

**Simulação computacional do escoamento em torno de uma bola de
futebol com e sem rotação**

Ricardo Macedo Pontes

Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. José Manuel Laginha Mestre da Palma



FEUP

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho e 2010

Resumo

A aplicação de programas de Mecânica dos Fluidos Computacional como o ANSYS FLUENT, tem-se mostrado de particular utilidade em estudos na área do desporto, como seja o caso deste trabalho em que se estuda o escoamento em torno de uma bola de futebol. O estudo centrou-se na simulação e análise do escoamento no ANSYS FLUENT de várias esferas com diferentes rugosidades, como também a geometria de uma bola típica de futebol com 32 painéis de revestimento com e sem rugosidade.

Nas várias bolas foi aplicada rotação de modo a visualizar o aumento do efeito de Magnus para o aumento do parâmetro de rotação, como também visualizar a separação da camada limite para esta situação.

Na situação com rotação, para qualquer caso, ao aumentar o parâmetro de rotação (Sp), haveria aumento do coeficiente de sustentação (ou Magnus), sendo nos casos em que as esferas tinham rugosidade, mais visíveis esse aumento. A bola de futebol com rugosidade foi a que obteve maiores valores de sustentação. Na resistência aerodinâmica, a bola de futebol com rugosidade também teve a maior contribuição, apesar de nos parâmetros de rotação mais baixos a contribuição maior ter sido da esfera com maior rugosidade.

Na situação sem rotação na bola de futebol, não se verificou muita variação no coeficiente de resistência aerodinâmica com o aumento do número de Reynolds, demonstrando-se a tendência da independência do número de Reynolds no regime turbulento. Devido a limitações do software não foi possível simular a transição do regime laminar para turbulento. Também foram realizadas comparações dos dados obtidos com a literatura.

Abstract

The application of the commercial CFD programs like ANSYS FLUENT have shown particular interest in the analyses of airflow over sports balls and for this matter the behavior of a soccer ball. The main focus of the study was the simulation and analysis of the airflow on several spheres with different roughness and a typical 32 panel soccer ball with and without roughness.

Rotation was applied to the several spheres and soccer ball in order to examine the increase of the Magnus effect with the increase of spin parameter and also visualize the boundary layer separation.

For the studies when rotation was applied the increasing of the spin parameter Sp would increase the lift coefficient most notably on the spheres with higher roughness. But it was on the soccer ball with roughness that the highest values of lift were obtained. For the drag coefficient the soccer ball with roughness had the most contribution, though at a lower rotation the highest contribution was for the sphere with the major value of roughness.

The study of ball without rotation was also applied in order to visualize the influence of drag, only for the turbulent regime, this due to the inability of the software to accurately predict boundary layer transition. In that situation there wasn't much variation of the drag coefficient with the increase of Reynolds number showing that once the turbulent regime is achieved the drag coefficient becomes independent of Reynolds number.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao Prof. José Palma pela orientação prestada ao longo desta tese.

Agradeço ao Dr. Matt Carré da Universidade de Sheffield pelos artigos facultados.

Agradeço ao Jouke de Baar do CFD online pela ajuda prestada na utilização do ANSYS FLUENT.

Agradeço aos colegas Eleutério Caboz, Afonso Rosado, Rui Alves e André Pestana pelos conselhos e ajuda nesta tese.

Índice de conteúdos

1.	Introdução.....	1
1.1.	História.....	1
1.2.	Enquadramento	2
1.3.	Estado da arte.....	3
1.4.	Objectivos	4
1.5.	Organização da tese	5
2.	Conceitos teóricos	6
3.	Modelo computacional.....	9
3.1.	Equações	9
3.2.	Modelos de turbulência	10
3.2.1.	Modelo de turbulência standard $k-\epsilon$	10
3.2.2.	Modelo de turbulência <i>realizable</i> $k-\epsilon$	11
4.	Simulação.....	12
4.1.	Geometria.....	12
4.2.	Malha	13
4.3.	Simulação no ANSYS FLUENT	14
5.	Análise dos resultados.....	16
5.1.	Escolha do modelo utilizado.....	16
5.2.	Influência da rugosidade	18
5.3.	Influência da bola de futebol	25
5.3.1.	Resistência aerodinâmica	26
5.3.2.	Sustentação	29
5.3.3.	Influência do número de Reynolds.....	30
5.3.4.	Influência de ω no coeficiente de sustentação	32
5.4.	Influência de várias rugosidades.....	33

