

As figuras acima citadas e a figura 4.16 mostram isosuperfícies de $Q = 10$, para o escoamento a jusante de uma esfera, simulado com malhas gerada com o GMSH e com software comercial. A visualização efetuada nas figuras, foram elaboradas utilizando-se TecPlot. Observa-se a figura 4.16 ilustrando semelhança entre os resultados baseados nas isoQ (Vedovoto, 2007).

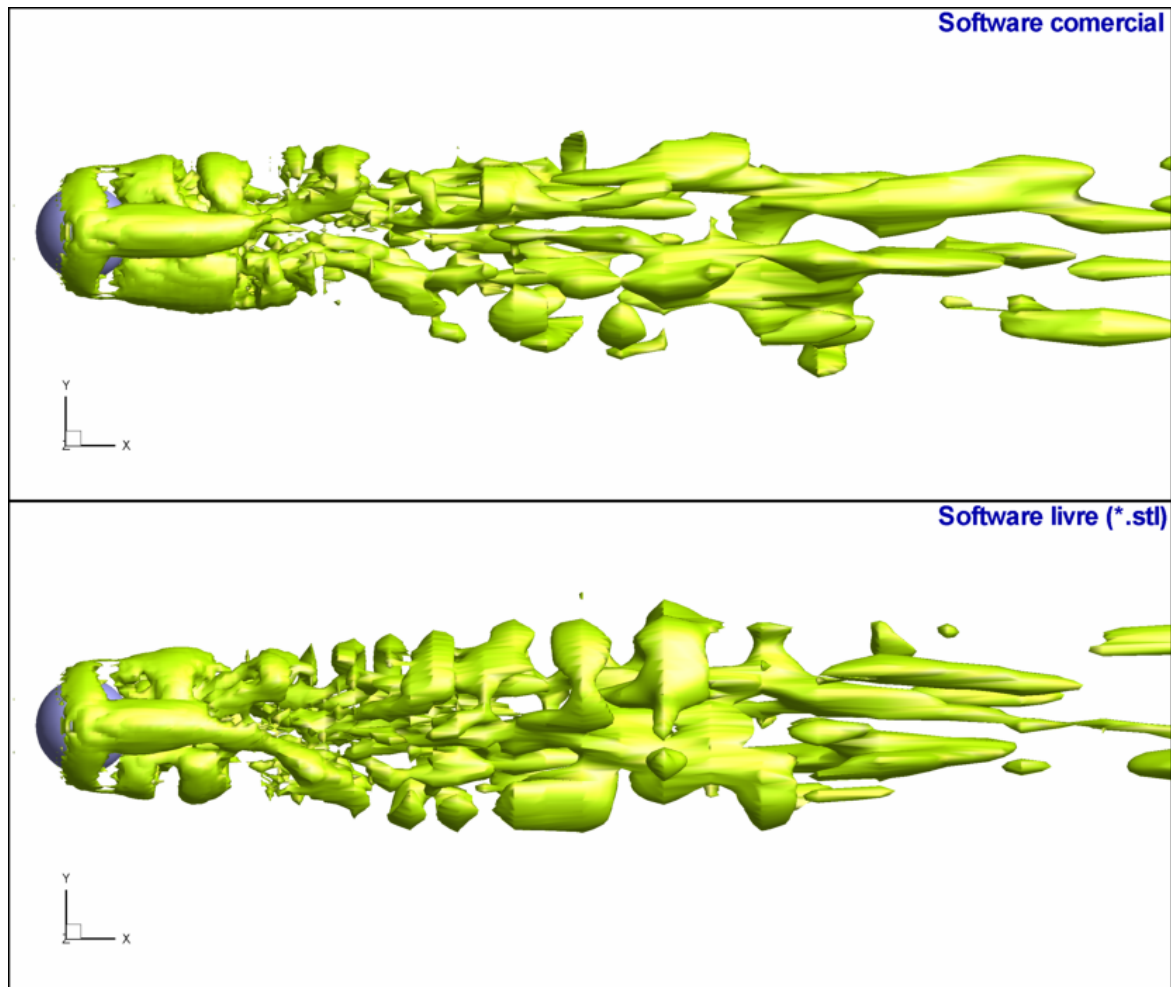


Figura 4.16. Estruturas turbilhonares geradas a jusante de uma esfera, vistas no plano XY, em $t = 7,0s$ (Vedovoto, 2007).

O coeficiente de arrasto é definido abaixo, Eq. 4.5:

$$C_D = \frac{F_x}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho U_\infty^2 \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)}, \quad (4.5)$$

sendo F_x a força de arrasto, agindo sobre o corpo imerso (no caso, a esfera), obtida no

presente trabalho a partir do Modelo Físico Virtual (Campregher, 2005). É interessante salientar que seu valor é uma resposta direta da metodologia de fronteira imersa, não sendo necessário nenhum procedimento adicional para a avaliação da força de arrasto. Esta é uma forma totalmente diferente de se avaliar a força de arrasto (ou de sustentação) em um corpo, pois, nas metodologias tradicionais, é necessário obtê-la de forma indireta como, por exemplo, a partir da distribuição de pressão e de tensões cisalhantes na superfície do corpo.

