagem diferente do escoamento (Fig. 59), que mostra a energia cinética turbulenta libertada pelo veículo. Como se demonstra na imagem as grandes zonas de geração de turbulência situam-se nas rodas, que estão em rotação e interagem com o escoamento, e ainda na traseira, onde se situa a esteira e os vórtices traseiros.

Fig. 55 – Configuração da rede aplicada nos canais do UBIAN10 e modelo numérico com a rede.

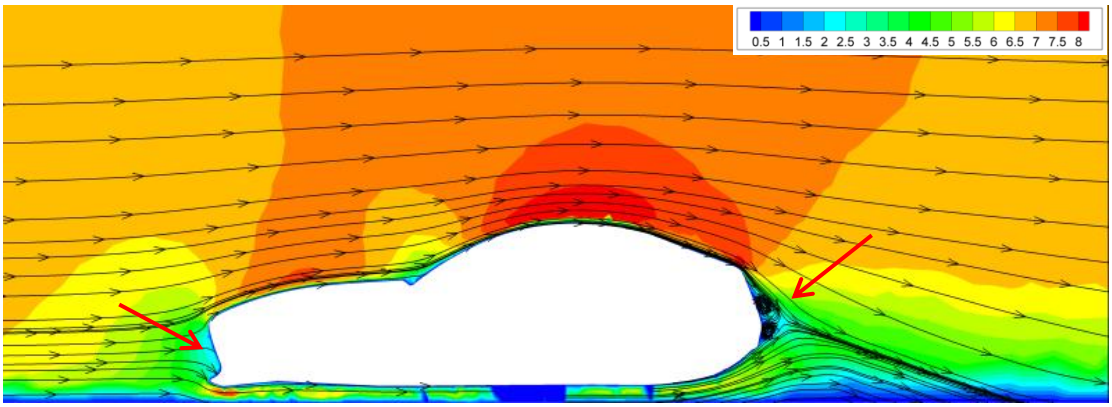
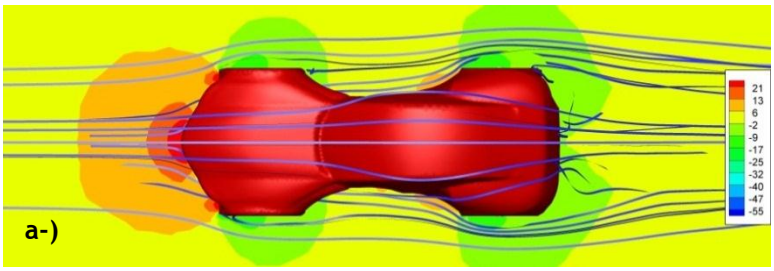
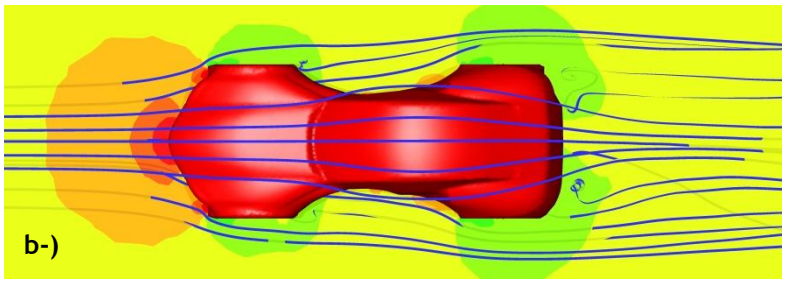
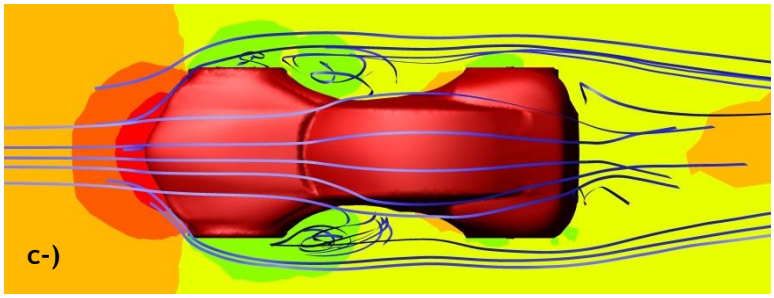
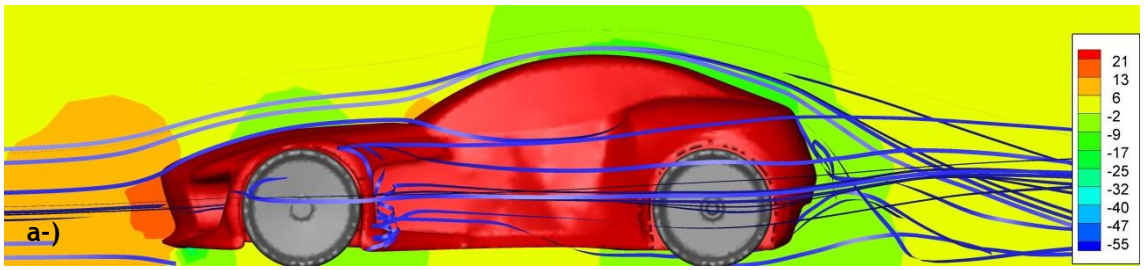