5.5. Coeficiente de resistência aerodinâmica devido ao atrito	35
5.6. Linhas de escoamento da velocidade.....	36
6. Conclusões e recomendação de trabalhos futuros.....	41
Referências.....	43
Anexo A: Critérios de avaliação de qualidade das bolas de futebol da FIFA (retirado de www.fifa.com).....	45
Anexo B: Tabela de resultados para a velocidade da bola de 15 m/s	47
Anexo C: Contornos dos coeficientes de pressão para a velocidade da bola $v=15$ m/s .	48

Índice de figuras

Figura 1 – Figura exemplificativa do Efeito de Magnus (Retirado da Internet).	2
Figura 2 – O efeito da rugosidade superficial no coeficiente de resistência aerodinâmica de esferas na faixa de número de Reynolds em que a camada limite laminar se torna turbulenta (Retirado de Fundamentos da Mecânica dos Fluidos).....	8
Figura 3 – Plano zy na qual a esfera se encontra centrada no cilindro com 220 cm de diâmetro.	12
Figura 4 – Plano xy com comprimento total de 660 cm e a esfera colocada a 220 cm da esquerda e 440 cm da direita.	12
Figura 5 – Malha gerada a partir do ANSYS <i>Workbench – Meshing</i>	13
Figura 6 – Condições fronteira para a entrada, a saída, a bola e as paredes exteriores.	13
Figura 7 – Comparação entre os gráficos do coeficiente de resistência aerodinâmica em função do parâmetro de rotação obtidos do ensaio e do artigo (Mehta, 2008).....	17
Figura 8 – Gráfico do coeficiente de sustentação em função do parâmetro de rotação.	19
Figura 9 – Gráfico do coeficiente de resistência aerodinâmica em função do parâmetro de rotação.	19
Figura 10 - Linhas de passagem da velocidade para a esfera lisa com velocidade de 15 m/s e velocidade angular $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).	21
Figura 11 - Vectores da velocidade para a esfera lisa com velocidade de 15 m/s e velocidade angular $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).	21
Figura 12 - Vectores da velocidade para a esfera rugosa com velocidade de 15 m/s e velocidade angular $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).	22
Figura 13 - Linhas de passagem da velocidade para a esfera rugosa com velocidade de 15 m/s e velocidade angular $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).	22
Figura 14 - Gráfico de C_l/C_d em função do parâmetro de rotação.	23
Figura 15 - Contornos do coeficiente de pressão para a esfera lisa com velocidade $v=15$ m/s e velocidade angular $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).	24
Figura 16 - Contornos do coeficiente de pressão para a esfera com $r = 1 \times 10^{-3}$ m com velocidade $v=15$ m/s e $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).	24
Figura 17 - Relação entre o coeficiente de resistência aerodinâmica e o parâmetro de rotação para a velocidade de 30m/s.....	26
Figura 18 - Relação entre o coeficiente de resistência aerodinâmica e parâmetro de rotação (retirado do Sport Aerodynamics de Mehta).	27
Figura 19 – Contornos do coeficiente de pressão na esfera lisa sem rotação.....	28
Figura 20 – Contornos do coeficiente de pressões da bola de futebol sem rotação.	28
Figura 21 - Relação entre o coeficiente de sustentação e o parâmetro de rotação para a velocidade de 30 m/s.	29
Figura 22 - Relação entre o coeficiente de sustentação e parâmetro de rotação (retirado do Sport Aerodynamics de Mehta).....	29
Figura 23 - Coeficiente de resistência aerodinâmica em função do número de Reynolds.	30
Figura 24 - Coeficiente de resistência aerodinâmica em função do número de Reynolds (retirado de Computers & Fluids de Barber).....	31