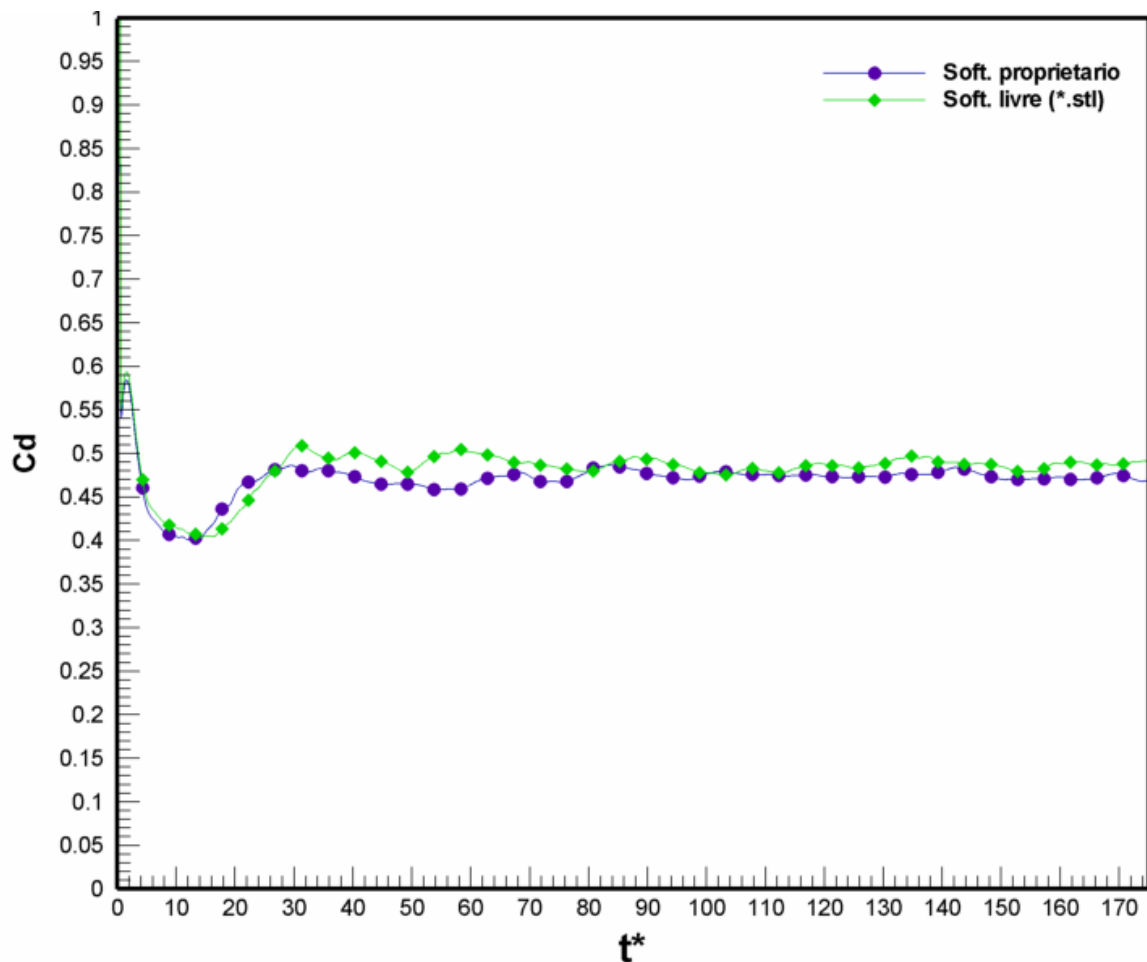


Figura 4.17. Coeficiente de arrasto C_D a $Re = 1.000$, em função de t^* , (Vedovoto 2007).

O tempo adimensional t^* é dado por:

$$t^* = \frac{t \cdot U_\infty}{D},$$

onde t é o tempo físico e D é o diâmetro da esfera.

A partir da Figura 4.17 acima, pôde-se perceber que os resultados para o coeficiente de arrasto são bastante satisfatórios para o número de Reynolds simulado, tanto para a

malha usada no pacote comercial quanto para o GMSH (Oliveira et al., 2006). Como dito no capítulo anterior, a interface utilizada não se vale de pós-processamento, sendo assim, os gráficos citados neste capítulo foram produzidos com software proprietário (TecPlot) após se ter extraídos todos os dados calculados pelo solver, realizando um download destas informações, e passando para o software para realizar o pós-processamento.

Outros parâmetros igualmente importantes, obtidos de maneira semelhante ao coeficiente de arrasto, são o coeficiente de sustentação (*lift coefficient* – C_L) e o coeficiente lateral (*side coefficient* – C_S) avaliados, respectivamente, com a Eq. 4.6 e com a Eq. 4.7:

$$C_L = \frac{F_z}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho U_\infty^2 \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)}, \quad (4.6)$$

$$C_S = \frac{F_y}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho U_\infty^2 \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)}, \quad (4.7)$$

onde F_y e F_z são a somatório das forças que atuam sobre a esfera nas direções y e z , respectivamente.

Nas Figuras 4.18 e 4.19, respectivamente, pode-se visualizar os resultados de C_L e C_S para $Re = 1.000$, indicando o comportamento aleatório da emissão de estruturas turbilhonares à jusante da esfera. Neste gráfico especificam-se as regiões do escoamento onde se encontram fortes áreas de deformação do fluido.

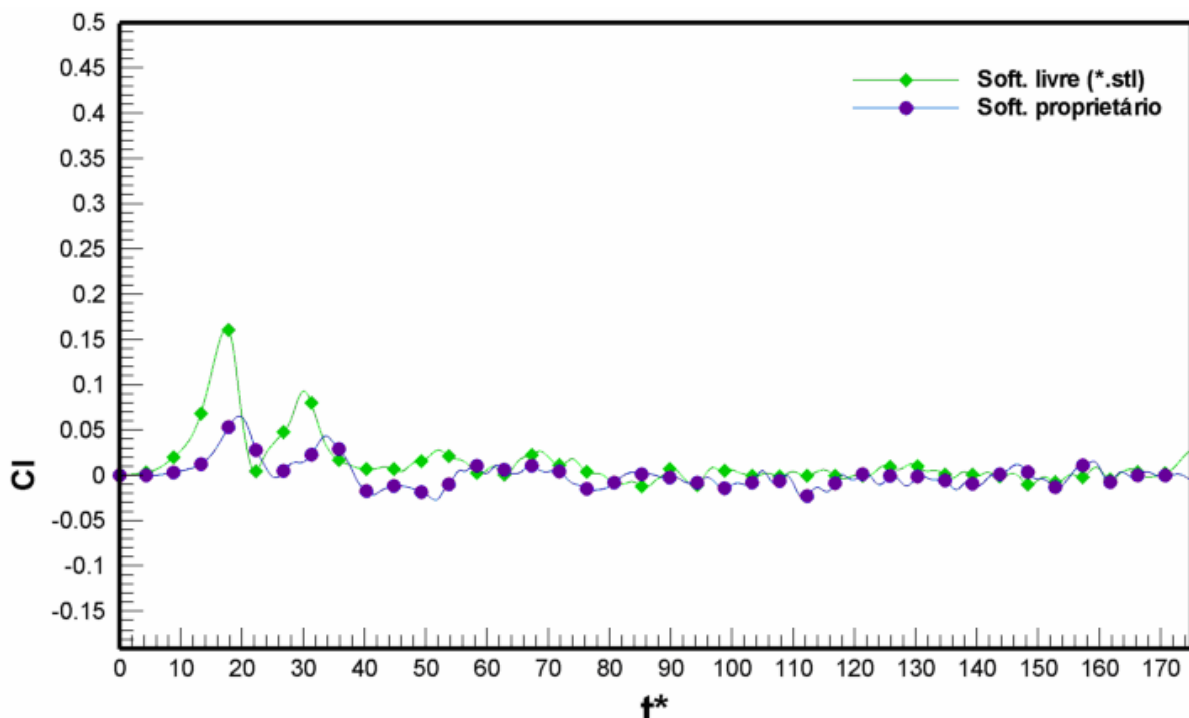


Figura 4.18. Coeficiente de sustentação (C_L) para $Re = 1.000$, (Vedovoto, 2007).