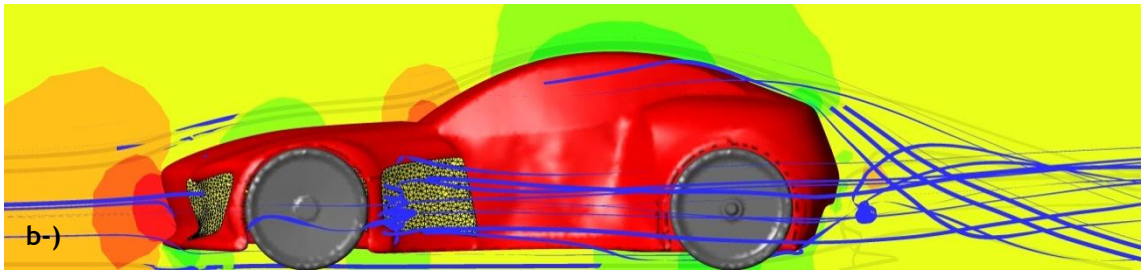
Fig. 56 - Distribuição da velocidade e linhas de corrente. Pode-se observar que há uma zona de estagnação na parte frontal do veículo e dois vórtices na traseira do veículo.











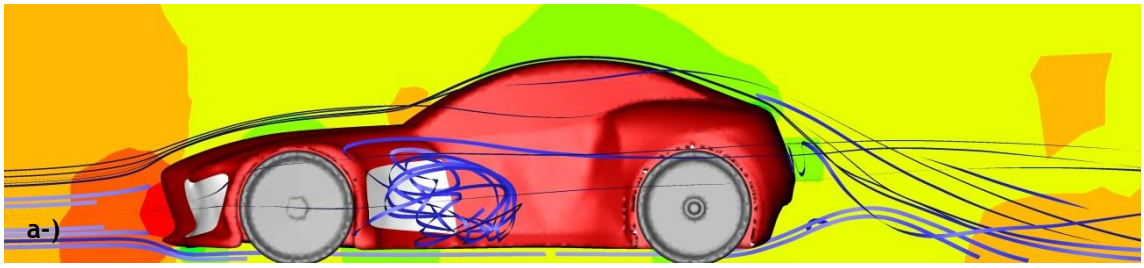


Fig. 57 - Vista lateral e de topo do UBIAN10, onde se destacam a azul os novos vórtices na lateral do veículo, criados pelo bloqueio dos canais. A escala refere-se à distribuição da pressão no escoamento. Em a) canais abertos, b) com redes e c) canais fechados.

