

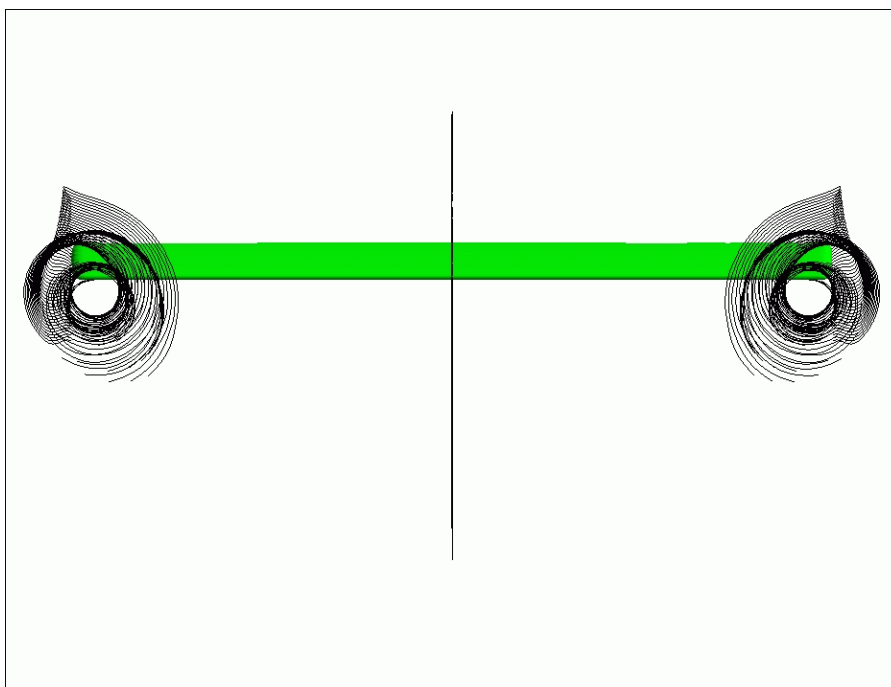


Figura 7.20 - Vista frontal dos vórtices da Figura 7.18. Vedovoto et al. (2006).

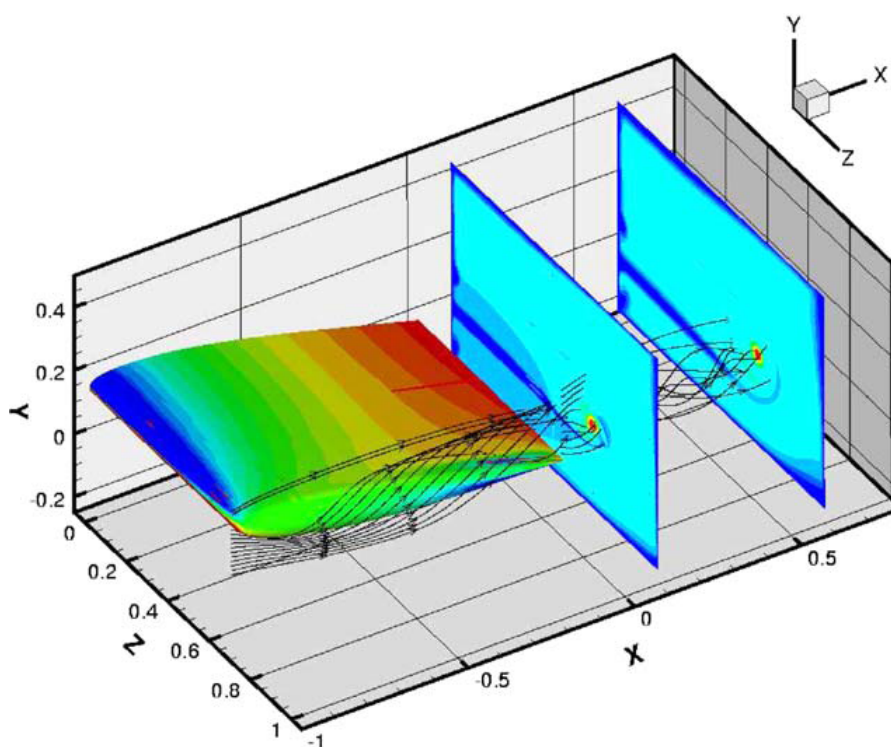


Figura 7.21 - Resultado qualitativo de vórtices de ponta de asa obtidos por Craft et al. (2006).

A visualização do escoamento através de isosuperfícies de $Q = 0,2$, mostra as principais regiões de rotação do escoamento. Na figura é notável a presença das duas estruturas turbilhonares que se desenvolvem à jusante do aerofólio. Este tipo de estrutura é formada sempre que um aerofólio gera sustentação (VEDOVOTO et al. 2006), e é particularmente preocupante em grandes aeronaves. Nestes casos, as duas grandes estruturas turbilhonares mostradas na Figura 7.22 podem se prolongar por centenas de metros, sendo um perigo real para pequenas aeronaves.