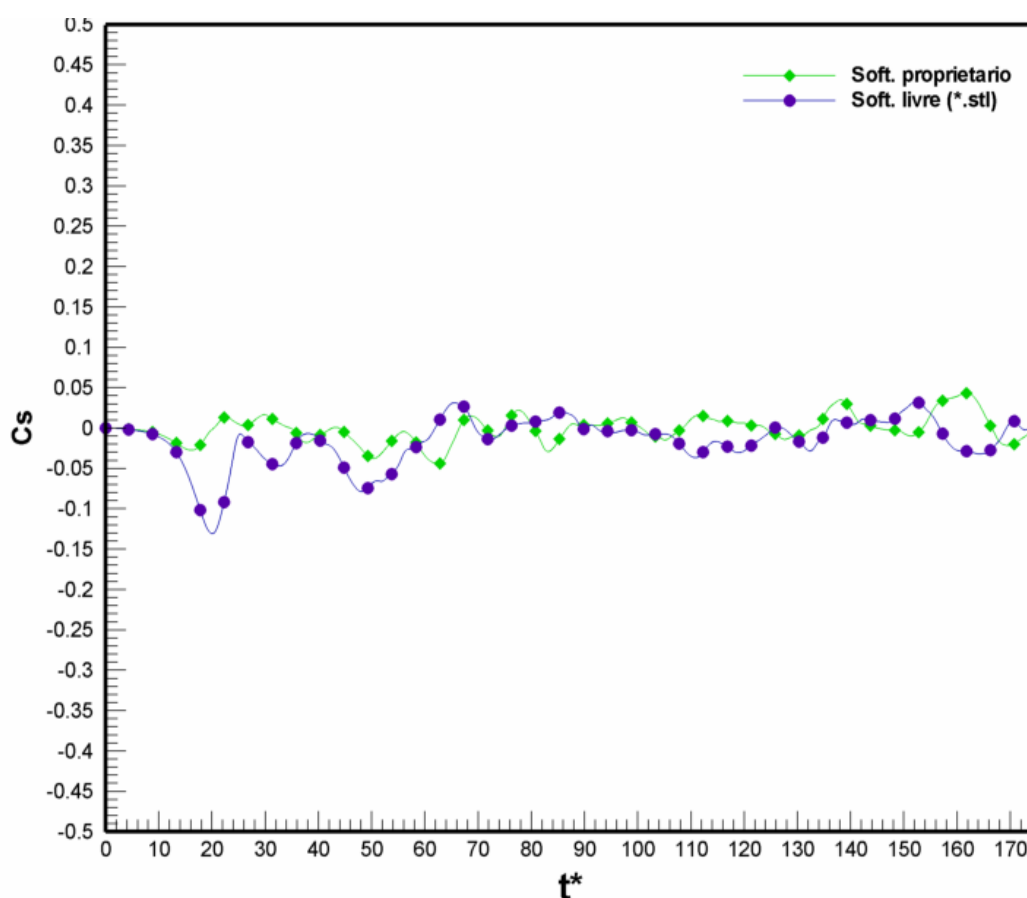


Figura 4.19 - Coeficiente lateral (C_s) para $Re = 1.000$ (Vedovoto, 2007).

Avaliando estatisticamente, os valores para o coeficiente de sustentação gerados a partir de dois softwares geradores de malha, nota-se que são em média compatíveis, porém para o coeficiente lateral podemos notar maiores variações devido ao mesmo ser mais sensível ao tipo de malha gerada, uma vez que o GMSH não consegue gerar uma malha feita com elementos completamente iguais (triângulos equiláteros), havendo nesta malha variações de tamanho dos triângulos. Contudo, pode-se verificar que nos cálculos realizados, os valores médios tendem a convergir para um valor semelhante, validando o resultado para esfera gerada pelo GMSH (Oliveira et al., 2006).

Um outro parâmetro importante a ser calculado sobre a geometria é o L_2 , que é definido aqui como a raiz quadrada da norma da diferença entre a velocidade do fluido sobre a interface fluido/sólido e da velocidade desta interface (que no caso da esfera estacionária tem valor nulo). Este parâmetro tem por finalidade medir se há condição de não deslizamento sobre a interface está sendo bem modelada, através do campo de força calculado. Como esperado, L_2 deve tender a zero à medida que o tempo evolui, visto que a velocidade do fluido sobre a interface tende ao valor da velocidade da interface.

Na Figura 4.20, visualiza-se a evolução temporal do parâmetro L_2 , para o

escoamento sobre a esfera onde o número de Reynolds é igual a 1.000.

A pequena diferença existente entre o L_2 produzido pela esfera feita com o pacote comercial, e o L_2 produzido pela esfera feita no GMSH, é devido a não uniformidade existente na malha produzida pelo GMSH, apesar de que esta última esfera possui aproximadamente duzentos pontos a mais que a do pacote comercial, representando assim uma área superficial um pouco maior que a malha da esfera do software comercial (Oliveira et al., 2006).

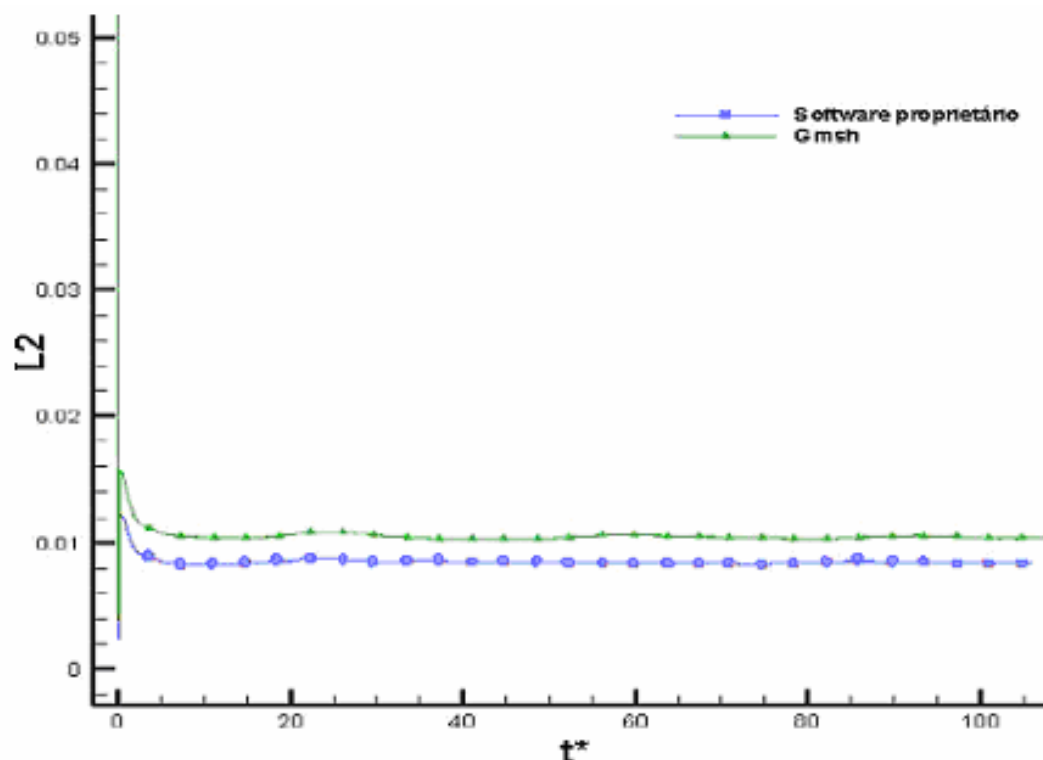


Figura 4.20 - Evolução temporal do parâmetro L_2 para $Re = 1.000$.