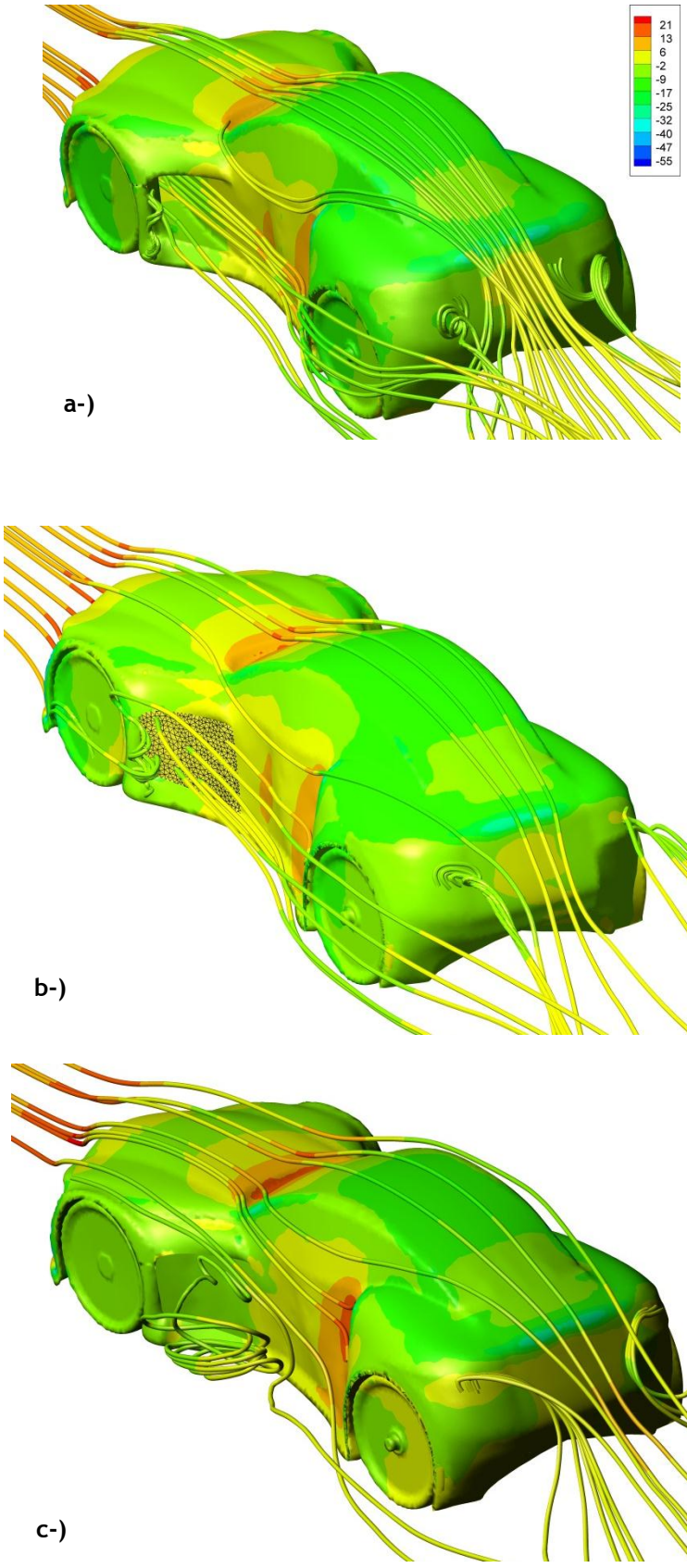


Fig. 58 - Escoamento no veículo UBIAN10 com os canais abertos a-); escoamento calculado com as redes nos canais b-); escoamento calculado com os canais fechados c-). Na imagem d-) temos o pormenor dos vórtices na traseira do veículo e apresentamos como modelo de referência o corpo de Ahmed. A escala refere-se à distribuição da pressão no escoamento.

d-)

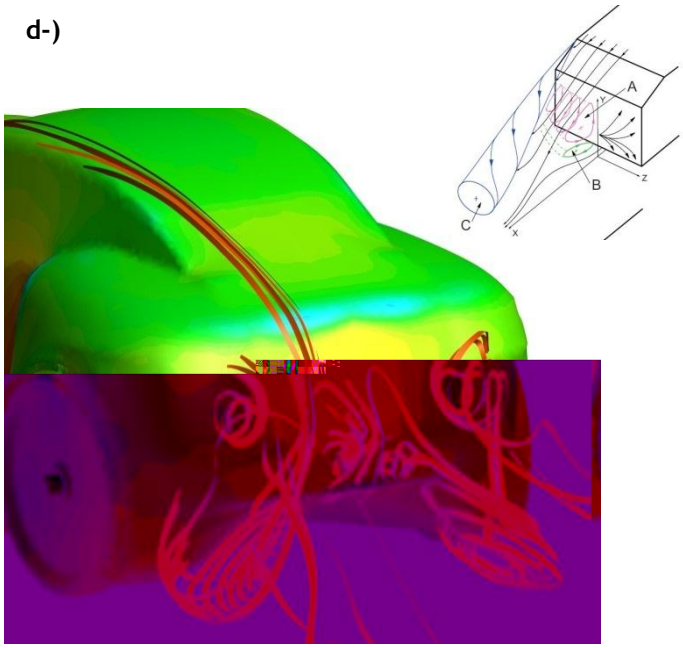


Fig 56 - (Continuação)

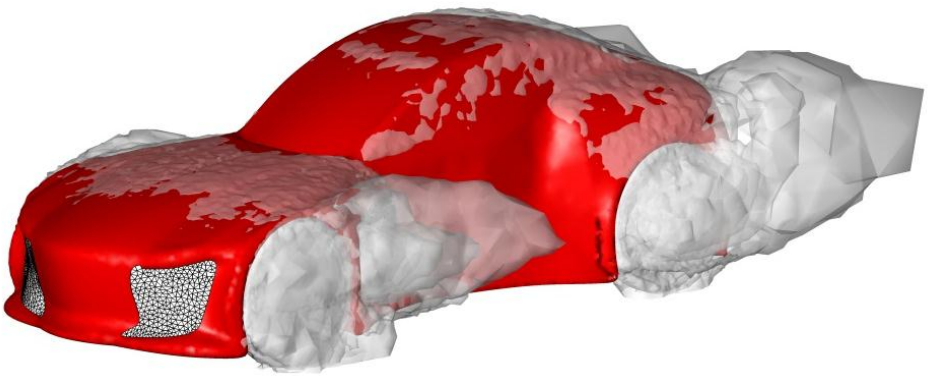


Fig. 59 – Distribuição da energia cinética turbulenta libertada pelo veículo.