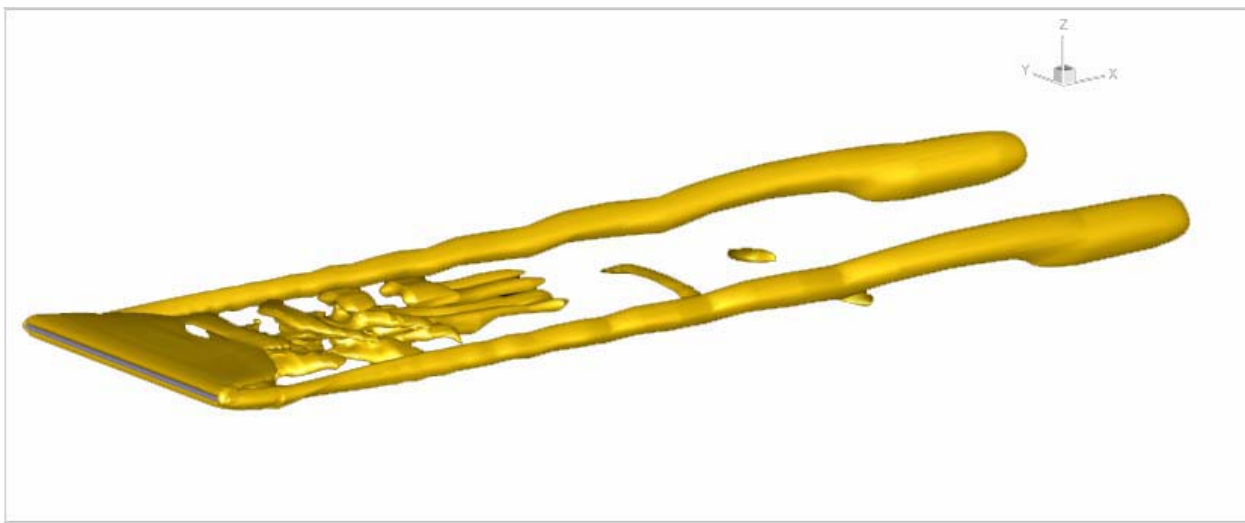


Figura 7.22 – Isso superfícies de $Q = 0,2$ para $t = 5,6$ segundos físicos.

7.2.2 Escoamento sobre um cubo solidário ao plano $z=0$

Esta configuração de escoamento, para a qual o domínio pode ser visualizado na Figura 7.23, apesar de geometricamente simples, promove estruturas altamente complexas no escoamento, como estruturas do tipo grampo de cabelo (*Hairpin vortices*) e ferradura de cavalo (*horseshoes vortices*). Além disso, a escolha de uma geometria que esteja solidária a uma parede do domínio, foi algo que exigiu mudanças no código, para o cálculo de algumas das interpolações necessárias para a avaliação da força lagrangiana.

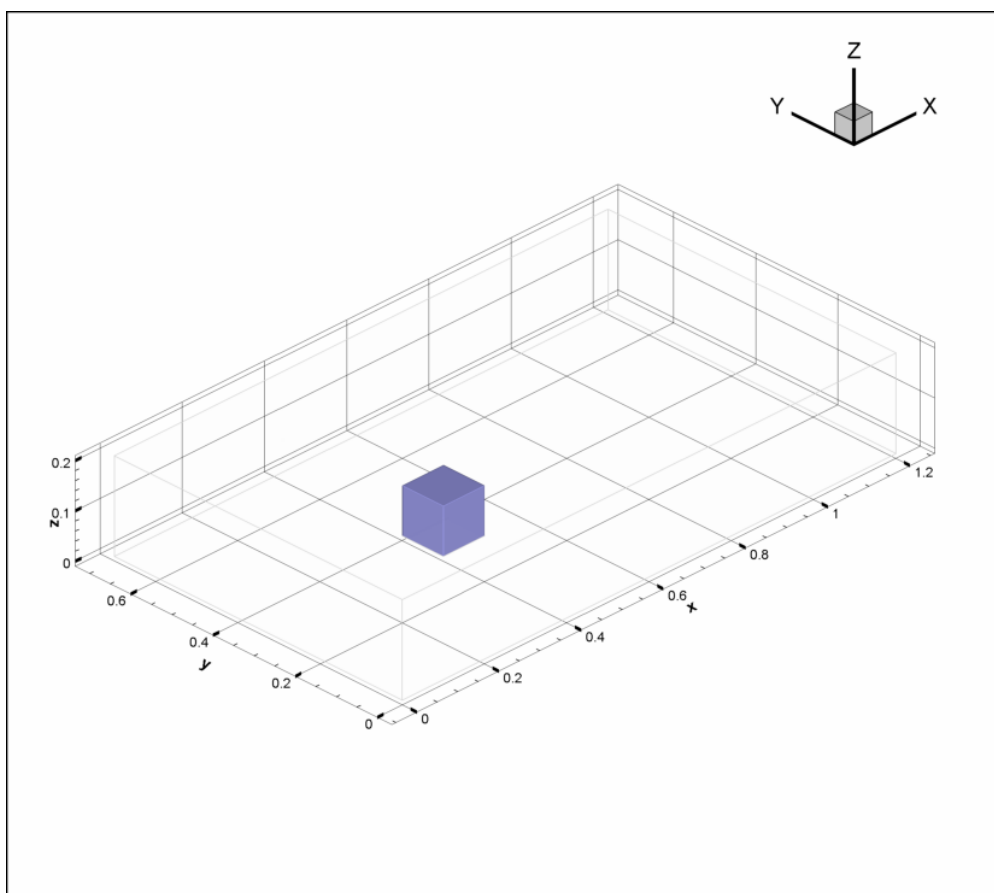


Figura 7.23 - Esquema de posicionamento de um cubo sobre uma parede plana.

Para fins de redução de custo computacional para a avaliação da função indicadora, foi construída uma “caixa” na qual a Fronteira imersa é inserida, Lima e Silva (2002). As dimensões desta caixa devem ser tal que caibam todos os pontos de interpolação, como os indicados na Figura 4.2. A alteração feita, diz respeito a quando pontos de interpolação estariam fora do domínio de cálculo, devido à malha de elementos triangulares da fronteira imersa estar muito próxima, ou solidária à uma parede, como a configuração da geometria mostrada na Figura 7.23. Neste caso, faz-se uma mudança de direção do vetor onde os pontos de interpolação infringiriam as fronteiras do domínio, estes novos vetores, apontariam para a direção oposta à original (Figura 7.24), garantindo que todos pontos necessários para interpolação estejam posicionados dentro do domínio euleriano.