4.3 .Qualidade das Malhas

Como se pôde notar no tópico anterior, os resultados quantitativos calculados usando a malha de cada geometria, depende da qualidade que esta malha oferece ao código computacional.

Um fator desfavorável que o GMSH demonstra na geração das geometrias é gerar elementos geométricos por composição de superfícies, fragmentando assim a geometria em faces, como mostrado no item anterior, com as figuras 4.13 “c” e “d” Esta fragmentação gera bordas com deformações na malha, diminuindo a qualidade das mesmas. Mesmo diminuindo a qualidade das malhas, esta fragmentação em faces é um fator relativo à

geometria complexa que se queira produzir, pois se a geometria for composta por faces quadradas, nas malhas geradas com o GMSH, essas irregularidades não aparecerão.

Figura 4.21

Analisando as características dos elementos triangulares de malha, tomando por base um cubo gerado por um software comercial, figura 4.21, observa-se que este cubo é composto por triângulos na sua maioria equiláteros. Sendo assim, pode-se admitir ser uma malha de qualidade para obter resultados quantitativos.

Como mostrado anteriormente, há de se esperar que, a malha gerada no GMSH apresente algumas deformações nos encontros entre cada face da geometria. Porém, na análise da figura 4.22, pode-se verificar que o esperado não acontece, uma vez que a forma geométrica sobre a qual deve ser gerada a malha é favorável à triangularização.

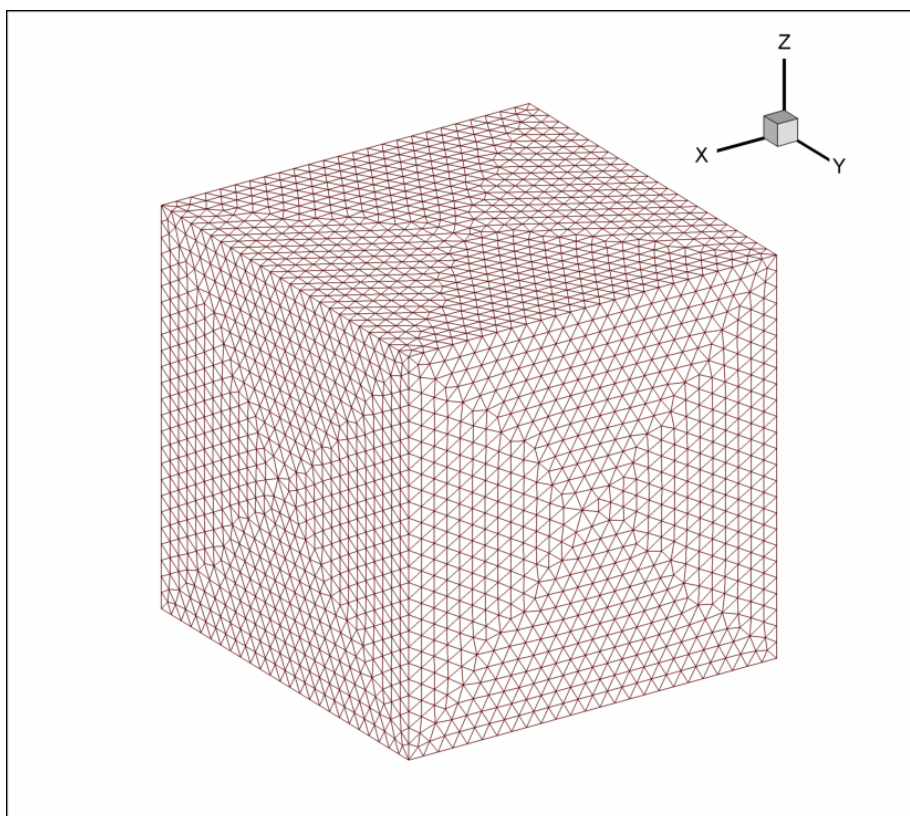


Figura 4.21. Malha de elementos triangulares representando um cubo (Vedovoto, 2007).

Portanto, ao se comparar as duas figuras, pode-se concluir que a malha gerada pelo GMSH é tão recomendada para a simulação computacional, quanto a malha gerada pelo software comercial.

Como vê-se abaixo, a figura é favorável a triangularização, e por consequência poderia ter sua face representada apenas por dois triângulos em cada face. Isso não ocorre pois na metodologia da fronteira imersa, para se reconhecer uma geometria através de um

campo de força, ela deve apresentar uma quantidade de pontos suficientes, de forma que cada ponto da malha lagrangiana se enquadre em um elemento da malha do domínio contíguo (malha euleriana).