Figura 25 - Gráfico do coeficiente de sustentação em função da velocidade.....	32
Figura 26 – Gráfico do coeficiente de sustentação em função do parâmetro de rotação.	33
Figura 27 – Gráfico do coeficiente de sustentação em função do parâmetro de rotação para a velocidade de 15 m/s.	33
Figura 28 - Gráfico do coeficiente de resistência aerodinâmica em função do parâmetro de rotação para a velocidade de 15 m/s.	34
Figura 29 – Contornos do coeficiente de resistência aerodinâmica devido ao atrito para a bola de futebol sem rotação.	35
Figura 30 – Contornos do coeficiente de resistência aerodinâmica devido ao atrito para a bola de futebol com rotação $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).	35
Figura 31 – Linhas de escoamento da velocidade em torno da bola de futebol para a velocidade de 15 m/s e $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).	36
Figura 32 – Contornos da velocidade para a velocidade da bola $v=15$ m/s e sem rotação.	37
Figura 33 - Contornos da velocidade para a velocidade da bola $v=15$ m/s e com $\omega=13,6$ rad/s (130 rpm).	38
Figura 34 - Contornos da velocidade para a velocidade da bola $v=15$ m/s e com $\omega=27,3$ rad/s (261 rpm).	38
Figura 35 - Contornos da velocidade para a velocidade da bola $v=15$ m/s e com $\omega=40,9$ rad/s (391 rpm).	39
Figura 36 - Contornos da velocidade para a velocidade da bola $v=15$ m/s e com $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).	39
Figura 37 - Contornos do coeficiente de pressão para a bola de futebol sem rotação com a velocidade da bola $v=15$ m/s.	48
Figura 38 - Contornos do coeficiente de pressão para a bola de futebol com rotação $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm) e velocidade da bola $v=15$ m/s.	48

Índice de tabelas

Tabela 1 – Velocidades angulares impostas à bola calculadas para cada velocidade de escoamento em função do parâmetro de rotação.....	15
Tabela 2 – Comparação entre os modelos standard k- ϵ e <i>realizable</i> k- ϵ para a velocidade de 30 m/s.	17
Tabela 3 – Valores dos coeficientes e as forças de sustentação e resistência aerodinâmica para uma esfera lisa e a esfera com $\epsilon = 1 \times 10^{-3}$ m.....	19
Tabela 4 – Resultados obtidos dos ensaios na bola de futebol.....	26
Tabela 5 – Resultados da Esfera com $\epsilon = 3,3 \times 10^{-4}$ m e da bola de futebol sem rugosidade.....	47

Nomenclatura

ρ	Massa volúmica ou densidade do ar
u_i	Componentes da velocidade de escoamento
μ	Viscosidade dinâmica
p	Pressão
k	Energia cinética de turbulência
μ_t	Viscosidade de turbulência
G_k	Geração de k
ϵ	Taxa de dissipação de k
$\overline{u'_i u'_j}$	Média temporal de velocidades flutuantes
σ_ϵ	Número de Prandtl turbulento para ϵ
σ_k	Número de Prandtl turbulento para k
S	Módulo do tensor da taxa de deformação média
ν	Viscosidade cinemática
S_{ij}	Tensor da taxa de deformação
ϵ_{ijk}	Tensor Levi-Civita
F_L	Força de sustentação (ou Magnus)
F_D	Força de resistência aerodinâmica
F_x	Componente da força em x
F_y	Componente da força em y
dA	Elemento de área infinitesimal
θ	Ângulo entre a força de pressão e a orientação do escoamento
τ_p	Tensão de corte na superfície
Cl	Coefficiente de sustentação (ou Magnus)