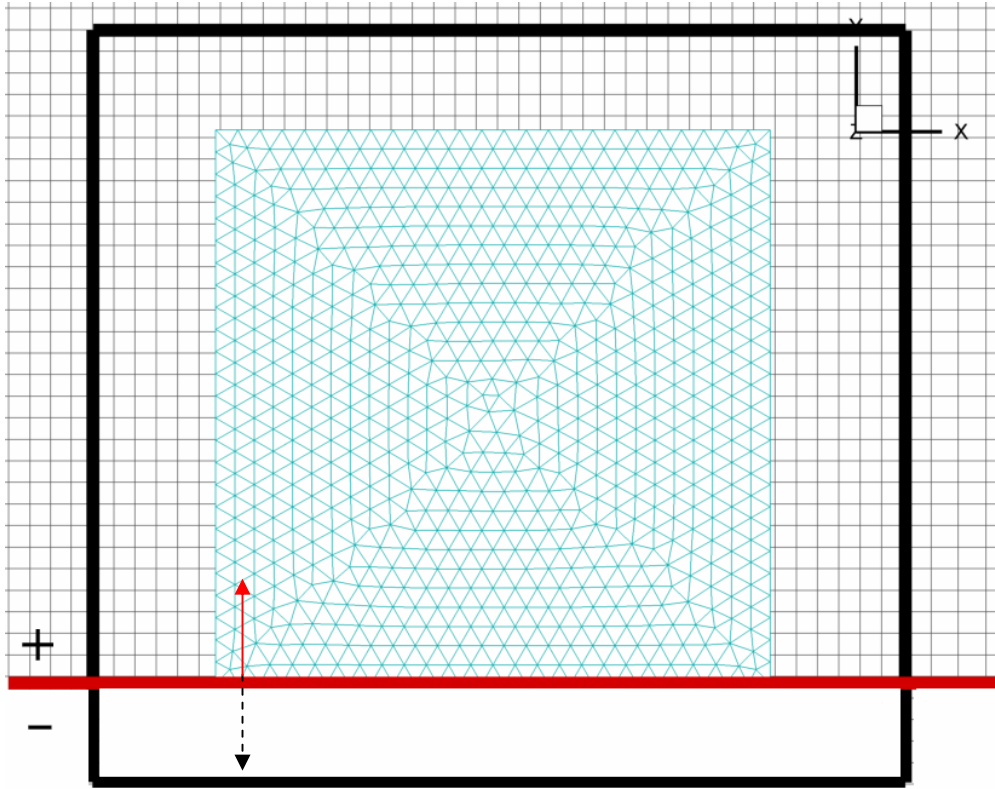


Figura 7.24 - Esquema da mudança na direção de vetores utilizados nos cálculos das interpolações.

A seta pontilhada na região negativa da Figura 7.24 indica o sentido original da posição dos pontos de interpolação das forças lagrangianas, já a seta contínua, na região positiva da figura indica a direção dos pontos de interpolação após a mudança de sentido.

Esta mudança no sentido de alguns vetores para interpolação não representou nenhum problema ao Método da fronteira imersa, uma vez que os resultados obtidos após esta alteração mantiveram-se fisicamente coerentes. Especificamente para o caso do escoamento sobre o cubo solidário a base, uma outra alteração foi necessária. Uma constante *ad hoc* foi adicionada ao termo de aceleração do cálculo da força lagrangiana, desta maneira, para este caso particular, a avaliação da força de aceleração lagrangiana é dada pela equação (7.10):

$$\vec{F}_{acc} = \frac{\rho}{C} \left(\frac{-U_{ki}}{\Delta t} \right) \quad (7.10)$$

onde C é uma constante de valor 0,1, e U_{ki} , é a velocidade do ponto lagrangiano k em um determinado tempo..

Esta mudança foi necessária, pois notou-se durante as simulações, que esta configuração de geometria, por possuir uma razão de bloqueio alta (da ordem de 7,3%), e também devido ao fato de estar em uma região de baixa velocidade, os cálculos da fronteira imersa não geravam uma densidade de forças suficiente para repelir a entrada de fluido para a região da fronteira imersa. Com o uso da constante C , mostrado na eq (7.10), houve uma grande melhora nos resultados.

Hwang e Yang (2004) estudaram o escoamento sobre um cubo solidário a uma parede em $z=0$. As dimensões do domínio computacional, tanto para o trabalho dos autores citados, quanto para as simulações na presente dissertação pode ser visto na Figura 7.23. Este domínio foi dividido em quatro subdomínios para processamento paralelo. Como condições de contorno do domínio euleriano tem-se parede em $z=0$ e superfícies livres em $z=z_{\max}$, $y=0$ e $y=y_{\max}$. Foram realizadas simulações para Reynolds 350 e 1.000. O domínio euleriano têm dimensões 1,2 x 0,7 x 0,2 m e é discretizado em uma malha de 196x136x79 volumes. A Figura 7.25 mostra isosuperfícies de Q obtidos por Hwang e Yan, (2004). Pode-se notar a grande semelhança da Figura 7.25 com a Figura 7.26, obtida nas mesmas condições de simulação, porém com o código Fluids-3D.

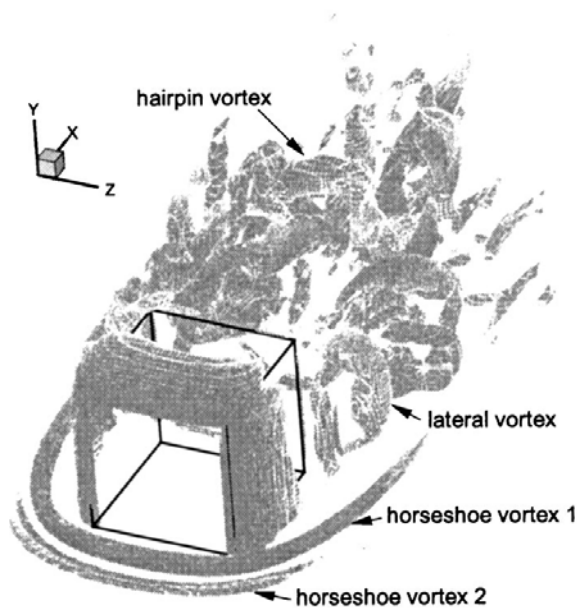


Figura 7.25 - Isosuperfícies de Q obtidos por Hwang e Yang (2004), $Re = 1.000$.