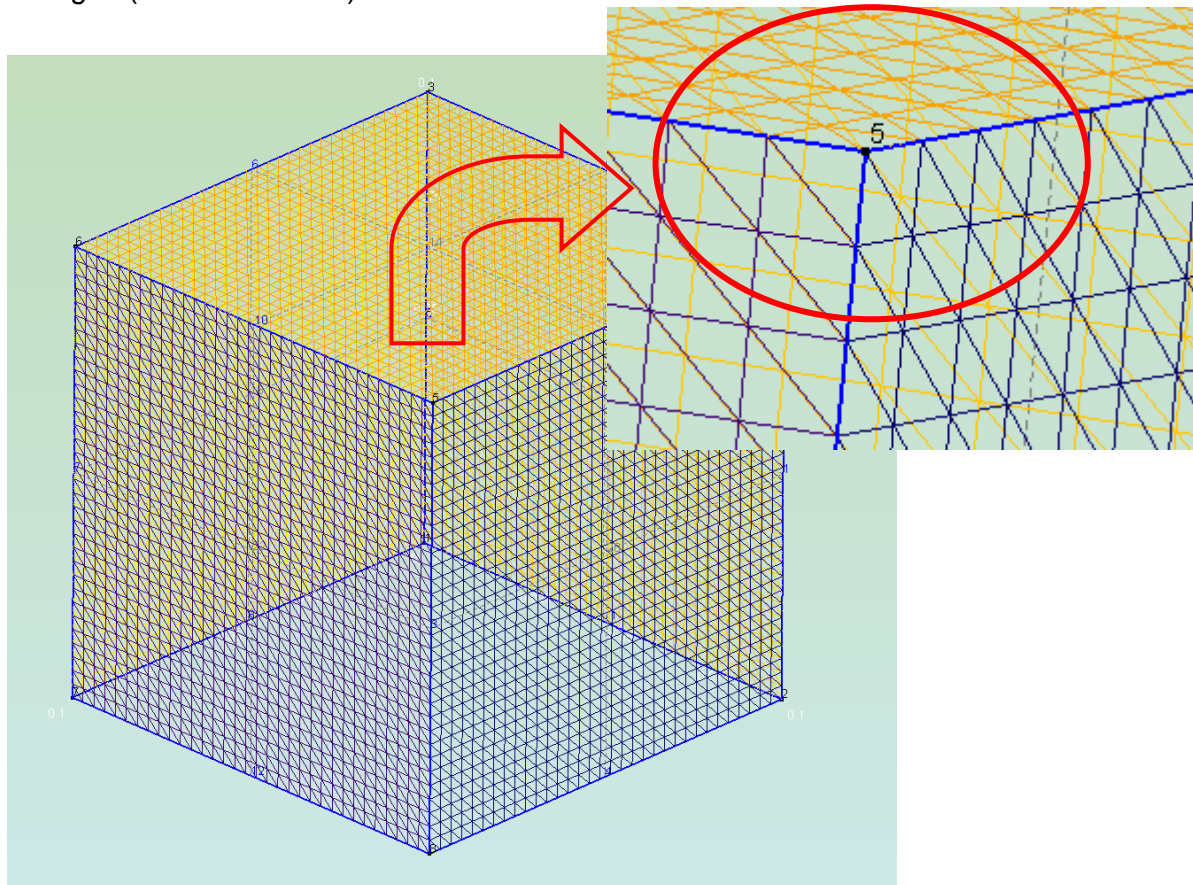


Figura 4.22. Malha gerada pelo GMSH, sem deformações nas faces e nas bordas.

4.3. Geração de geometrias complexas e validação das malhas

Nesta seção serão apresentadas as malhas de geometrias complexas, sendo uma delas a de um protótipo de automóvel e a outra, a de um protótipo de um avião. Essas geometrias servirão para mostrar o nível de complexidade que se pode alcançar, mesmo usando uma ferramenta gratuita geradora de malhas.

4.3.1. Protótipo de um automóvel

A geometria do protótipo em questão foi baseada em um automóvel esportivo, o Lamborghini Gallardo. Como foi explicado anteriormente, para se construir uma geometria desta complexidade, foi realizada uma consulta no *site* www.lamborghini.com, onde foram encontradas especificações referente ao comprimento, largura e altura do automóvel.

Maiores detalhes foram retirados através da visualização de fotografias do automóvel, de vários ângulos. A escolha deste carro como modelo, foi feita pelo fato dele possuir uma geometria aerodinâmica e ter uma altura em relação ao solo pouco significativa, de forma que ao simular um escoamento sobre o mesmo, este poderia ser comparado com escoamento sobre geometrias simples que possuem resultados validados, por exemplo, o escoamento sobre um cubo apoiado no solo.

A malha de elementos triangulares que representa o protótipo, mostrada na figura 4.23, é composta por 11.486 nós e 22.953 elementos, que é uma malha bastante representativa para um objeto com escala em centímetros.

Apesar de ser um modelo simplificado de automóvel, cuidados foram tomados para que o protótipo tivesse características próximas da real, como a criação de rodas independentes, como mostrado na figura 4.24.

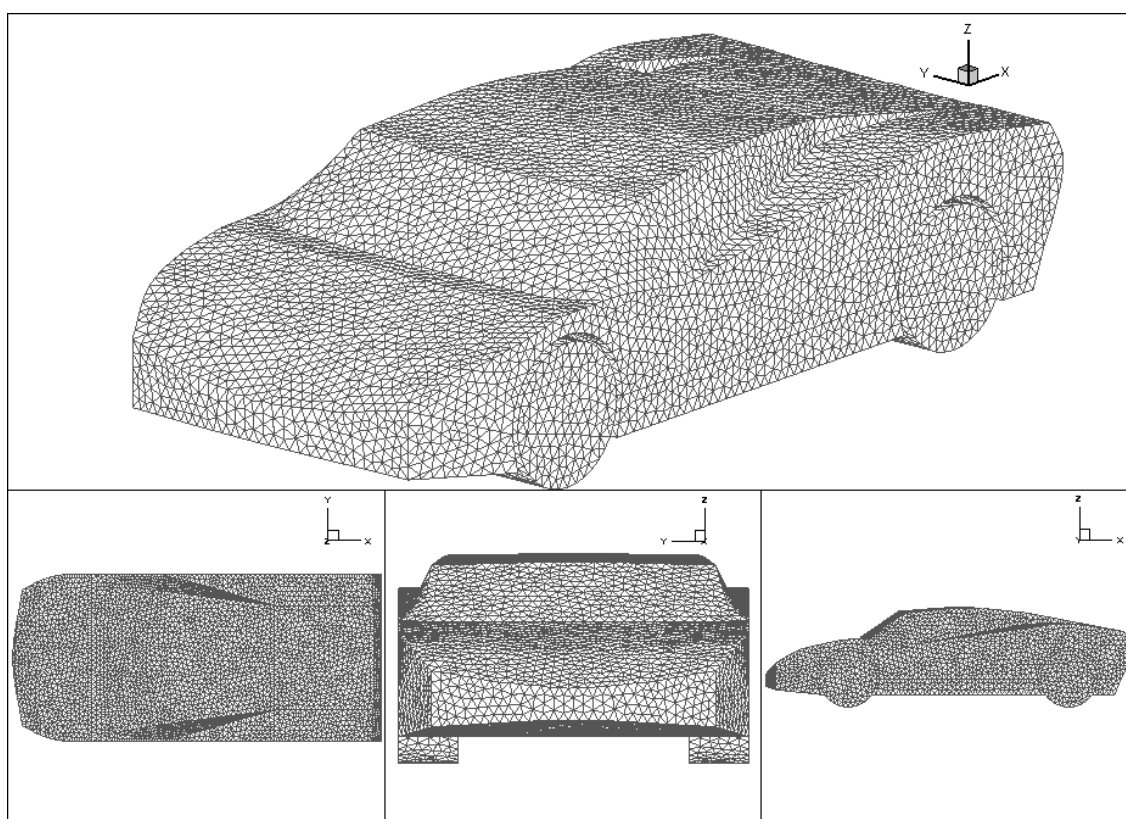


Figura 4.23. Malha de elementos triangulares representando um protótipo de automóvel.