C_d	Coeficiente de resistência aerodinâmica
U	Velocidade do escoamento
D	Diâmetro da esfera
Re	Número de Reynolds
A	Área transversal da esfera
C_p	Coeficiente de pressão
p_0	Pressão de referência ou ambiente
p	Pressão na superfície
Sp	Parâmetro de rotação
ω	Velocidade angular
r	Raio da esfera
m	Massa da bola
g	Aceleração gravítica
a	Aceleração da bola
ε	Rugosidade absoluta

1.Introdução

1.1. História

O futebol é um desporto que tem despertado um grande interesse global desde há muitas gerações. As primeiras indicações deste desporto datam de 200 anos A.C. na China, onde a história relata o jogo que na altura seria chamado „Tsu Chu“, e o material da bola seria feito com a bexiga de um animal recheada com pêlo ou penas e as balizas feitas com estacas. Existem outros relatos na qual indicavam que os gregos e romanos teriam utilizado as suas arenas de combate para a prática deste desporto, mas foi na Inglaterra que a veia competitiva do futebol foi introduzida ao se realizarem os primeiros jogos entre aldeias na época medieval. E a partir dessa época, a evolução foi gradual com a introdução de regras e outras componentes que fazem do futebol o desporto que é hoje em dia. A bola de futebol também sofreu evoluções ao longo do tempo, sendo que a primeira bola de borracha vulcanizada foi patenteada em 1836 por Charles Goodyear (Goodyear, 1836), sofrendo várias modificações até chegar à bola recentemente desenvolvida para o mundial 2010, chamada Jabulani e feita com uma câmara de látex e com 8 painéis de revestimento feito de poliuretano, em vez dos habituais 32 (12 pentagonais e 20 hexagonais). As bolas actualmente obedecem a critérios de qualidade da FIFA que se encontram nos anexos.

O interesse na trajectória da bola após um remate também foi motivo de interesse, sendo que os vários pontos donde era rematada provocavam trajectórias e efeitos diferentes para o qual não havia entendimento. O primeiro comentário a esse efeito foi publicado por Isaac Newton em 1672 numa bola de ténis (Newton, 1672), na qual Newton verificou que o efeito da rotação que a bola obtinha provocava o desvio da trajectória da mesma. Outros estudos seguiram mas é de salientar os mais importantes nesta matéria como sendo o estudo do engenheiro Benjamin Robbins que em 1742 verificou experimentalmente através do tiro de uma arma, que a dispersão dos projecteis na trajectória seria devido à ocorrência de rotação após o disparo. Apesar da veracidade deste estudo, existiram muitas dúvidas sobre o mesmo,

tendo mesmo o matemático muito conceituado da época Leonhard Euler (que apesar de ter publicado artigos de Robbins), posto de parte esse estudo devido à incompatibilidade que provocava com as teorias de fluidos que ele idealizava, tendo sido o estudo de Robbins suprimido (Lorenz, 2006). Em 1852 o químico/físico alemão, Heinrich Gustav Magnus efectuou um novo estudo em projecteis (Barkla et al, 1971), na qual verificou que a rotação gerava pressões mais baixas numa extremidade e maiores na outra o que provocava o desvio da trajectória e pela qual ficou finalmente comprovado a existência da sustentação gerada através de rotação. O efeito de Magnus foi popularizado através do famoso físico e Prémio Nobel da Física em 1904 Lord Rayleigh, que atribuiu o nome Magnus ao efeito de rotação que ocorria numa bola de ténis num estudo que realizou em 1878 (Rayleigh, 1878).

