

estas estão se quebrando em estruturas menores, inclusive a jusante da esfera, evidenciando assim mais uma característica da turbulência: quanto mais turbulento é o escoamento, maior é a multiplicidade de escalas.

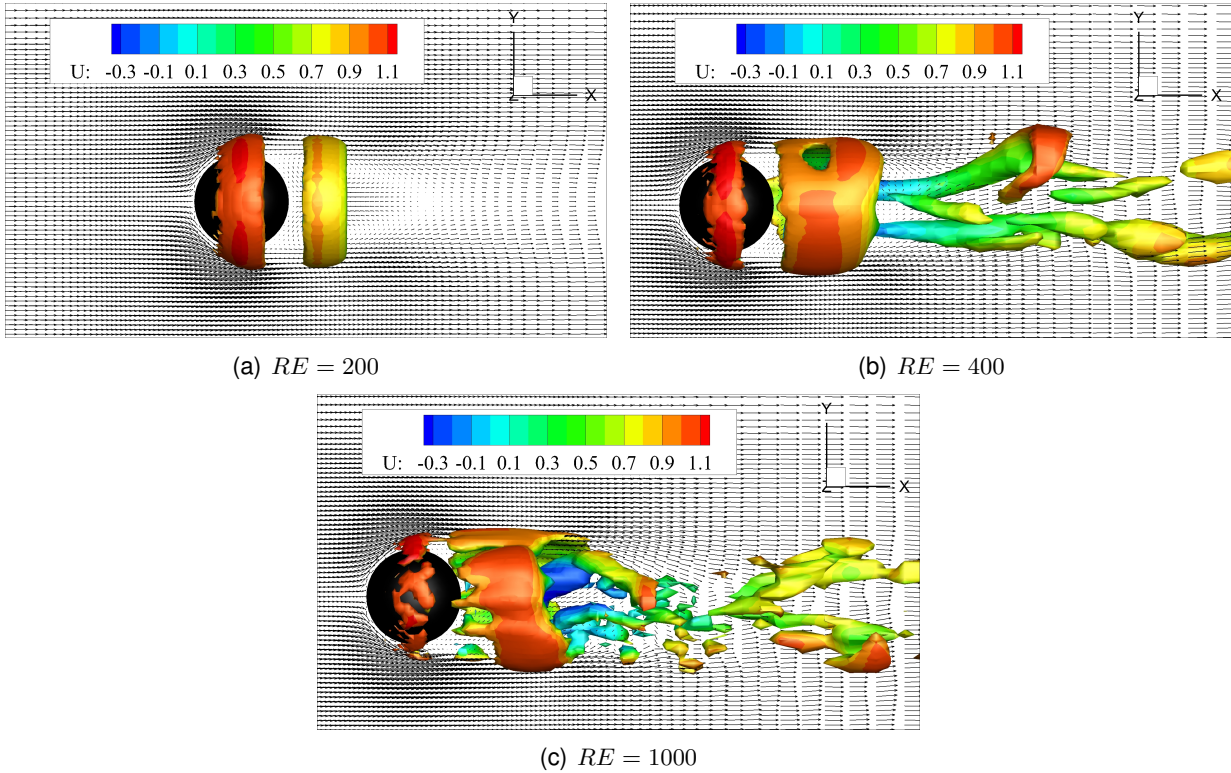


Figura 5.33 – Vetores no plano xy e iso superfície $Q^* = 330$ coloridas com velocidade U sobre esfera para distintos números de Reynolds.

A partir da força lagrangiana é possível calcular o coeficiente de arrasto a partir da somatória da força em todos os pontos lagrangianos vezes o volume lagrangiano correspondente em cada ponto, dividido pelas variáveis para adimensionalização, conforme mostrado na seguinte expressão:

$$C_D = \frac{\sum_K \left[\vec{F}(\vec{x}_K) \right]}{\frac{1}{2} \rho_K U_{in}^2 \frac{\pi}{4} D^2}, \quad (5.3)$$

onde $\vec{F}(\vec{x}_K)$ é a força no ponto lagrangiano, ρ_k é a densidade do fluido no ponto lagrangiano, U_{in} é a velocidade de entrada do fluido e D é o diâmetro da esfera.

