

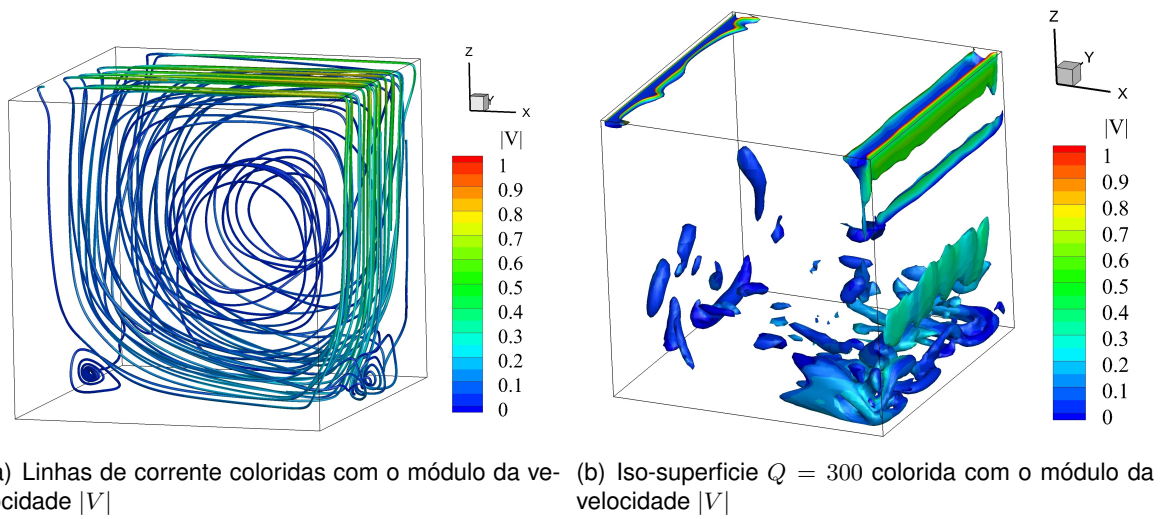


Figura 5.25 – Dinâmica do escoamento para $Re = 10000$.

em $x = 0,5\text{ m}$, e o perfil de velocidade média w em função de x no plano $y = 0,5\text{ m}$ em $z = 0,5\text{ m}$, os quais são comparados com dados da literatura (PRASAD; KOSEFF, 1989; DESHPANDE; MILTON, 1998). Estes perfis respeitam a condição de contorno para ambas direções do escoamento e ficam muito próximos dos resultados colhidos na literatura, inclusive nos pontos de velocidade máxima e mínima, picos estes que necessitam uma modelagem de turbulência bastante acurada para serem captados.