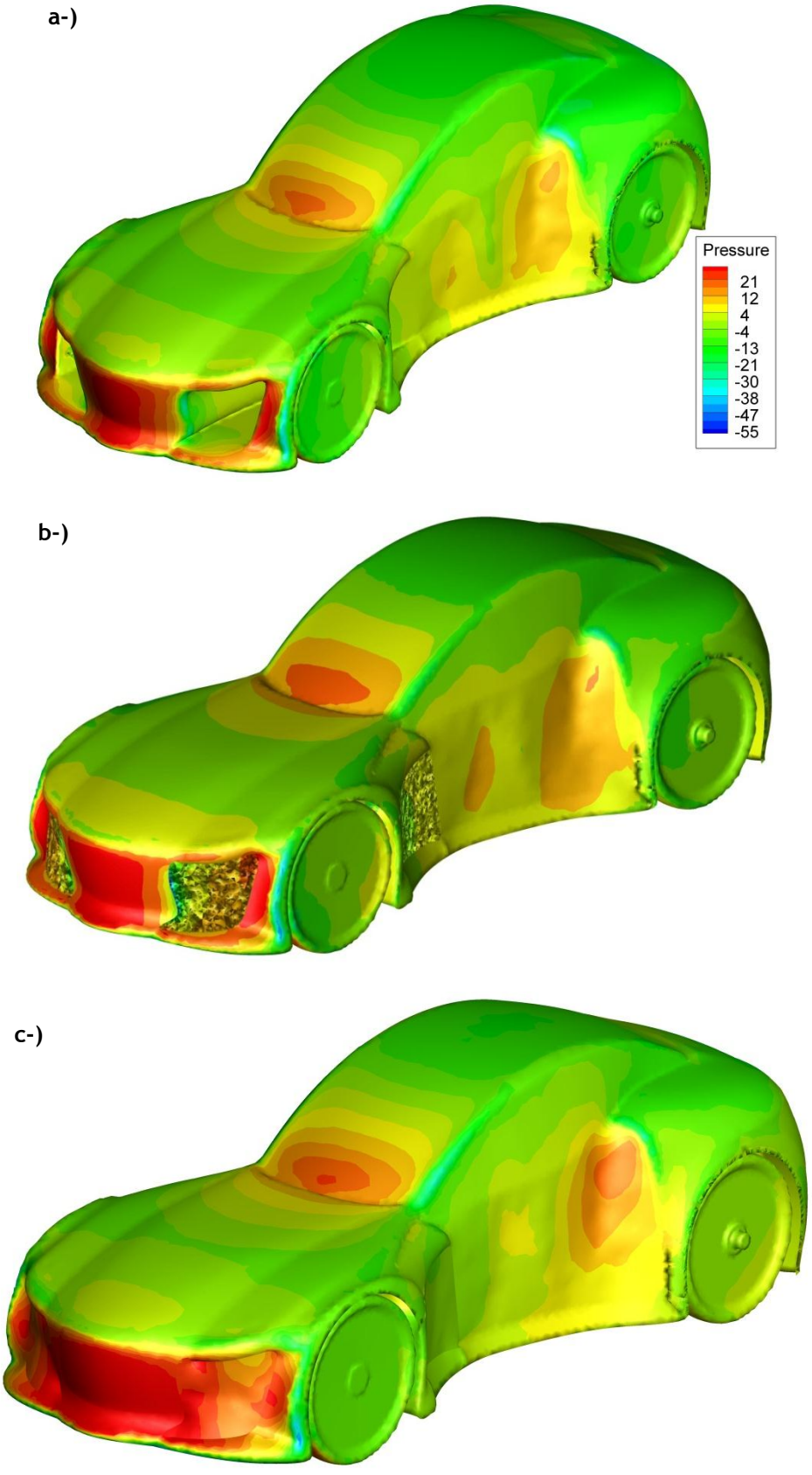


Fig. 60 – Escoamento no veículo UBIAN10 calculado com os canais abertos a-); Escoamento calculado com as redes nos canais b-); Escoamento calculado com os canais fechados c-). Há um aumento da área de estagnação na parte frontal do veículo.

5.6. Comparação entre os ensaios experimentais e os cálculos numéricos

Os ensaios, como já foi referido, foram feitos para as mesmas condições com vista à comparação de resultados. Estes ensaios foram feitos para uma velocidade de $6{,}94\ \mathrm{m/s}\ (25\ \mathrm{Km/h})$ e $Re = 1.45 \times 10^6$.

Como já referido anteriormente foi imposta uma rotação às rodas, na montagem dos ensaios numéricos, para que os casos se aproximassem ao máximo à realidade. Na Tabela 7 faz-se a comparação de dois ensaios numéricos, para a mesma configuração, mas um com rodas estáticas e outro com rodas em rotação. Isto permitiu estudar a influência das rodas no comportamento do escoamento. Comparando os dois casos numéricos, houve um decréscimo de 4% no Cd em relação ao caso das rodas estáticas. Pode-se verificar que o caso com as rodas estáticas piora o coeficiente de resistência. A Fig. 61 mostra um corte longitudinal dos dois casos, num deles a roda está em rotação (Fig. 61 a)) e no outro, está estática (Fig. 61 b)). A partir da tabela e da figura, verifica-se que há uma diferença significativa entre o comportamento do escoamento dentro da cava da roda. No caso da roda em rotação, é possível observar que a própria roda induz uma recirculação dentro da cava, enquanto na roda estática as pressões são praticamente nulas nessa zona. Com estes resultados, verifica-se que a rotação das rodas influência em muito o coeficiente de resistência, por isso, todos os ensaios numéricos têm as rodas em rotação, simulando um ensaio em pista.

Na Tabela 8 mostra-se a comparação, para a mesma configuração, dos resultados numéricos e experimentais obtidos. Conclui-se que há 2% de desvio entre estes dois tipos de ensaios. Segundo a literatura consultada, este desvio está dentro do intervalo aceitável para uma comparação entre ensaios numéricos e experimentais.

Quanto à Tabela 9, faz-se uma comparação entre várias configurações do UBIAN10, possibilitando assim, o estudo da influência dos canais e das redes no escoamento. O caso com os canais fechados revelou piores resultados que as configurações com os canais abertos. O carro com os canais fechados resulta num aumento do coeficiente de resistência provocado pela área de estagnação frontal, o que contribui para o aumento do número e tamanho dos vórtices gerados. Neste houve um aumento do Cd em aproximadamente 1,28 % em relação à configuração com os canais abertos. Confirma-se assim que apenas esta alteração na geometria do veículo não é suficiente para uma melhoria aerodinâmica significativa. O ensaio do carro com redes nos canais apresenta valores intermédios entre os dois ensaios anteriores.

Tabela 7 – Comparação dos dois ensaios numéricos para a mesma configuração, mas com diferente configuração nas rodas.