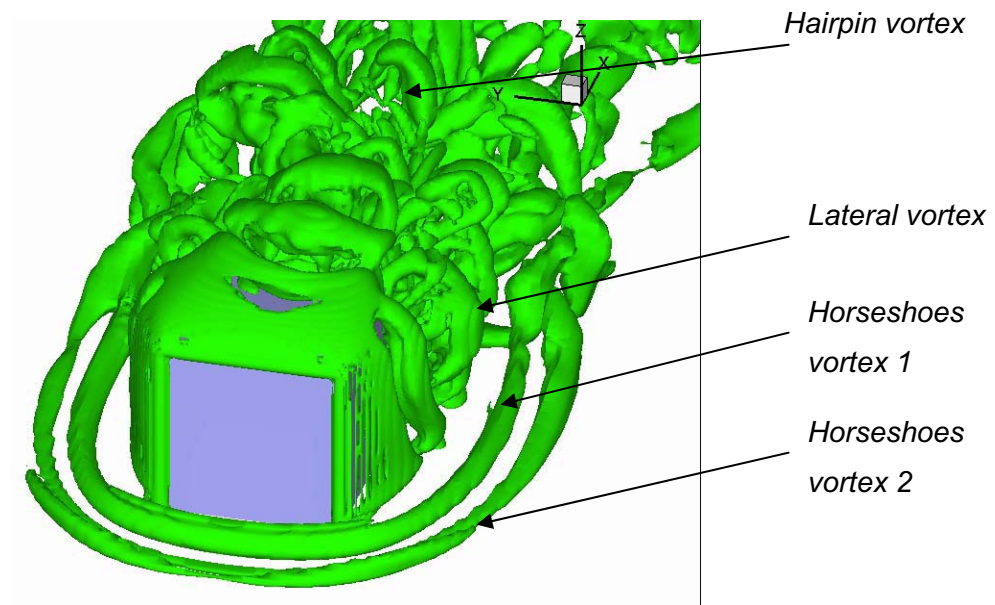


Figura 7.26 - Isosuperfícies de Q obtidos no presente trabalho, $Re = 1000$.

Pode-se notar também a grande semelhança entre a Figura 7.27 e Figura 7.28 , sendo a primeira foi obtida no trabalho de Hwang e Yang (2004), e a ultima obtida no presente trabalho.

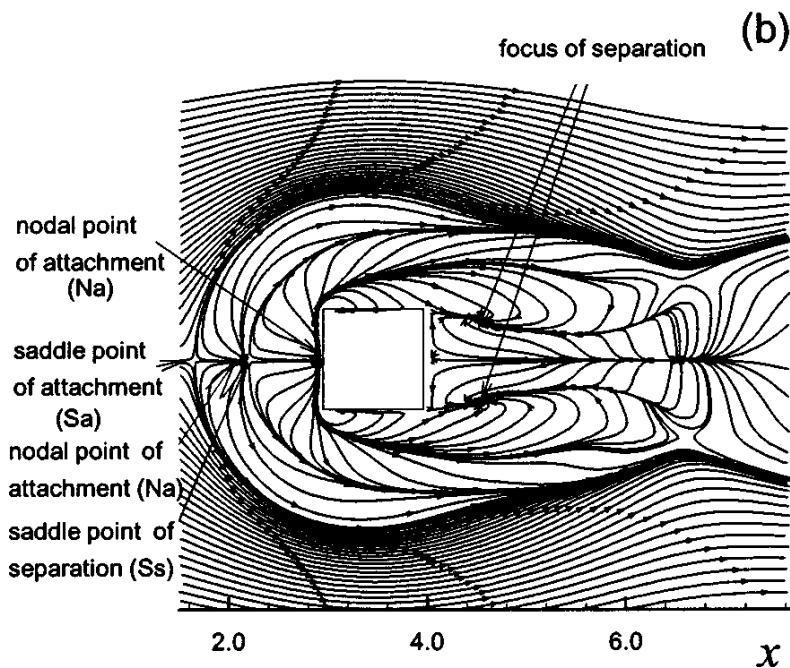


Figura 7.27 - Linhas de corrente a $Re = 350$ plano xz , $x = 0,0053$ m, retirado de Hwang e Yang (2004).

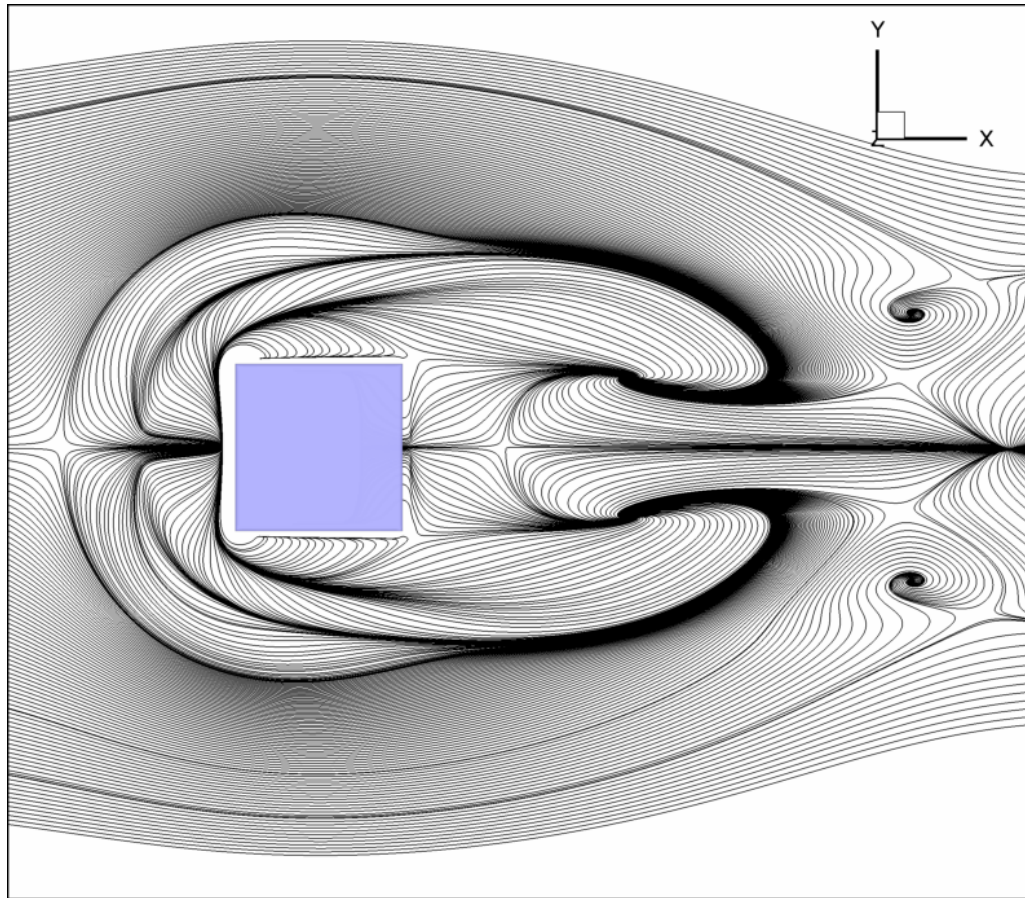


Figura 7.28 - Linhas de corrente vistas em um plano $z = 0,001$ m, $Re=350$.