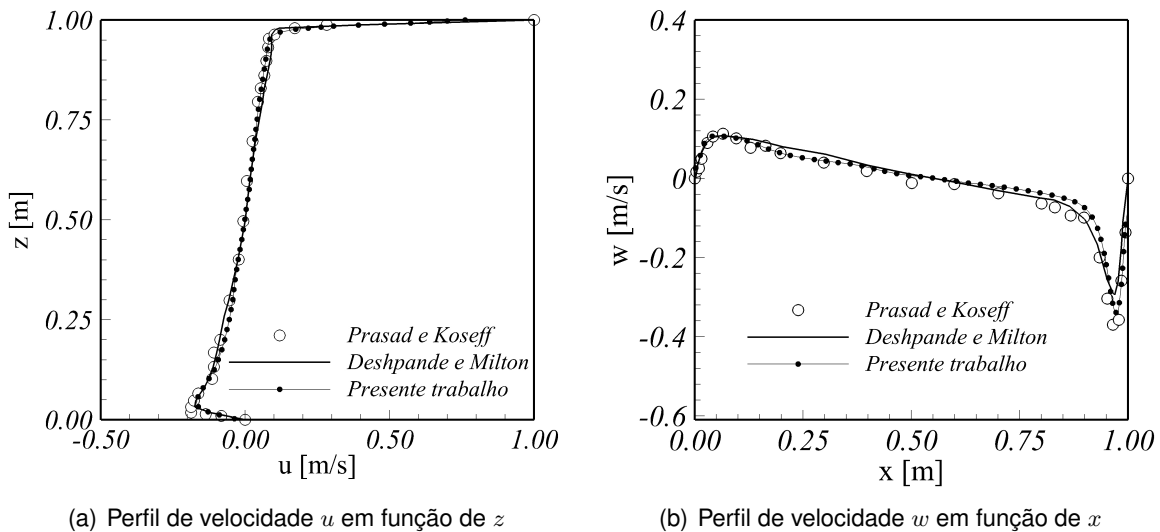


Figura 5.26 – Perfis de velocidade no plano médio $y = 0,5\text{ m}$ comparados com a literatura (PRASAD; KOSEFF, 1989; DESHPANDE; MILTON, 1998) com $Re = 10000$.

A Fig. 5.27 apresenta o perfil u_{Rms} em função de z no plano $y = 0,5\text{ m}$ em $x = 0,5\text{ m}$, e o perfil w_{Rms} em função de x no plano $y = 0,5\text{ m}$ em $z = 0,5\text{ m}$, também comparados com dados da literatura (PRASAD; KOSEFF, 1989). Pelo perfil u_{Rms} nota-se que existe uma dinâmica do escoamento muito grande no fundo da cavidade e próximo a tampa deslizante. Isso ocorre

por se tratar de um escoamento turbulento, conseqüentemente ocorrem grandes flutuações de velocidade em regiões onde o escoamento segue uma tendência altamente não linear, no caso da cavidade em regiões próximas as paredes. Essa flutuação é evidenciada também no perfil w_{Rms} , onde existem grandes variações de velocidade na parede da direita, região esta onde o fluido que escoar para baixo está com grande quantidade de energia cinética fornecida pela tampa deslizante. Ao se comparar estes perfis com a literatura nota-se uma grande proximidade entre as curvas, um indicativo de que a solução está consistente.

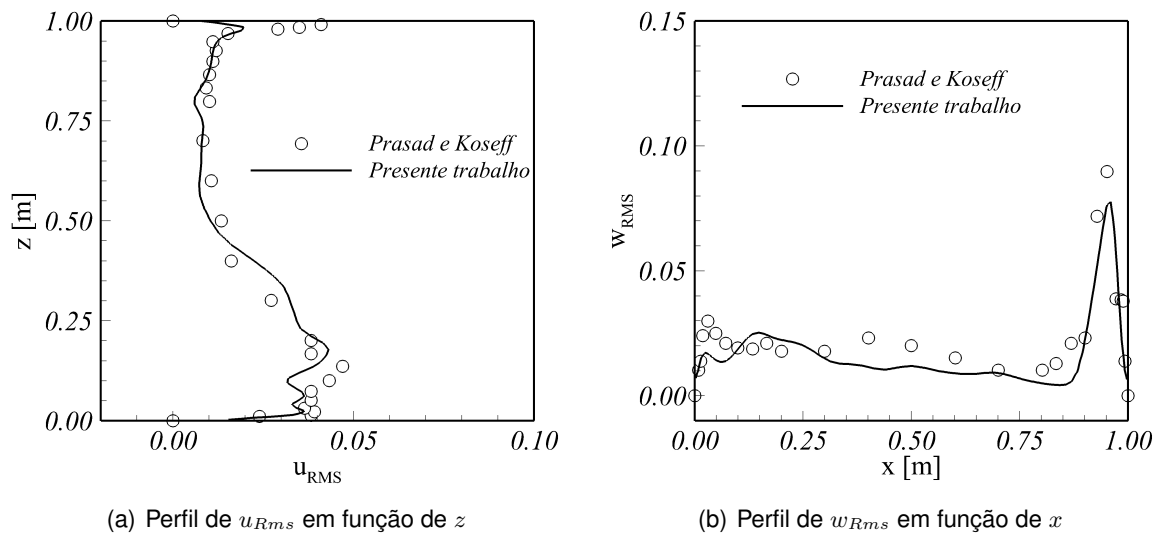


Figura 5.27 – Perfis de Rms no plano médio $y = 0,5 m$ comparados com a literatura (PRASAD; KOSEFF, 1989) com $Re = 10000$.