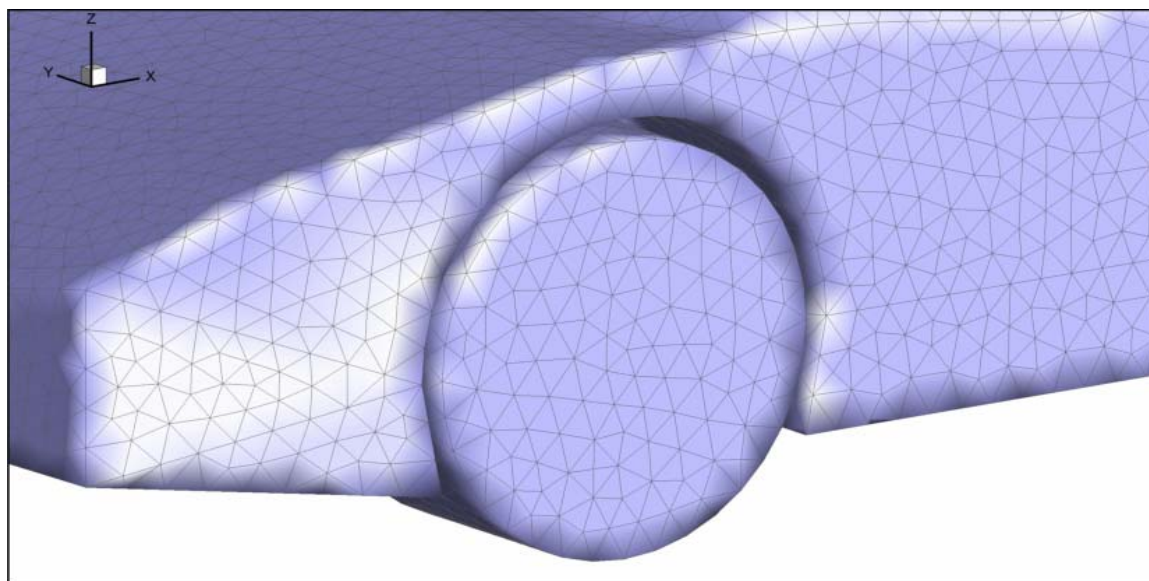


Figura 4.24. Detalhe da roda dianteira do protótipo do automóvel.

A composição da geometria do automóvel, como citado anteriormente, foi realizada através da comparação com imagens do modelo. A princípio, foi traçado o perfil que assumiu a posição em um dos eixos do plano cartesiano, como mostrado na figura 4.25. Com exceção do bordo de ataque dianteiro (figura 4.27), toda a lateral do carro é uma geometria plana, compostas por linhas retas ou *splines* (Exemplos de splines: linhas em vermelho).

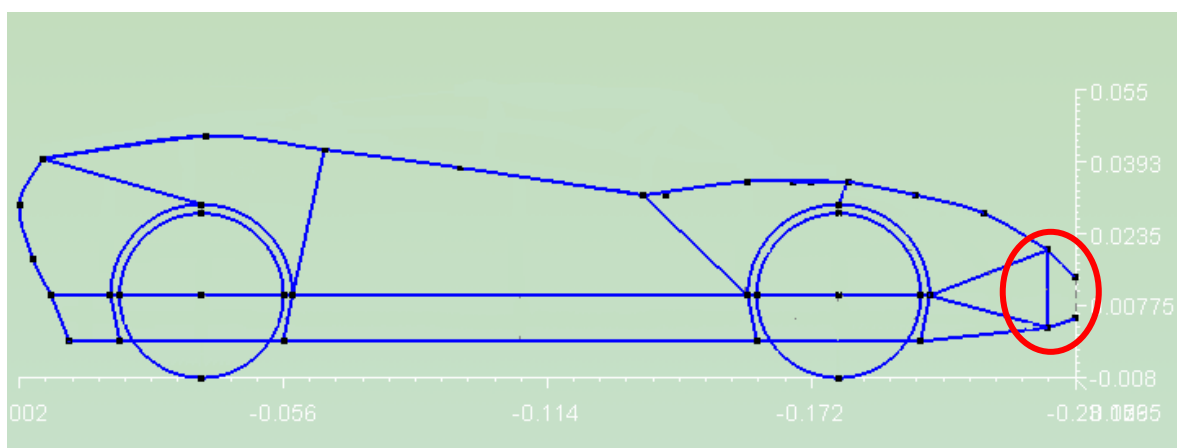


Figura 4.25. Perfil sobre o eixo z, parte plana do carro.

Após ter sido traçado o perfil do carro, a forma mais simples de construir o perfil do lado oposto, é transladando os pontos do perfil acima visualizado, em direção oposta ao eixo. Assim, obtém-se a outra face do protótipo, visualizado na figura 4.26.

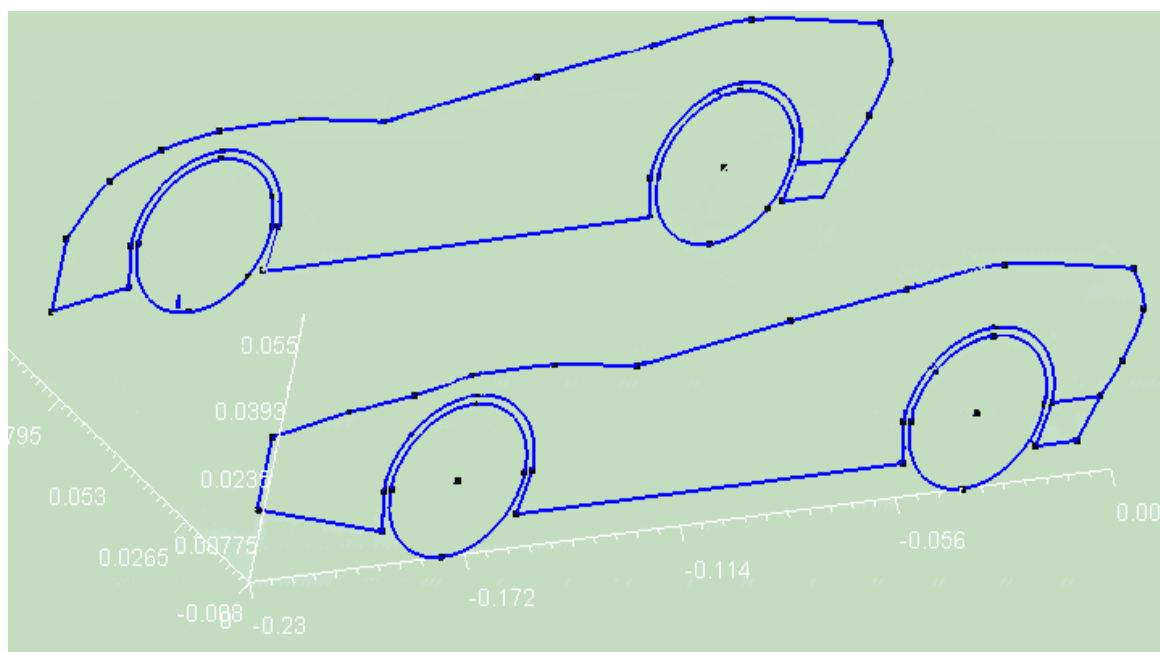


Figura. 4.26. Perfil do carro transladado ao longo do eixo z

O próximo passo para compor a geometria é unir as duas faces, utilizando pontos específicos que delimitam a geometria, como mostrado na figura 4.27. Nesta figura também está transladado o perfil tanto da roda quanto da caixa que a comporta.