A Figura 7.29 e a Figura 7.30 mostram linhas de corrente tridimensionais indicando a formação de vórtices tipo ferradura de cavalo em duas vistas distintas, a primeira mostra uma vista tridimensional, e a última mostra uma vista do plano xz . A Figura 7.31 mostra isosuperfícies de $Q = 75$, coloridas por valores da velocidade u , para Reynolds 1.000.

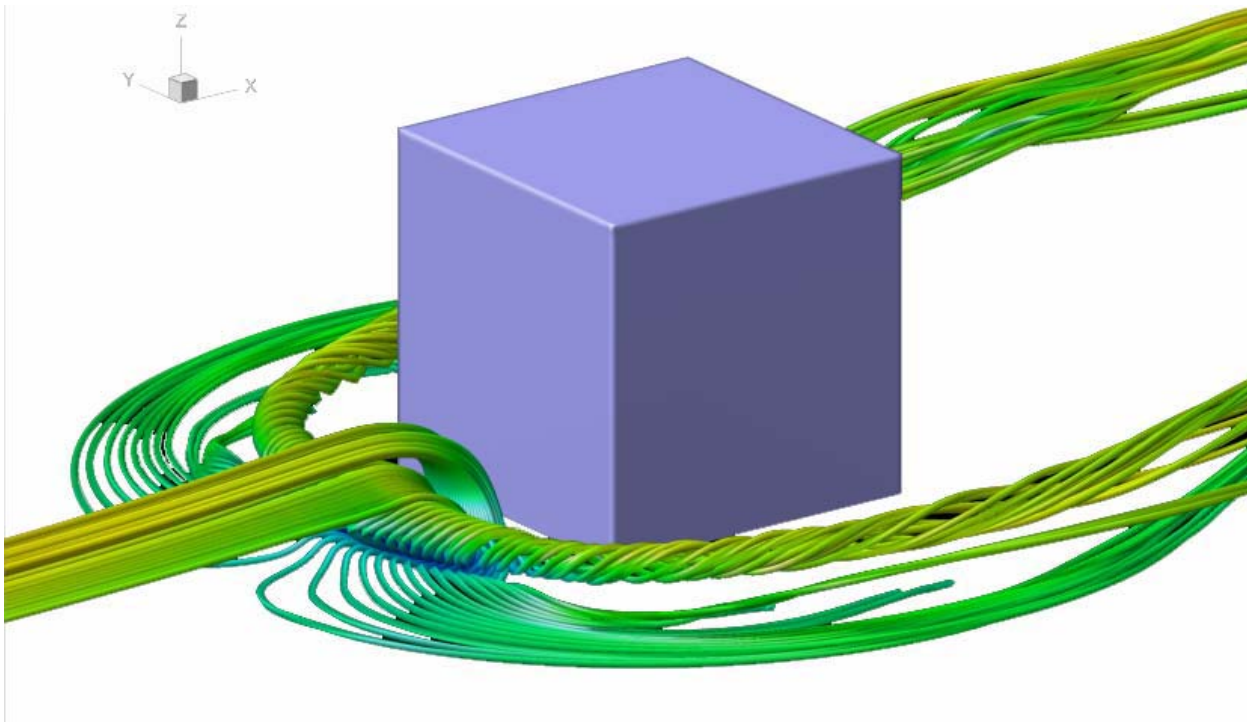


Figura 7.29 - Linhas de corrente tridimensionais do escoamento sobre um cubo solidário a base, $Re= 1.000$.

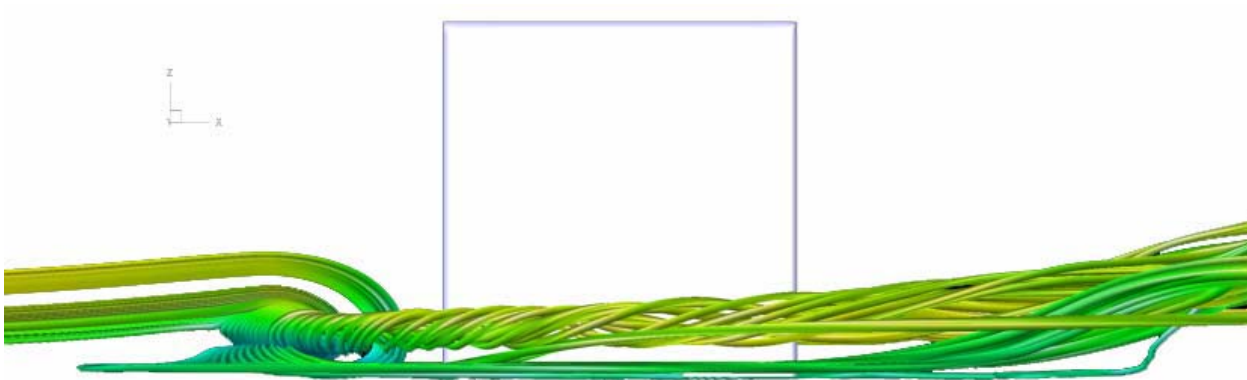


Figura 7.30 - Linhas de corrente tridimensionais do escoamento sobre um cubo solidário a base, vista do plano xz, $Re= 1.000$.