A Fig. 5.34 apresenta a evolução do coeficiente de arrasto em função do tempo adimensional para casos com Reynolds iguais a 50, 200, 500 e 10000. Nota-se que para todos os casos este coeficiente parte de um valor relativamente elevado, e com o decorrer do tempo ocorre a queda do valor. Em escoamentos laminares, como nos casos de $Re = 50$ e 200 o coeficiente

de arrasto tende a um valor constante, uma vez que não ocorrem grandes flutuações de velocidade e pressão sobre a superfície da fronteira imersa, sendo constante então a força de arrasto e consequentemente o coeficiente. Em escoamentos transicionais e turbulentos ocorrem grandes flutuações de velocidade e pressão. Com isso ocorre também variações nas forças sobre a geometria, como pode ser notado nos coeficientes para os casos de $Re = 500$ e 10000 . Como o coeficiente não tende a um valor constante deve-se então fazer a média do mesmo quando o escoamento entrar em regime permanente turbulento, condição esta onde as médias das flutuações da velocidade tendem a zero.

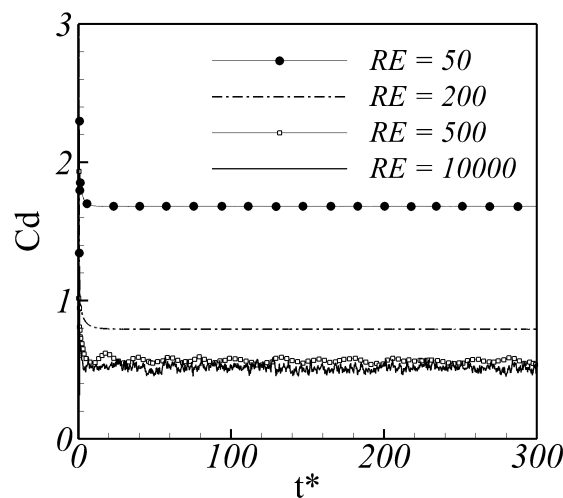


Figura 5.34 – Evolução do coeficiente de arrasto em função do tempo adimensional para diversos valores de Reynolds.

A Fig. 5.35 apresenta a comparação dos resultados obtidos, para número de Reynolds variando entre 10 e 10^3 , com resultados numéricos (FORNBERG, 1988; CAMPEGHER, 2005), e com correlação experimental mostrada na Eq. (5.4) (SUBRAMANIAN, 2003) e com correlação extraída de White (1999):

$$\begin{aligned}
 C_D &= \frac{24}{Re} [1 + 0.1935 (Re^{0.6035})] & 20 \leq Re \leq 260 \\
 C_D &= 0.16435 - 1.1242 (\log_{10} Re) + 0.1558 (\log_{10} Re)^2 & 260 \leq Re \leq 1.5 \cdot 10^3
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Campegher (2005) também utiliza a metodologia da fronteira imersa, diferindo na forma de calcular a força lagrangiana, onde o autor usa o modelo físico virtual, proposto por Silva *et al.* (2003). Os resultados obtidos estão de acordo com os dados da literatura, onde o coeficiente inicia-se em um valor elevado e decai conforme o valor de Reynolds aumenta. Esta é uma curva

muito importante para aplicações práticas, uma vez que a partir dela é possível obter a força de arrasto para diferentes configurações de esfera e escoamento, e diferentes propriedades do fluido.