1.2. Enquadramento

Na maioria dos desportos, a aerodinâmica tem um papel predominante na definição da trajectória da bola. É particularmente fascinante que nem todos os parâmetros que afectam a trajectória estão sob a influência humana, isto pelo facto de que a bola pode muitas vezes se desviar de uma trajectória inicial prevista, resultando numa trajectória curvilínea e por vezes imprevisível, esse efeito é bem reconhecido em desportos como o cricket, ténis, golfe, futebol, voleibol e baseball, tendo como factores de influência o próprio material da bola, bem como velocidades de lançamento. A rotação também tem influência na trajectória, sendo este factor o mais importante na medida em que provoca maior desvio devido à sustentação, essa rotação é provocada quando é dado um remate na bola fora do centro, em que quanto mais afastado o remate do centro da bola mais rotação é imposta à bola, sendo para o caso em particular desta tese a rotação imposta provocaria um remate do tipo “chapéu” dado na parte inferior da bola. Ao induzir rotação no fluido em torno da esfera gera-se sustentação (ou força de Magnus) na qual a pressão média é maior na parte inferior da esfera e na parte superior a pressão média é menor. Este efeito é conhecido por efeito de Magnus, em homenagem ao químico e físico Heinrich Magnus.

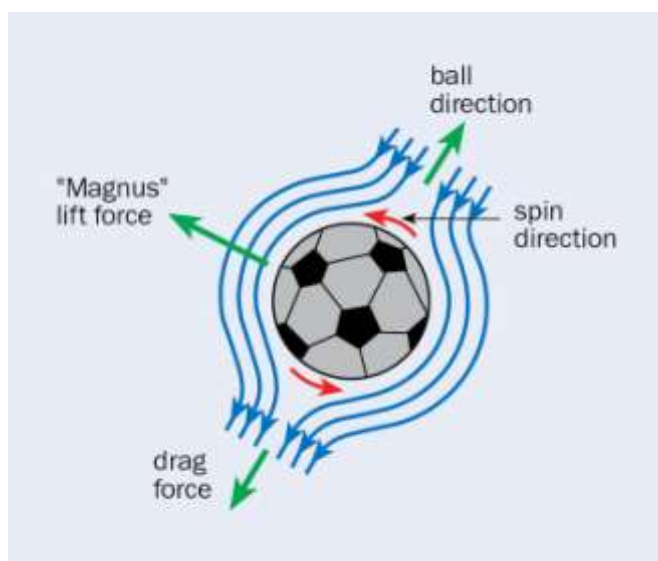


Figura 1 – Figura exemplificativa do Efeito de Magnus (Retirado da Internet).

Além do efeito de Magnus é necessário ter em consideração uma série de fenômenos fundamentais da mecânica de fluidos, incluindo o escoamento na camada limite, a transição e separação, o escoamento sobre superfícies rugosas e o comportamento na esteira. Através desses mesmos estudos conseguimos obter uma melhor compreensão da aerodinâmica em torno das bolas, particularmente o comportamento e separação da camada limite, podendo estes estudos desempenhar uma grande ajuda aos engenheiros e satisfazer os designers de equipamento, aos jogadores, treinadores e árbitros de jogo, como também tornar o jogo mais interessante para os fãs.

A Mecânica dos Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics) tem como função a utilização de métodos numéricos e algoritmos que são implementados em meios informáticos e na qual será obtido soluções de diversas situações que envolvem a transferência de calor e escoamento de fluidos. O CFD tem se mostrado uma ferramenta fundamental na obtenção de resultados e aproximações na previsão dos fenômenos de escoamento apresentando também boas comparações aos resultados experimentais (por exemplo túnel de vento), na qual se verifica um grande interesse na influência da camada limite na sua separação onde ocorre o refluxo e a formação da esteira. O cálculo computacional da circulação de ar em torno de uma esfera lisa e a bola de futebol só por si já é um desafio.