Ensaio	Configuração		Cd_p	Cd_v	Cd	Desvio (%)
Numérico	Rodas estáticas	Canais abertos	0,4269	0,02692	0,4538	4,3
	Rodas em rotação		0,3844	0,02636	0,4108	

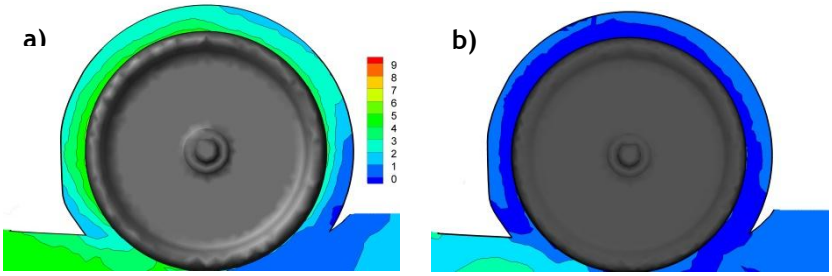


Fig. 61 – A imagem a) mostra uma roda em rotação e a imagem b) mostra uma roda estática. A escala colorida é o módulo da velocidade.

Tabela 8 – Comparação do ensaio experimental e numérico para as mesmas configurações.

Ensaio	Configuração	Cd_p	Cd_v	Cd	Desvio (%)
Experimental	Canais abertos	-	-	0,430±0,086	-
Numérico		0,3844	0,02636	0,4108	1,92

Tabela 9 - Coeficientes de resistência para as diferentes configurações do UBIAN10. O desvio reporta a diferença dos três tipos ensaios para a mesma configuração.

Ensaio	Configuração	Cd_p	Cd_v	Cd	Desvio (%)
Numérico	Canais abertos	0,3844	0,02636	0,4108	-
	Canais com rede	0,3903	-0,0003995	0,3899	2,09
	Canais fechados	0,4017	0,02175	0,4236	1,28

5.7. Análise crítica sobre a diferença entre resultados numéricos e experimentais

As discrepâncias entre os ensaios numéricos e os ensaios experimentais, ainda que pequenas (cerca de 2%), têm origem em vários factores que aqui resumimos:

Erros experimentais:

- Dificuldade em garantir que não houvesse interferência do vento e dos carros que passavam em zonas próximas da pista;
- Irregularidades do piso da estrada que não permitiam boa repetibilidade dos ensaios;
- Erros na cadeira de aquisição de dados (ruído);
- Dificuldade em manter o veículo a velocidade constante;

Erros numéricos:

- Inexactidões numéricas associadas à geração da malha;
- Uso de funções de parede que limitam a precisão do cálculo junto da parede;
- Deficiências do modelo de turbulência.

5.8. Efeito da rugosidade em superfícies

Outro aspecto interessante a estudar é o efeito que tem sobre o escoamento em torno do UBIAN10 o estudo do acabamento das superfícies. Como já referido, este veículo foi feito na Universidade da Beira por alunos e professores desta instituição. Isto permitiu que houvesse um maior controlo sobre o tempo de execução do projecto e sobre o seu orçamento. Contudo, e apesar do acabamento superficial do carro ser bastante bom, não foi possível obter um acabamento de fábrica. Surge então a questão de saber como é que o acabamento afecta o escoamento do veículo.

Tendo em conta o exemplo clássico de uma bola de golfe, que com uma superfície perfeitamente lisa irá sofrer uma separação do escoamento muito mais cedo. Criando-se uma grande esteira e, subsequentemente, uma grande resistência de pressão. Uma bola lisa tem uma componente de resistência viscosa muito baixa. Contudo, tem uma resistência de pressão muito alta. Se o escoamento for laminar ele separa da bola muito cedo. Se a bola tiver deformações para tornar a superfície áspera, torna o escoamento turbulento e, em resultado disso, este irá permanecer mais tempo colado. Isto vai permitir que se atrase o descolamento, reduzindo o tamanho da esteira e consequentemente a resistência de pressão.

Segundo Bruneau et al. (2004) e (2007), que fizeram ensaios para o corpo de Ahmed, as maiores reduções do coeficiente de resistência foram obtidas com revestimentos especiais no topo e parte de baixo do corpo de Ahmed. Estes autores também concluíram que os revestimentos na frente não tiveram efeito significativo na redução do coeficiente de resistência.

Fez-se um ensaio numérico para verificar se haveria alterações ao escoamento em função da rugosidade. Usou-se o caso que apresentava pior desempenho, caso com canais fechados. A rugosidade aplicada na superfície foi 0,001m. Na Tabela 10 estão os resultados obtidos neste

ensaio, em comparação com o ensaio previamente feito para a mesma configuração mas sem rugosidade superficial. É possível observar que o resultado do coeficiente de resistência piorou em 1,2%. Este aumento provém do coeficiente de resistência viscosa, Cd_v, que aumentou no caso da rugosidade. O coeficiente de resistência de pressão diminuiu e o coeficiente de resistência viscosa aumentou, pelo que, conclui-se que o escoamento já era turbulento no caso sem rugosidade.

Tabela 10 – Ensaio dos casos com e sem rugosidade superficial

Configuração		$\boldsymbol{Cd_p}$	$\boldsymbol{Cd_v}$	$\boldsymbol{Cd}$	Desvio (%)
Canais fechados	Sem rugosidade superficial	0,4017	0,02175	0,4236	-
	Com rugosidade superficial	0,4005	0,035	0,4355	1,19

Capítulo 6

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões do presente trabalho, bem como as sugestões de trabalhos futuros.