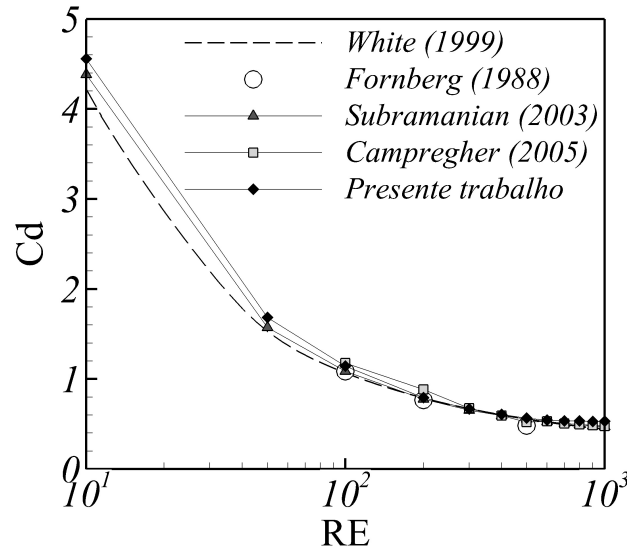


Figura 5.35 – Coeficiente de arrasto em função do Reynolds comparado com dados da literatura (FORNBERG, 1988; WHITE, 1999; SUBRAMANIAN, 2003; CAMPEGHER, 2005).

A Fig. 5.36 apresenta a curva de arrasto para elevados números de Reynolds, variando entre 10 e 10⁶. Para Reynolds entre 10³ e 10⁵ as curvas se diferem em algumas posições, porém segue aproximadamente a mesma tendência linear. Pela curva apresentada por White (1999) a crise do arrasto acontece em aproximadamente $Re = 2 \cdot 10^5$, e não foi captada nas simulações do presente trabalho. Uma explicação para este ocorrido é o fato de que o nível de refinamento da malha utilizado não captou a transição à turbulência da camada limite à montante do ponto de descolamento. Um maior refinamento da malha, ou uma imposição numérica forçada da transição são medidas possíveis para solucionar este problema na curva de arrasto.

A Fig. 5.37 apresenta o valor da norma L_2 para todos os números de Reynolds simulados. Para todos os casos a norma ficou abaixo de 3×10^{-2} , comprovando os bons resultados obtidos com as simulações. A norma L_2 entre duas soluções é definida da seguinte forma:

$$L_2 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \|Sol1_{i,j} - Sol2_{i,j}\|^2}{MNK}}, \quad (5.5)$$

onde M , N e K é a quantidade de elementos em x , y e z , respectivamente.

Uma vez validada a metodologia da fronteira imersa utilizada no presente trabalho, a

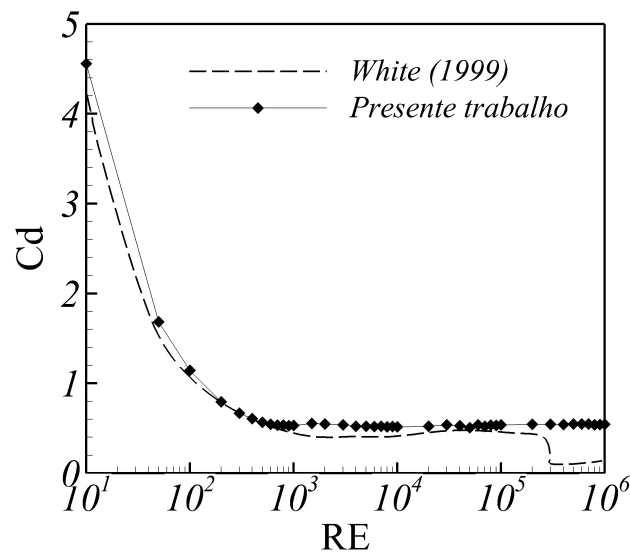


Figura 5.36 – Coeficiente de arrasto em função do Reynolds comparado com dados da literatura (WHITE, 1999).

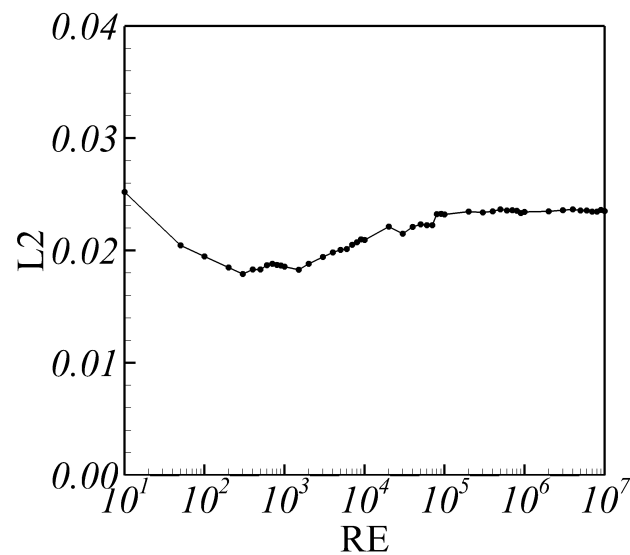


Figura 5.37 – Norma L_2 em função do número de Reynolds.

subseção seguinte apresentará resultados relativos a simulações em torno de perfis aerodinâmicos.