Uma vez validada a fluidodinâmica e equações da turbulência, a seguir serão apresentados resultados relativos a validação da metodologia da fronteira imersa.

5.3.2 Escoamentos sobre uma esfera

Nesta subseção serão apresentados resultados relativo às simulações do escoamento em torno de uma esfera. Como dito anteriormente no Cap. IV, a metodologia da fronteira imersa utiliza dois domínios independentes, uma para a geometria e uma para o domínio de fluido. No código FLUIDS3D uma das opções para inserção da malha lagrangiana é a utilização de um arquivo no formato *.stl* (VEDOVOTO, 2007), sendo esta opção escolhida para representar as geometrias no presente trabalho.

A Fig. 5.28 apresenta a malha euleriana, a qual é mostrada através dos planos xy e yz . Esta consiste em uma malha cartesiana construída em um domínio retangular, cujas dimensões são $1,0 m$ em x e $0,68 m$ em y e em z . Esta malha qual 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 27 regiões com diferentes refinamento. A figura apresenta a quantidade de volumes eulerianos utilizados em cada região, com seus respectivos comprimentos, totalizando 2.366.000 volumes.

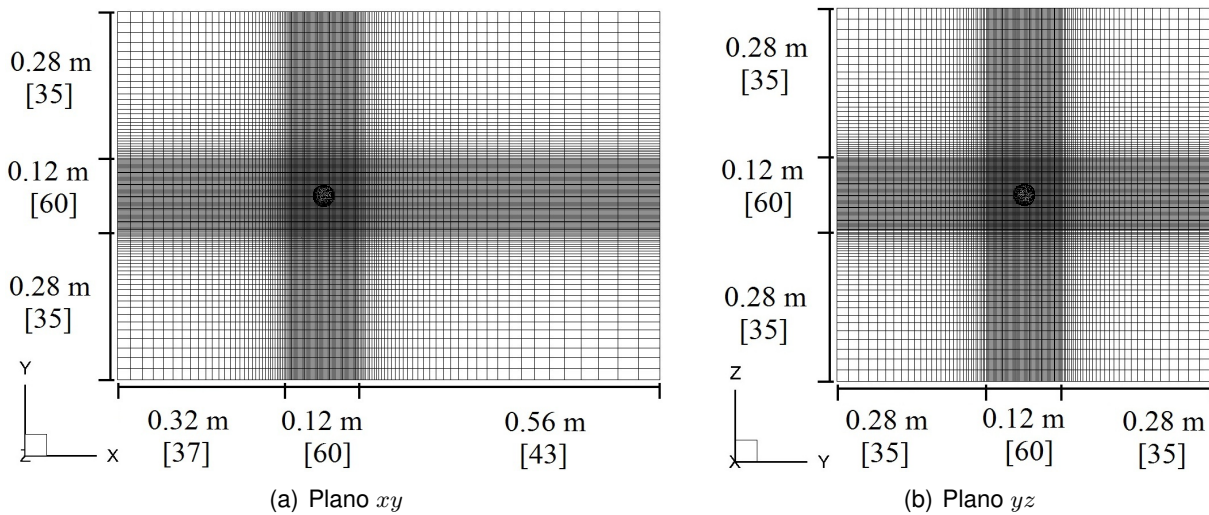


Figura 5.28 – Malha euleriana utilizada para escoamento sobre uma esfera.