6.1. Modelos do escoamento em torno do corpo de Ahmed

Os resultados publicados permitem comparar a literatura com os resultados obtidos neste trabalho. Pode-se assim aferir a precisão do modelo computacional e compreender a estrutura de vórtices na esteira do veículo.

A inexactidão numérica é principalmente devido ao comportamento dos modelos de turbulência e ao efeito das funções de parede. Também é referido na literatura que em diversos ensaios em túneis de vento, para a mesma geometria, costumam apresentar discrepâncias.

Este estudo permitiu avaliar o comportamento da esteira em corpos cheios com inclinação traseira. Conclui-se que o coeficiente de pressão contribui mais, que o coeficiente de viscosidade para o coeficiente de resistência. O escoamento colado é predominante na superfície do corpo de Ahmed e a grande área frontal contribui muito para a resistência de pressão. A estrutura média da esteira exibe um par de vórtices em forma de ferradura, situado um em cima do outro na zona junto à base do veículo. Para além destes vórtices, existem mais dois vórtices nas laterais da inclinação. O tamanho dos vórtices laterais, e dos vórtices em forma de ferradura na bolha de separação, é principalmente determinados pela inclinação da traseira. Por isso, uma configuração de baixa resistência, induz um escoamento transversal fraco na sua esteira. No caso de escoamentos que geram grande resistência, estes são caracterizados pelos dois vórtices laterais, pela bolha de separação na base da inclinação, e pela bolha de separação que emana na base vertical. Um escoamento com grande resistência é instável. A mudança para escoamentos de baixa resistência é acompanhada pelo desaparecimento do movimento vertical na esteira.

Durante as simulações numéricas conclui-se que o modelo de turbulência $k-\omega\ SST$, para casos estacionários, conseguiu obter bons resultados em comparação com os outros modelos numéricos. A sua relação peso computacional/precisão de resultados foi a melhor das encontradas.

Dos casos não estacionários, o que apresentou piores resultados foi o *DES* $k-\omega\ SST$. O facto de os casos estarem feitos para usar funções de parede pode ter influenciado os resultados não-estacionários. O $DES\ S-A$ foi o modelo que apresentou melhor concordância com a literatura apresentada.

Durante a consulta à literatura encontraram-se algumas incorrecções quando se citava o artigo de Ahmed e Ramm (1984). Houve inúmeros artigos a referirem resultados do coeficiente de resistência para 40 m/s de Ahmed e Ramm (1984). Contudo, este artigo apenas fez o ensaio experimental para 60 m/s variando apenas o ângulo de inclinação traseiro.

6.2. Modelação numérica e experimental do veículo Eco-Marathon

Nos testes experimentais foi desenvolvido um método de ensaio em pista que permite obter resultados para uma velocidade constante (ao contrário do *coast-down* geralmente usado pelos fabricantes). Este método adequa-se melhor a comparações com resultados numéricos e de túnel de vento, onde a velocidade é constante. Nestes ensaios houve problemas em garantir que a velocidade do veículo fosse constante e também em reduzir a interferência do vento. O aspecto mais significativo prende-se com as irregularidades do solo da pista, que afectaram a repetibilidade dos ensaios.

Os cálculos numéricos permitiram a determinação numérica do coeficiente de resistência com e sem rodas em movimento. Verificou-se assim que a rotação das rodas tem um peso importante no escoamento. Quanto aos três casos de diferentes canais ensaiados, concluiu-se que o caso dos canais abertos foi o que apresentou melhores resultados. Apurou-se que tapando os canais irá piorar o escoamento e que esta alteração na geometria não irá melhorar o desempenho aerodinâmico do veículo. Também se aferiu que a introdução da rugosidade superficial piorou este desempenho, pelo que um bom acabamento superficial irá melhorar o comportamento do escoamento.

A possibilidade de calcular o escoamento sem funções de parede, está dependente da expansão do *cluster* HPC. Actualmente foi usado o *cluster* de computação de alto desempenho *Octopus* (16 CPU's).

6.3. Proposta de trabalhos futuros

Nas Fig. 62 e Fig. 63, apresenta-se o processo de construção do UBIAN11, na Fig. 62 a) mostra-se o chassis, em fibra de carbono do UBIAN10. Na Fig. 62 b) pode observar-se a carcaça usada como molde negativo para o UBIAN11.

As modificações do novo UBIAN11 estavam dependentes de vários factores, tais como o orçamento, o tempo de construção, a reutilização do chassis do veículo UBIAN10 e o regulamento da prova. As alterações que se fizeram ao UBIAN11 incidiram principalmente na parte frontal, o fecho dos dois canais da frente e na uniformização das laterais. Desses trabalhos surgiu o veículo apresentado na Fig. 64.

Fig. 62 – Processo de construção do novo carro. Foi reutilizado o chassis em carbono do carro antigo e a sua carcaça serviu de molde à nova carcaça. Estrutura interior (a)) e carcaça UBIAN10 (b)).

Fig. 63 –Correcção e fibragem do molde do UBIAN11

Fig. 64 – No novo carro houve duas zonas principais que foram alteradas: a zona frontal e as laterais do veículo. A inclinação da frente, os canais e as laterais foram alteradas de modo a que o carro pudesse vir a apresentar um melhor desempenho aerodinâmico.