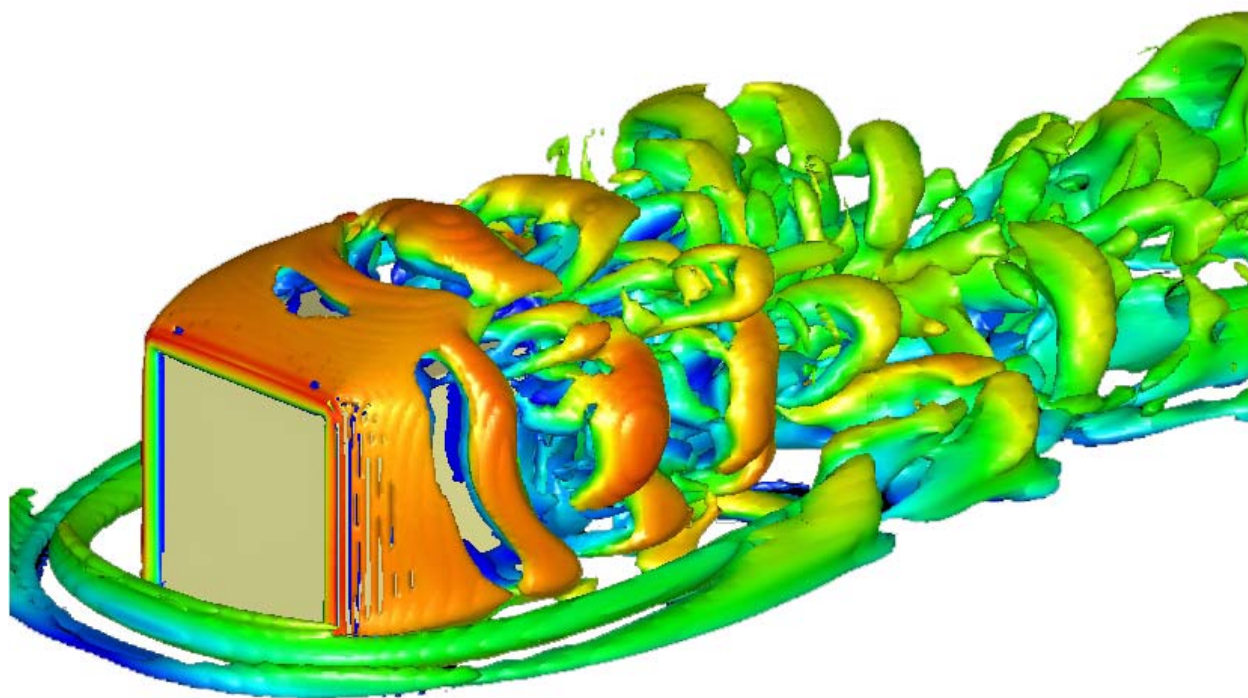


Figura 7.31 - Isosuperfícies de $Q = 75$, coloridas por valores da velocidade u , para $Re = 1.000$.

É feita uma comparação quantitativa entre escoamentos a números de Reynolds 350 e 10.000. Na Figura 7.32, pode-se notar três pares de curvas de evolução temporal. Estes pares de curvas representam, para os dois regimes de escoamento (Reynolds 350 e 1.000), o coeficiente de arrasto, coeficientes lateral e de sustentação, conseqüentemente. Nota-se na Figura 7.32, que existe um leve incremento no valor do coeficiente de arrasto para Reynolds 350, o que é esperado fisicamente. Já para os coeficientes lateral e de sustentação, nota-se que não há diferenças significativas, uma vez que cada par de curvas oscila, respectivamente próximo a um dado valor, ou seja, o coeficiente lateral, tanto para Reynolds 350 quanto para Reynolds 1000, oscila próximo à 0,4, já o coeficiente de sustentação, oscila com valores próximos a zero para ambos as simulações.

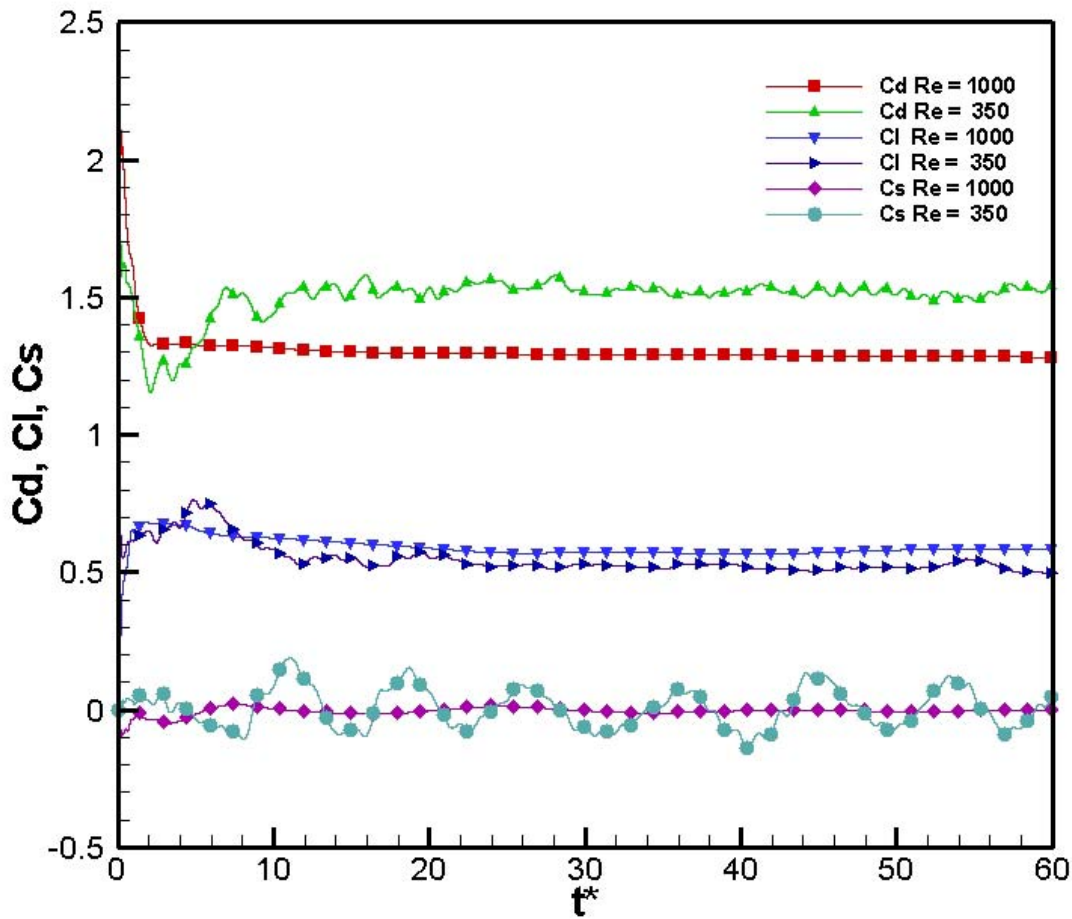


Figura 7.32 - Evolução temporal de parâmetros quantitativos para o escoamento sobre um cubo solidário à uma parede.