1.3. Estado da arte

Existem alguns artigos publicados nesta área pelo qual serão mencionados nesta secção e que foram tidos como referências em termos comparativos deste mesmo trabalho. Num desses artigos de Carré et al., (2005) foi efectuado um estudo num túnel de vento de uma bola de futebol, na qual verificaram que ao aumentar a velocidade, o coeficiente de resistência aerodinâmica diminuiu de um valor de 0,5 para 0,2 o que sugeriu a existência da transição do comportamento da camada limite de laminar para turbulenta. O efeito de Magnus também foi observado e viram que seria possível o efeito para números baixos de Reynolds. Na medição da rotação de esferas lisas visualizaram para um número maior de Reynolds, os coeficientes de resistência aerodinâmica continuavam elevados evidenciando que estavam no regime laminar e os efeitos de Magnus foram inconsistentes, mas demonstravam o seu aumento para aumento de Reynolds e parâmetro de rotação. As simulações das trajetórias de pontapés livres demonstraram que a bola ao ser chutada no centro teria uma trajetória quase directa, ao passo que a bola sendo chutada fora do centro teria mais efeito e um tempo significativamente maior na trajetória. A simulação foi repetida na esfera lisa e mostrou que a esfera também tinha um tempo maior na trajetória devido à resistência aerodinâmica elevada. A presença das costuras nos painéis de revestimento mostrou que a transição ocorria mais cedo, resultando numa resistência aerodinâmica menor e valores de Magnus mais previsíveis quando comparados com a esfera lisa.

No artigo de Barber et al., (2009) foi feito um estudo do movimento irregular de várias bolas da FIFA, que foram digitalizadas através de um scanner 3D a laser e introduzidas no FLUENT para análise. Este estudo foi feito para o caso de quando é aplicada pouca rotação e maior velocidade à bola, na qual se observou pouca variação do coeficiente de resistência aerodinâmica entre as bolas e maior variação no coeficiente de sustentação na variação da orientação da bola em relação à trajectória, significando que mesmo com pouca rotação existia uma sustentação quase estacionária o que provoca esse movimento irregular. Neste estudo ficou demonstrado que os detalhes da superfície geométrica (incluindo o tamanho da costura, padrão) e orientação da bola influenciavam esse movimento irregular.

Goff et al. (2009) a partir da digitalização da imagem da trajectória, obtida através de duas câmaras, determinaram os coeficientes de resistência e de sustentação, para várias velocidades e rotação da bola. No caso de movimento da bola num plano, as componentes de aceleração em coordenadas cartesianas (x, z) são:

$$a_x = -\frac{\rho A}{2m} v(C_D v_x + C_L v_z)$$

e

$$a_z = \frac{\rho A}{2m} v(-C_D v_z + C_L v_x) - g$$

1.4. Objectivos

Esta dissertação tem como objectivo a simulação do escoamento em torno de uma esfera lisa e uma bola de futebol com e sem rotação, na qual serão modelados e gerado a malha no ANSYS *Workbench*, sendo simulação feita recorrendo ao programa ANSYS FLUENT. Serão também feitas simulações com e sem rugosidade tanto na esfera como na bola de futebol. Os resultados dos coeficientes de sustentação e resistência aerodinâmica de cada ensaio serão comparados entre si, de modo a visualizar o melhor caso na geração de sustentação como também a influência da rotação e rugosidade, sendo os resultados da bola de futebol também comparados com a literatura existente, as forças de sustentação e resistência aerodinâmica serão igualmente calculadas para cada caso.

1.5. Organização da tese

A presente tese está organizada em 6 capítulos, sendo este primeiro capítulo referente à história do futebol e da bola, ao enquadramento da tese, estado da arte e os objectivos da mesma.

No capítulo 2 são descritos alguns conceitos teóricos, como a sustentação, a resistência aerodinâmica, parâmetro de rotação, número de Reynolds, sendo necessários para a compreensão da presente tese.

No capítulo 3 é descrita o modelo matemático implementado no software ANSYS FLUENT, no qual se incluem as equações da continuidade e quantidade de movimento, bem como os modelos de turbulência utilizados.

No capítulo 4 são descritos os passos aplicados desde a modelação até à simulação, como a geometria, a malha gerada e a simulação no ANSYS FLUENT.