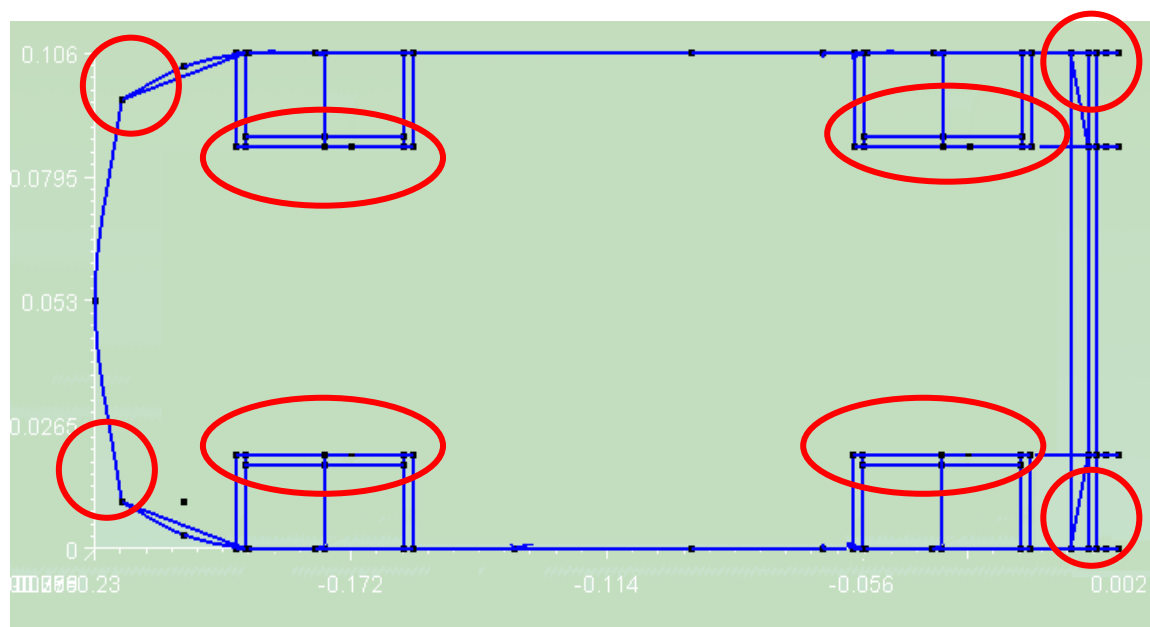


Figura. 4.27. Vista superior do chassi do carro, com a união das faces.

Finalizadas as partes consideradas mais simples na geração da geometria, segue-se para a vista superior do carro, onde se tem maior detalhe em superfícies curvas. Esta parte

requer maior atenção, despendendo de maior tempo na sua produção. A forma como foi produzida, segue o mesmo padrão da lateral do carro. São traçados pontos para delimitar o perfil mostrado na figura 4.28, em relação a altura do modelo original, figura 4.29. Maior cuidado deve ser tomado, pois esses pontos variam tanto em x quanto em z, obtendo como resultado a figura 4.30, em comparação a vista superior da imagem do original, na figura 4.31.

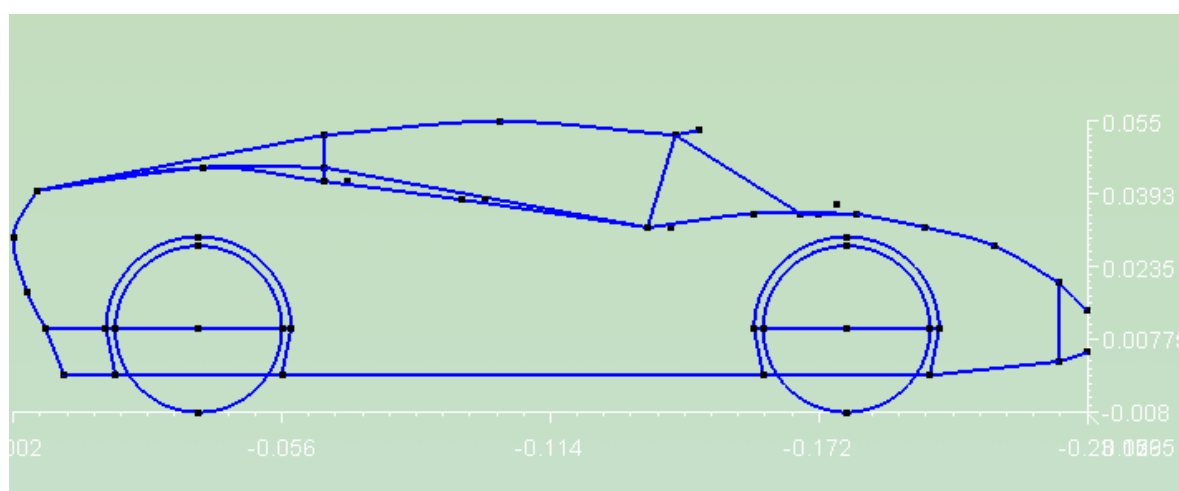


Figura 4.28. Delimitação do perfil da capota do carro.



Figura 4.29. Foto do perfil do modelo.