7.2.3 Escoamento sobre uma estrutura treliçada

Dando prosseguimento ao objetivo de testar a robustez do código Fluids-3D, e à facilidade de importação de geometrias complexas, foi escolhido um corpo imerso tipo estrutura treliçada, mostrada na Figura 7.33. Esta geometria foi escolhida devido ao fato de possuir várias junções e travamentos, o que a priori, poderiam fazer com que o código divergisse ou

não apresentasse resultados consistentes fisicamente. O modo como esta geometria é inserida com domínio euleriano é mostrado na Figura 7.34.

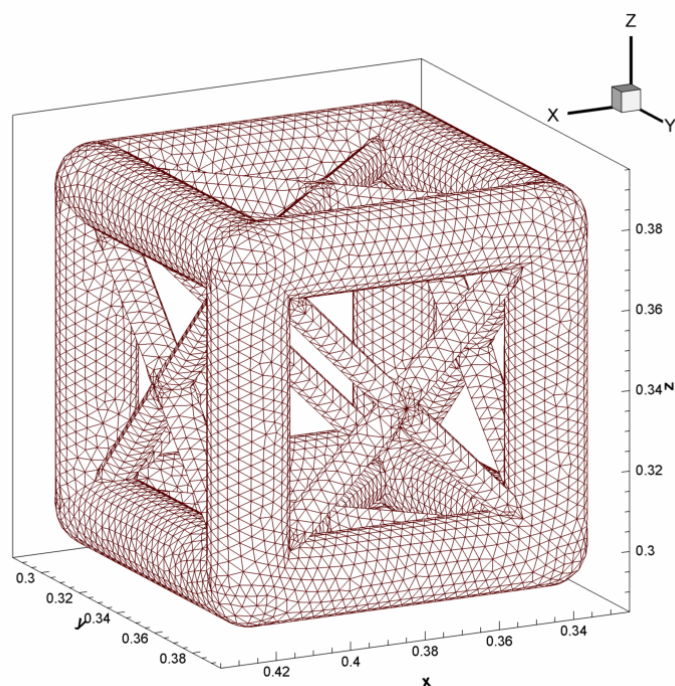


Figura 7.33 - Malha de elementos triangulares utilizada para representar uma estrutura treliçada.

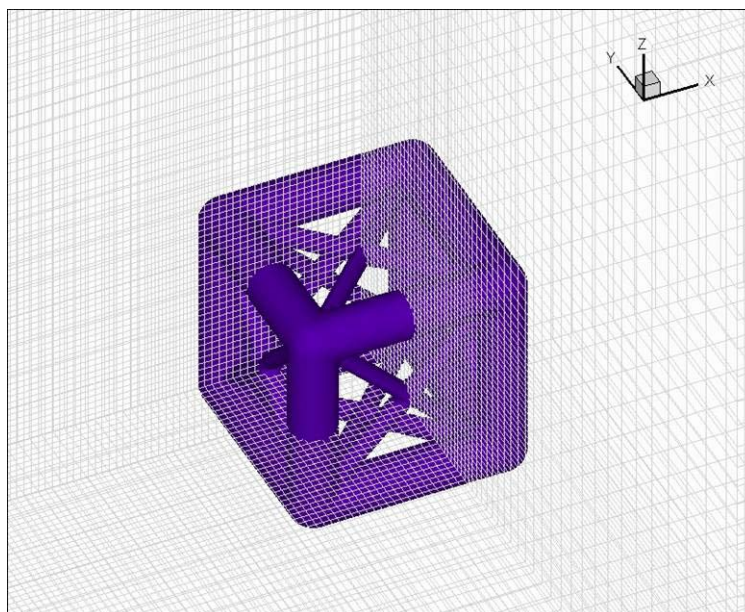


Figura 7.34 – Geometria da Figura 7.33 inserida no domínio euleriano.

O processo de geração de uma malha como a mostrada na Figura 7.33 segue alguns passos básicos, que podem ser listados:

- Desenho da geometria em alguma ferramenta CAD (Computer Aided Design). Usa-se uma ferramenta como esta devido à facilidade de desenho;
- Alguns softwares CAD, já vêm com a opção de exportar a geometria de interesse no formato **.stl*. Caso a ferramenta CAD não ofereça um controle adequado da exportação de um arquivo **.stl*, deve-se exportar a geometria em algum formato que pode ser lido por um gerador de malhas comercial, como a extensão **.sat*, por exemplo. A estrutura treliçada seguiu esta última opção.
- Caso o arquivo **.stl* esteja adequado, simplesmente insere-se o nome deste arquivo em um dos arquivos de *set-up* adequado (os arquivos de *set-up* já foram listados no capítulo 5).
- Caso haja a necessidade do uso de um gerador de malhas comercial, importa-se neste gerador a geometria recém gerada e cria-se uma malha de elementos triangulares. Como gerador de malhas comercial, neste trabalho fez-se o uso do gerador de malha do software Ansys.
- O Ansys possui uma opção de listar todos o nós de uma malha de elementos triangulares, bem como suas conectividades.
- De posse dos arquivos de nós e conectividades, simplesmente insere-se o nome destes arquivos nos arquivos de *set-up* adequados (já listados no capítulo 5).

O processo de criação da geometria em um software CAD, bem como a geração da malha, para uma geometria como a da Figura 7.33, não exige mais que 20 minutos.