Uhlmann (2005) propõe uma forma para calcular o tamanho de cada elemento lagrangiano. O volume de cada elemento lagrangiano é igual ao volume total de uma casca esferica com espessura h e raio médio r sobre o número de elementos lagrangianos, $dV = (4\pi r^2 h) / N_l$, onde r é o raio da esfera, h é o comprimento característico da malha euleriana e N_l é o número de elementos. O volume deste elemento lagrangiano deve ser aproximadamente igual ao volume euleriano $dV = h^3$, como esquematizado na Fig. 5.29. Igualando estes dois diferenciais de volume chega-se a uma expressão para o número de elementos da malha lagrangiana, neste caso a esfera:

$$N_l = \frac{4\pi r^2}{h^2} \quad (5.2)$$

A Fig. 5.30 mostra a malha lagrangiana da esfera imersa no domínio euleriano. É possível ver 1/8 da esfera, a qual se encontra na região uniforme e mais refinada de todo o domínio de cálculo, a qual possui um diâmetro $d = 0,04 \text{ m}$. Esta malha foi criada com elementos triangulares, e os cálculos realizados na metodologia da fronteira imersa, interpolação e distribuição, são feitos a partir do centroide. Aplicando metodologia proposta por Uhlmann (2005), chega-se a um total de 1257 elementos lagrangianos, ou 1257 triângulos.

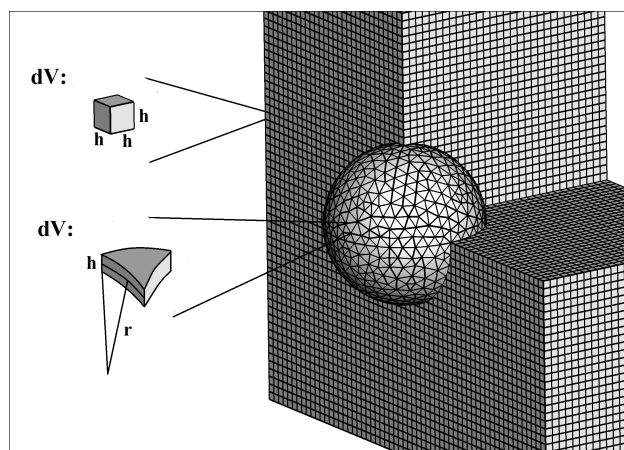


Figura 5.29 – Representação dos volumes eulerianos e lagrangianos.

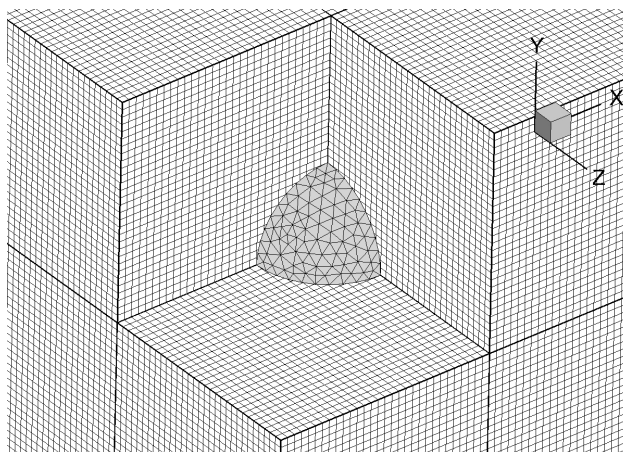


Figura 5.30 – Malha lagrangiana imersa em domínio euleriano.

Para modelar o escoamento sobre a esfera é preciso também definir a condição inicial e as condições de contorno. Em todo o domínio no tempo inicial o campo de velocidade é igual a velocidade de entrada na direção x e é nula nas outras duas direções. As condições de contorno foram impostas da seguinte forma: velocidade constante no plano yz na posição inicial de x , e Neumann para as três componentes de velocidade nas demais paredes do domínio de modo a simular o escoamento em um campo aberto, gerando resultados sem efeito de parede.

O número de Reynolds foi calculado com base na velocidade de entrada, o diâmetro da esfera, densidade e viscosidade dinâmica do fluido. Foi escolhido um grande leque para o número de Reynolds, variando entre $Re = 10$ até $Re = 10^6$, de forma a simular os diversos tipos de escoamento, partindo-se de escoamentos laminares até escoamentos com elevada turbulência.

As simulações foram realizadas até um tempo total adimensional $t^* = 300$, equivalente à aproximadamente $6 \cdot 10^5$ iterações, onde $t^* = U_{in}t/D$, sendo U_{in} a velocidade de entrada, t o tempo dimensional e D o diâmetro da esfera. As médias foram calculadas a partir do tempo

em que uma partícula percorre o domínio 8 vezes, onde no caso do presente trabalho a partir do tempo $t^* = 200$, ou $2 \cdot 10^5$ iterações usadas no cálculo da média.