Com base no estudo aerodinâmico verificou-se que a melhoria da aerodinâmica do veículo envolve mais alterações à geometria do que as inicialmente previstas. As correcções que se realizaram na frente, laterais e traseira são necessárias mas, vão modificar o aspecto do veículo. Pelo que o ideal seria desenhar um veículo de raiz mais aerodinâmico do que continuar a fazer correcções pontuais neste. Uma das grandes limitações às alterações permitidas esteve relacionada com o comprimento máximo do veículo admitido em prova. A concepção do veículo de raiz permitiria obviar este problema. Espera-se analisar futuramente o escoamento na nova geometria do UBIAN 2011.

Bibliografia

B J MCKEON, A. J. S. 2002. Static pressure correction in high Reynolds number fully developed turbulent pipe flow. *Measurement Science and Technology,* 13.

C. HINTERBERGER, M. G.-V. A. W. R. 2004. Large eddy simulation of flow around the Ahmed body. *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics / The Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains*.

CHALMERS, U. 2010a. *CHALMERS SHOWS GOOD PERFORMANCE AT THE 2010 SHELL ECO-MARATHON COMPETITION IN GERMANY* [Online]. Available: http://www.chalmers.se/en/sections/collaboration/chalmers-academies/automotive-academy/information-news/news-archive/eco-marathon-2010 [Accessed 22/08/2011].

CHALMERS, U. 2010b. *Vera* [Online]. Available: http://www.chalmers.se/am/ecomarathon-en/history/2009 [Accessed 22/08/2011].

CHARLES-HENRI BRUNEAU, I. M. 2004. Passive control of the flow around a square cylinder using porous media. *International Journal for Numerical Methods in Fluids,* 46**,** 415-433.

CHARLES-HENRI BRUNEAU, P. G., IRAJ MORTAZAVI 2007. Flow manipulation around the Ahmed body with a rear window using passive strategies. *Comptes Rendus Mécanique,* 335**,** 213-218.

DAVIDSON, L. 2010. MTF270 Turbulence Modeling, Lecture notes. Chalmers University of Technology, Department of Applied Mechanics.

DAVIDSON, S. K. A. L. 2005. Flow around a simplified car, part 2: Understanding the flow. *Journal of Fluids Engineering,* 127**,** 907-918.

DURBIN, P. A. 1995. Separated Flow Computations with the k-ε-v^2 Model. *AIAA Journal,* 33**,** 659-664.

E.L. HOUGHTON, P. W. C. 1993. *Aerodynamics for Engineering Students,* London.

ECO-MARATHON, S. 2010a. CHAPTER I - Official Rules. *In:* SHELL (ed.). http://www.shell.com/home/content/ecomarathon/europe/for_participants/europe_rules/.

ECO-MARATHON, S. 2010b. CHAPTER II - Official Rules. *In:* SHELL (ed.). http://www.shell.com/home/content/ecomarathon/europe/for_participants/europe_rules/.

ELSEY, M. 2005. Efficient And Accurate Unstructured Mesh Generation *In:* MICHIGAN, M. A. (ed.). Michigan: University of Michigan.

EMMANUEL GUILMINEAU, G. D., JEROEN WACKERS 2011. Numerical simulation with a DES approach for automotive flows. *Journal of Fluids and Structures,* 27**,** 807-816

FLUENT (ed.) 2006. *Fluent 6.3 User's Guide,* NH, USA.

G. BISCHOF, E. B., A. HAAS, A. KALTENHAUSER, F. ULLRICH 2004. On-road determination of aerodynamic drag improvements. *Sage Publications,* 218**,** 1-6.

GEOFFREY M. LE GOOD, K. P. G. 2004. On the Use of Reference Models in Automotive Aerodynamics. *SAE 2004 World Congress & Exhibition, March 2004,* 2004-01-1308**,** 1-25.

GERARDO FRANCK, J. D. E. 2004. CFD modeling of the flow around the Ahmed vehicle model. *Proceedings of 2nd conference on advances and applications of GiD. Barcelona, Spain*.

GRAYSMITH J. L., B. A. J., HOWELL J. P., HAYNES T 1994. Comparisons between CFD and experimental results for the Ahmed reference model. *Proceedings of the Royal Aeronautical Society Conference on Vehicle aerodynamics***,** 30.1–30.11.

GUILMINEAU, E. 2008. Computational study of flow around a simplified car body. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* 96**,** 1207–1217.

H. LIENHART, C. S., S. BECKER 2000. Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model). *DGLR Fach Symp. der AG STAB, Stuttgart University*.

H. LIENHART, S. B. 2002. LDA measurements of the flow structure in the wake of a simplified car model. *11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal*.

HAECHEON CHOI, W.-P. J., JINSUNG KIM 2008. Control of Flow Over a Bluff Body. *Annual Review of Fluid Mechanics,* 40**,** 113-139.

HAN, T. 1989. Computational analysis of three-dimensional turbulent flow around a bluff body in ground proximity. *AIAA,* 27**,** 1213–1219.

HUCHO, W. H. (ed.) 1998. *Aerodynamics of Road Vehicles,* Warrendale, Pennsylvania: SAE International.

IVAN KORKISCHKO, J. R. M. 2006. Investigação experimental e simulação numérica do escoamento ao redor de um modelo automobilístico: corpo de Ahmed. *Simpósio de projetos integrados em Engenharia Mecanica*.