O escoamento da estrutura treliçada foi comparado com o escoamento sobre um cubo imerso, na mesma posição e com as mesmas dimensões, e também com arestas arredondadas. Este corpo pode ser visto na Figura 7.35

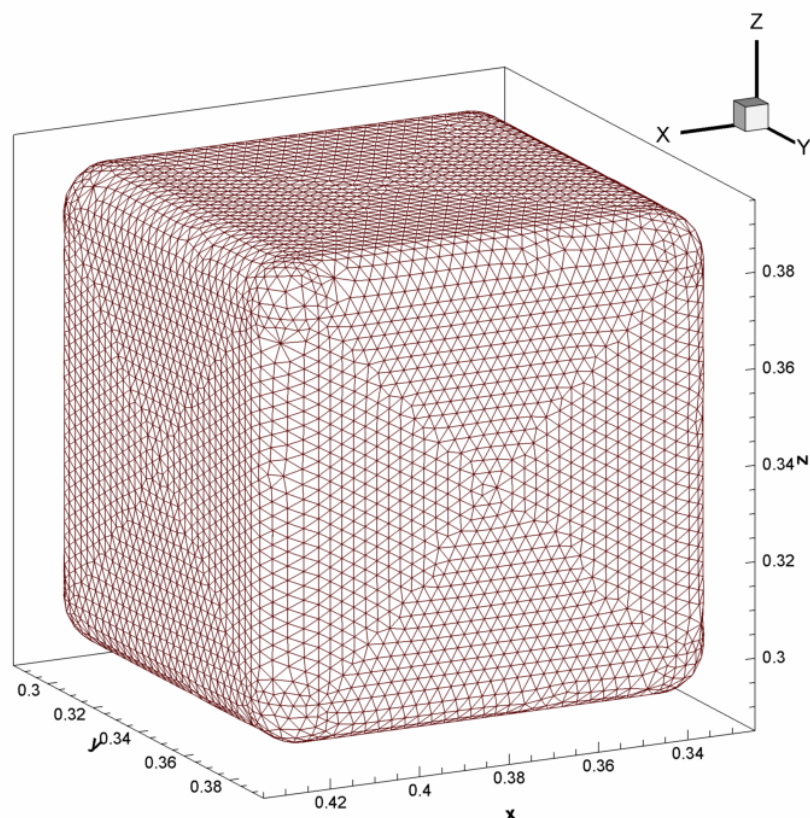


Figura 7.35 - Cubo com arestas arredondadas representado por malhas de elementos triangulares.

O domínio euleriano utilizado para ambas as configurações de geometrias, já subdividido em quatro subdomínios para processamento em paralelo é mostrado na Figura 7.36. Tal domínio têm dimensões máximas de $1,0 \times 0,68 \times 0,68 m$ e é discretizado em uma malha de $166 \times 116 \times 116$ volumes. Vale ressaltar que devido à paralelização da fronteira imersa ainda não ter sido implementada, faz-se com que esta esteja confinada em um único processador, neste caso, o processador que contém o objeto imerso é, na Figura 7.36, o segundo da esquerda para direita.

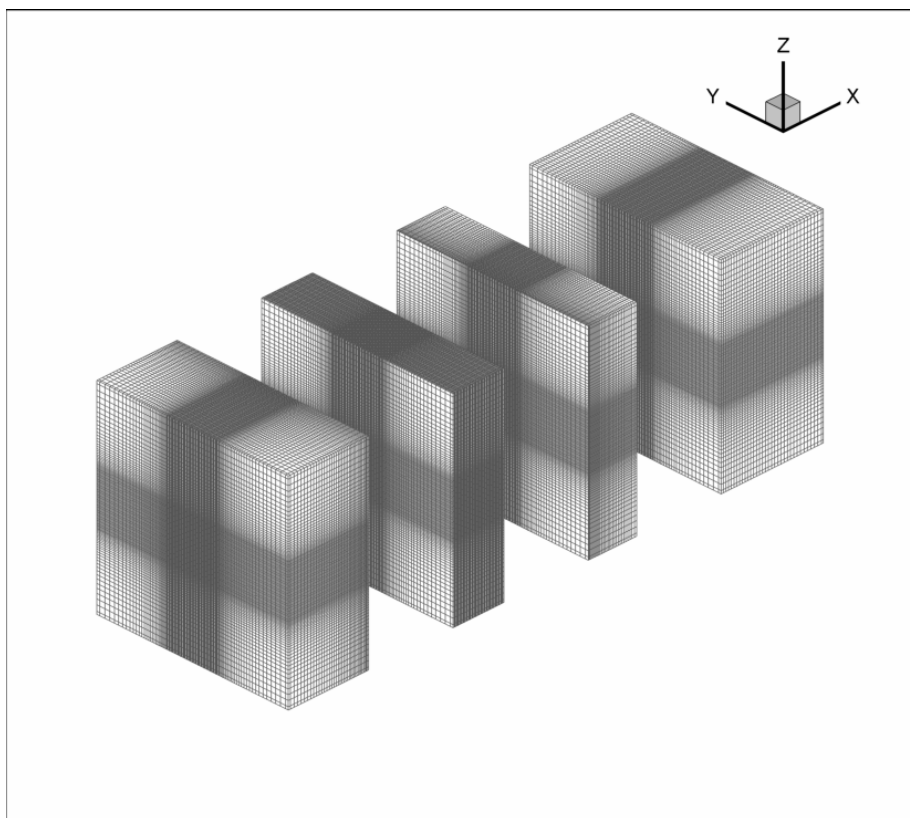


Figura 7.36 - Malha euleriana para simulação do escoamento sobre uma estrutura treliçada.

Como condições de contorno do domínio euleriano tem-se paredes nas faces $y=0$, $y=y_{\max}$, $z=0$ e $z=z_{\max}$. O perfil de velocidades na entrada é uniforme com $u=U_{\infty}$, $v=w=0$. Todas as simulações foram feitas para um número de Reynolds $Re = 1.000$.

Lima e Silva et al. (2005), utilizando o Método da fronteira imersa, simulou o escoamento bidimensional sobre um trecho de uma torre de extração de petróleo (Figura 7.37). O resultado de tal simulação mostrou-se interessante do ponto de vista físico, pois mostrou que ao invés de o escoamento criar pequenas estruturas do tamanho característico dos elementos que compõe a geometria imersa, notou-se a criação de vórtices da mesma ordem de grandeza da estrutura macro. Amostras de tal resultado podem ser visualizadas na Figura 7.38.