A seguir serão feitas as análises qualitativas dos resultados. A Fig. 5.31 apresenta as superfícies de velocidade nos planos médios xz para as componentes de velocidade u e w , e no plano xy para a componentes de velocidade V , todas para $Re = 200$. No plano de velocidade xz observa-se através da compontente u que a montante da esfera o fluido é desacelerado, e a jusante da esfera existe uma região com velocidade u negativa, um indicativo de que existe recirculação do fluido. E ainda, no plano na direção x nota-se que ao redor da esfera existe velocidade com valor acima à de entrada ($U = 1.0 \text{ m/s}$), mostrando que o fluido o qual foi desacelerado está contornando a geometria. Isto também é evidenciado nos perfis de velocidade v e w , onde após o ponto de estagnação o fluido escoar pelas laterais. Nota-se que todos os perfis são simétricos, inclusive os perfis de velocidade v e w são semelhantes, indicando um escoamento em regime laminar, como esperado para este número de Reynolds. Observa-se também que as condições de contorno em torno da esfera são respeitadas, uma vez que a velocidade é nula nas três direções.

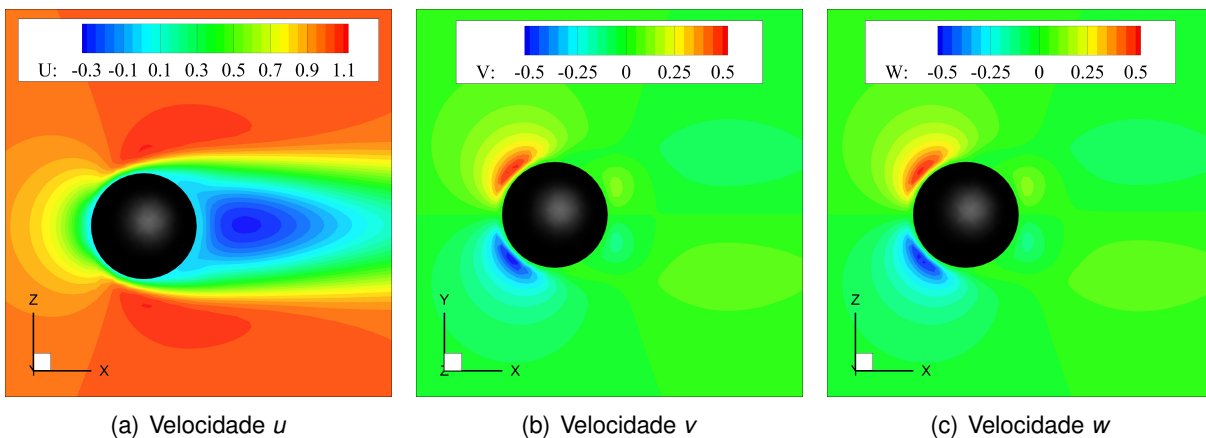


Figura 5.31 – Velocidades em torno da esfera para $Re = 200$.

A Fig. 5.32 apresenta o plano médio em $y = 0,34 \text{ m}$ colorido com o módulo da velocidade e linhas de corrente, as quais foram lançadas no plano $y = 0,345 \text{ m}$, um pouco a frente do plano central, para número de Reynolds $Re = 200$, $Re = 400$ e $Re = 1000$. Nota-se que para todos os casos a condição de contorno sobre a esfera é respeitada, como discutido na figura anterior (Fig. 5.31), e ainda nota-se que as linhas de corrente não cruzam a fronteira imersa, um bom indicativo de sucesso desta metodologia, a qual é usada para aplicar a condição de contorno indiretamente. Para o caso $Re = 200$ observa-se a bolha formada a jusante da esfera, confirmando a característica laminar do escoamento. As linhas de corrente que chegam alinhadas a frente da esfera contornam a geometria e esta bolha a jusante, se alinhando novamente em uma posição