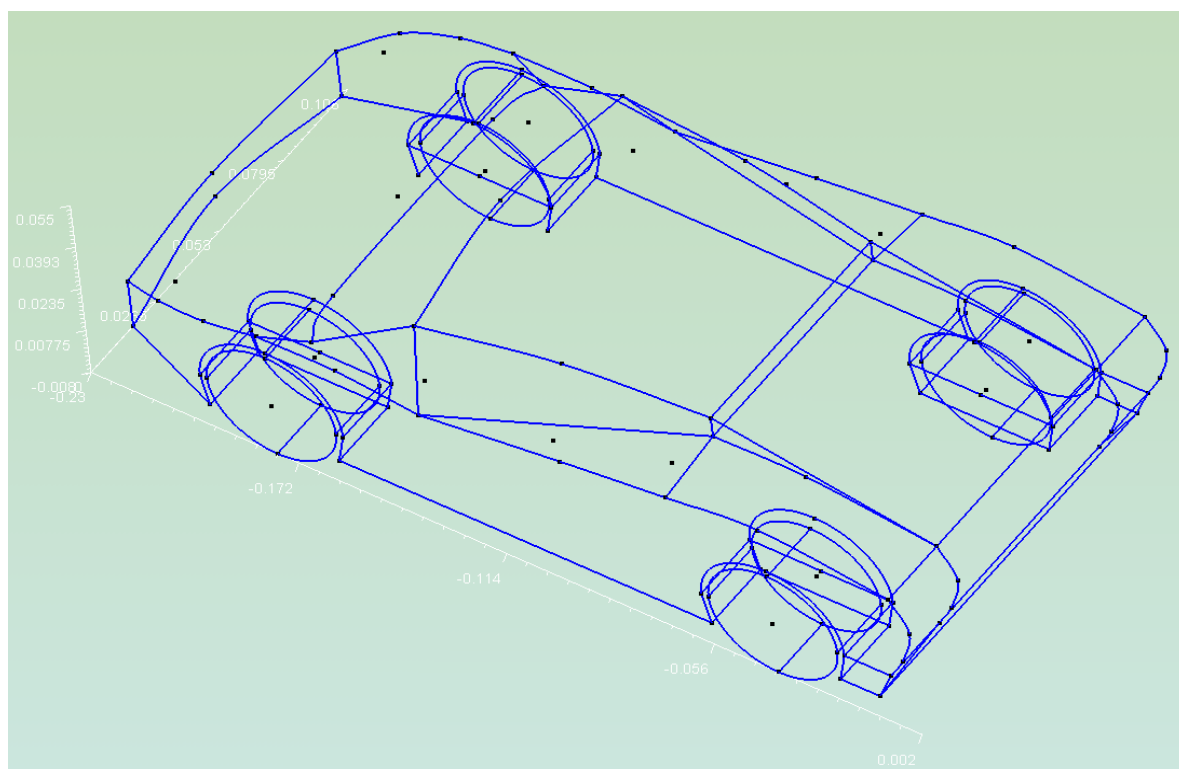


Figura. 4.30. Vista da capota do protótipo após a união de cada perfil da mesma.



Figura 4.31. Foto com detalhes da capota do modelo.

Após ser realizado todo o trabalho de delimitação da geometria, pode-se então, gerar o arquivo de malha, figura 4.32, para posterior geração do arquivo no formato STL mostrada na figura 4.33, que representa a superfície (casca) da geometria e é o formato desejado para a simulação computacional. Na figura de formato STL, pode-se visualizar linhas em azul, que são consideradas como cantos vivos. Estes cantos vivos não influenciam nos resultados de pós-processamento a não ser que a geometria esteja deformada, pois na análise da geometria, a mesma é considerada como um todo, mas caso necessário pode-se refinar a malha ou otimizar a geometria de forma a eliminar os cantos vivos.

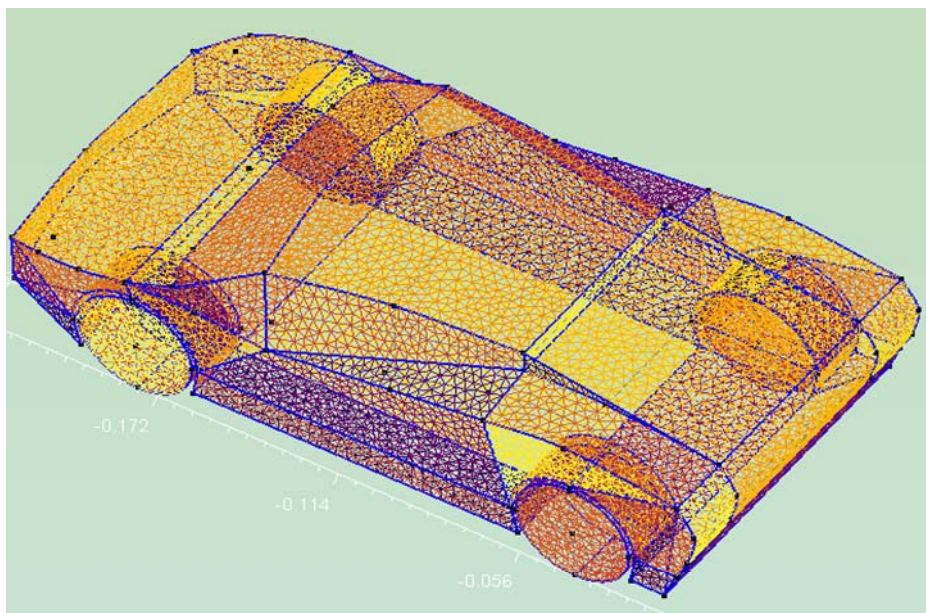


Figura 4.32. Malha do protótipo de automóvel.

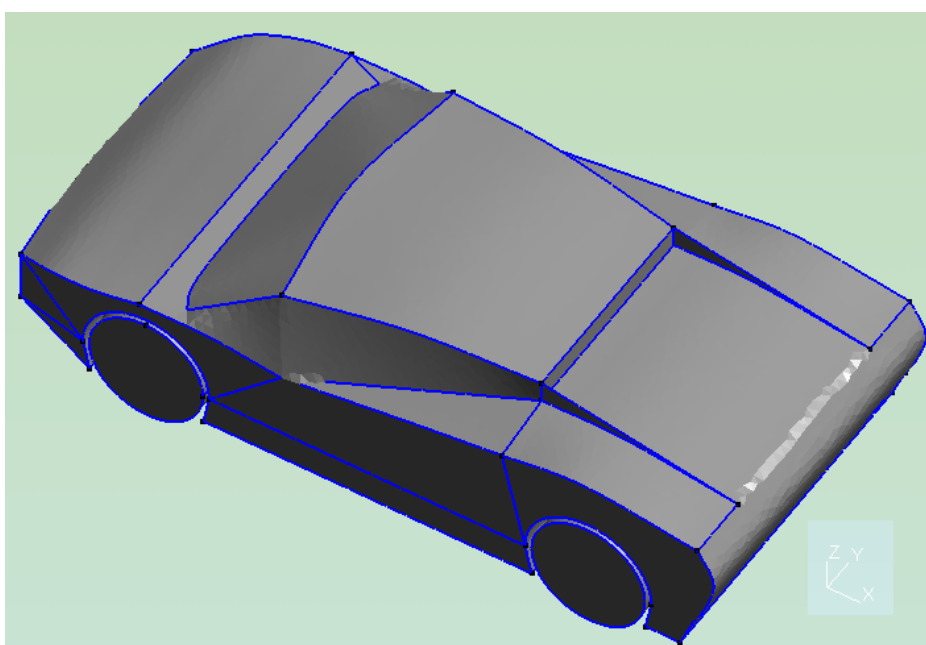


Figura 4.33. Superfície (casca) do protótipo do automóvel, formato STL.

Utilizando a malha importada para o solver do LTCM, por Vedovoto (2007), pode-se visualizar na figura 4.34 (a)-(f), que mostra a evolução de isosuperfícies de $Q = 5$ para o escoamento sobre o protótipo de automóvel. É possível notar estruturas turbilhonares coerentes como os grampos de cabelo a jusante. A montante, estruturas do tipo ferradura de cavalo, são observadas. É importante dizer que essas estruturas apareceram, uma vez que a condição de contorno para $Z = 0$ foi utilizada com velocidade nula. Se a parede estivesse com uma velocidade U_∞ , estas estruturas turbilhonares não seriam notadas.

A figura 4.35 mostra, em três vistas, detalhes das isosuperfícies de $Q = 10$ para $t = 0,6s$. Nota-se claramente os vórtices laterais, a estrutura tipo ferradura de cavalo a montante, e uma grande estrutura tipo grampo de cabelo surgindo a jusante.