5.4 Escoamento sobre o perfil aerodinâmico NACA 0012

Na simulação do perfil aerodinâmico foi utilizado o perfil NACA 0012, um perfil simétrico com relação a linha da corda, onde a sua espessura mede 12% de seu comprimento. Diferentemente da simulação sobre uma esfera, abordado anteriormente, a geometria desse perfil é esbelta, e com o objetivo de captar maiores detalhes no escoamento foi realizada uma simulação

bidimensional, buscando assim um maior nível de refinamento em torno da geometria com um custo moderado.

A Fig. 5.38 apresenta a malha euleriana para este problema, a qual é mostrada através do plano xy . Como nos casos simulados para validação do código, esta malha é cartesiana, construída em um domínio retangular, cujas as dimensões são $9,0\text{ m}$ em x , $5,0\text{ m}$ em y e $0,01\text{ m}$ em z , espessura esta em z correspondente ao comprimento de um volume lagrangiano, por se tratar de um domínio bidimensional, como será detalhado adiante. Esta malha também possui três refinamentos distintos em cada direção: uma região mais refinada e uniforme, a qual é limitada por duas regiões menos refinadas e não-uniformes, totalizando 9 regiões com diferentes refinamentos. Esta figura apresenta com detalhes a quantidade de volumes eulerianos utilizados em cada região, com seus respectivos comprimentos, totalizando 208.800 volumes eulerianos.

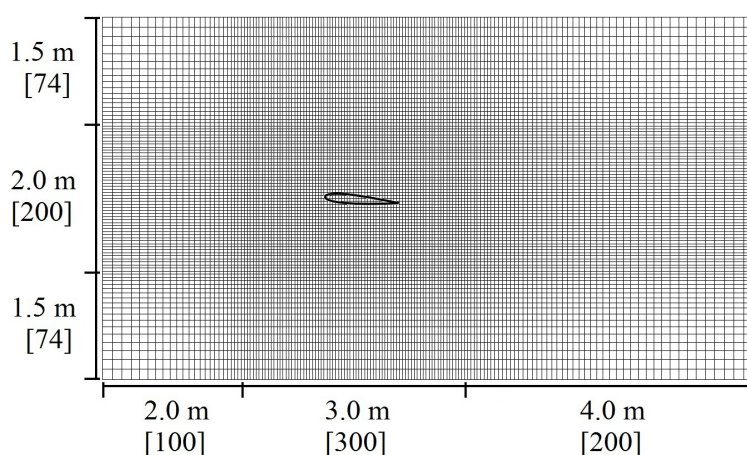


Figura 5.38 – Malha euleriana utilizada para simulação sobre o perfil aerodinâmico.

A Fig. 5.39 mostra a malha lagrangiana do perfil NACA0012 imerso no domínio euleriano. Este perfil possui um comprimento de corda $c = 1,0\text{ m}$. Esta malha foi modelada com elementos triangulares, de tal forma que a distância entre dois centros dos triângulos sejam iguais ao comprimento característico da malha euleriana, resultando em uma igualdade dos volumes dos dois domínios. Esta malha possui um total de 402 elementos lagrangianos.

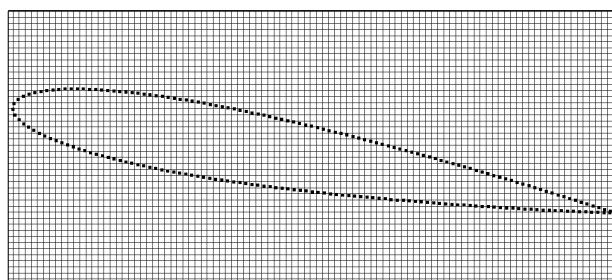


Figura 5.39 – Malha lagrangiana para perfil aerodinâmico.