JOCHEN FRÖHLICH, D. V. T. 2008. Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows. *Progress in Aerospace Sciences,* 44**,** 349-377.

JOEL A. WALTER, D. J. P., GARY F. ROMBERG 2001. Coastdown/Wind Tunnel Drag Correlation and Uncertainty Analysis. *SAE 2001 World Congress, March 2001,* 2001-01-0630.

KHALID M. SAQR, M. N. M. 2010. RANS Simulation of the Turbulent Flow Field in the Vicinity of the Ahmed Reference Car Model. *New Aspects Of Fluid Mechanics, Heat Transfer And Environment*.

KRISHNANI, P. N. 2009. *CFD STUDY OF DRAG REDUCTION OF A GENERIC SPORT UTILITY VEHICLE.* MASTER OF SCIENCE, CALIFORNIA STATE UNIVERSITY.

LISA LARSSON, H. M. 2009. *Aerodynamic Drag Reduction of a Heavy Truck with Variable Cooling Air Intake Area.* Master's Thesis in the Master's programme Automotive Engineering, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.

M. E. BIANCOLINI, F. R., G. MANIERI AND M. URBINATI 2007. Evaluation of aerodynamic drag of go kart by means of coast down test and CFD analysis. *Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni (AIAS) XXXVI Convegno Nazionale***,** 1-13.

MENTER, F. R. 1993. Zonal Two Equation k-w Turbulence Models for Aerodynamic Flows. *AIAA 24th Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida,* 93-2906.

MOREL, T. 1978. Aerodynamics drag of bluff body shapes. Characteristics of hatch-back cars. *SAE Report*.

P. GILLIERON, F. C. 1999. Modelling of stationary 3-D separated air flows around an Ahmed reference model. *European Series in Applied and Industrial Mathematics: Proceedings,* 7**,** 173-182.

P. R. SPALART, S. R. A. 1992. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *AIAA 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV***,** 5-21.

P.R SPALART , S. R. A. 1994. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *La Recherche Aerospatiale,* 1**,** 5-21.

PANKHURST, R. C. H., D. W. 1952. Wind-Tunnel Technique. *Issac Pitman & Sons Ltd*.

PATRICK GILLIÉRON, A. L., SANDRINE AUBRUN, PIERRE AUDIER 2010. Influence of the Slant Angle of 3D Bluff Bodies on Longitudinal Vortex Formation. *Journal of Fluids Engineering,* 132**,** 9.

PICO-TECHNOLOGY. 2011. *Picoscope 3223* [Online]. Available: http://www.picotech.com [Accessed 14/09/2011].

R. K. STRACHAN, K. K., N. LAWSON 2004. A CFD and experimental study of an Ahmed reference model. *Society of Automotive Engineers World Congress & Exhibition, Detroit, MI, USA*.

RICHARD FALCONER, D. N. 1992. Chaparral. *Motorbooks International WI 54020*.

RICHARD STONE, J. K. B. 2004. *Automotive Engineering Fundamentals,* Warrendale, Pa., SAE.

RODI, M. B. A. W. 1996. Large eddy simulation of complex turbulent flows of practical interest. *Flow simulation with high performance computers II,* 52 of Notes on Numerical Fluid Mechanics**,** 258-274.

S. KRAJNOVIĆ, L. D. 2005. Flow around a simplified car, part 1: Large eddy simulation. *Journal of Fluids Engineering,* 127**,** 907-918.

S.R. AHMED, G. R. 1984. Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake. *SAE-Paper 840300*.

SAGAR KAPADIA, S. R., KEN WURTZLER 2003. Detached Eddy Simulation Over a Reference Ahmed Car Model. *AIAA, 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,* 9**,** 481–488.

SERRE, E., MINGUEZ, M., PASQUETTI, R., GUILMINEAU, E., DENG, G. B., KORNHAAS, M., SCHAFER, M., ET AL. 2011. On simulating the turbulent flow around the Ahmed body: A French-German collaborative evaluation of LES and DES. *Computers & Fluids, article in. Elsevier*.

SIMON MICHALOWSKI, A. P., MORTEN GOEDECKE, MICHAEL TELLER 2009. Minimizing Fuel Consumption with CFD and Automated Morphing. *3rd ANSA & µETA International Conference*.

SPALART PR, J. W.-H., STRELETS M, ALLMARAS SR 1997. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach. *In Advances in DNS/LES, ed. C Liu, Z Liu***,** 137–147.

STONE, C. R. 1989. *Motor Vehicle Fuel Economy,* London.

STRACHAN, R. K. 2006. *The Aerodynamic Interference Effects of Side Wall Proximity on a Generic Car Model.* PhD Thesis, Cranfield University.

T. NAKASHIMA, M. T., T. NOUZAWA, T. NAKAMURA, H. ZHANG AND N. OSHIMA 2008. Large-Eddy simulation of unsteady vehicle aerodynamics and flow structures. *BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications***,** 1-14.

WHITE, F. M. 1998. *Fluid Mechanics*, Mcgraw-Hill College.

YUNLONG LIU, A. M. 2003. Numerical modeling of airflow over the Ahmed body. *Proceedings of CFD 2003*.

Anexo A - Trabalho Publicado

- O autor Nelson Mendes desenvolveu o modelo computacional e participou activamente nos ensaios experimentais, tendo efectuado a apresentação pública do trabalho no Congress on Numerical Methods in Engineering 2011.