No capítulo 5 são apresentados os resultados das várias simulações, bem como os comentários e discussão desses resultados.

No capítulo 6 são expostas as conclusões do decorrente trabalho como também as sugestões para futuros trabalhos.

2. Conceitos teóricos

Quando um corpo se move através de um fluido, há uma interacção entre o corpo e o fluido, que pode ser descrita por forças que actuam na interface fluido-corpo. Essas forças podem ser descritas em função da tensão de corte na parede, τ_p , provocada pelos efeitos viscosos e da tensão normal devida à pressão, p . A componente da força resultante que actua na direcção do escoamento é denominada força de resistência aerodinâmica e a força resultante que actua na direcção normal ao escoamento é denominada sustentação.

Se forem conhecidas a distribuição de pressões e das tensões de corte ao longo do corpo, a sustentação e a resistência aerodinâmica podem ser obtidas pelas equações seguintes

Sustentação

$$F_L = \int dF_y = \int p \sin\theta \, dA + \int \tau_p \cos\theta \, dA \quad (2.1)$$

Resistência aerodinâmica

$$F_D = \int dF_x = \int p \cos\theta \, dA + \int \tau_p \sin\theta \, dA \quad (2.2)$$

No entanto, é difícil a utilização destas equações devido à necessidade de conhecer a distribuição da pressão e tensão de corte ao longo da superfície do corpo, sendo estas equações utilizadas para casos mais simples (ex. placa plana). Uma alternativa à utilização das equações (2.1) e (2.2), é a obtenção de coeficientes adimensionais de resistência aerodinâmica e sustentação (através de modelos computacionais) e determinar os valores aproximados de resistência aerodinâmica e sustentação.

No caso da resistência aerodinâmica, para uma velocidade do escoamento (U), pode-se definir através da expressão:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (2.3)$$

A resistência aerodinâmica devido ao atrito é provocada pela tensão de corte do fluido sobre o corpo, que para baixos números de Reynolds, os efeitos viscosos têm maior contribuição, sendo que para valores maiores do número de Reynolds terá menor influência, devido ao domínio das forças de pressão. A resistência aerodinâmica devido à pressão é provocada directamente pela distribuição de pressões sobre o corpo e é dependente da forma do corpo, exprimindo-se através do coeficiente de pressões C_p , onde $C_p = (p - p_0)/(\rho \times U^2/2)$.

Para o caso de existir simetria no corpo, como por exemplo uma esfera, o escoamento será simétrico e a força provocada pelo fluido será devida apenas à resistência aerodinâmica, mas se a esfera estiver em rotação, induz rotação no fluido gerando-se sustentação em que a pressão média é maior na parte inferior da esfera e na parte superior a pressão média é menor. Este efeito é conhecido por efeito de Magnus, em homenagem ao químico e físico Heinrich Magnus.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (2.4)$$

Um parâmetro adimensional importante na geração do efeito de Magnus, é o parâmetro de rotação, que relaciona a velocidade tangencial de uma esfera em rotação com a velocidade da bola, sendo a expressão definida como:

$$Sp = \frac{r\omega}{v} \quad (2.5)$$

O número de Reynolds também desempenha um papel importante no escoamento em torno da bola de futebol, devido à transição do regime laminar para turbulento, provocando uma redução abrupta da resistência ao ar da bola. Na tentativa de atenuar essa transição, a rugosidade desempenha um papel importante, porque provoca a ocorrência da transição para uma gama de velocidades mais baixas. Como se pode ver na Figura 2 e tomando como exemplo a bola de golfe, verifica-se que a transição ocorre para um valor mais baixo do número de Reynolds devido à maior rugosidade superficial da bola de golfe, sendo que a influência desta rugosidade se deve aos pequenos alvéolos na superfície. Um dos objectivos na bola de futebol também é atenuar a ocorrência da transição para um número de Reynolds que não afecte o jogo de futebol e com isso manter na gama de velocidades da bola num jogo de futebol, um valor de resistência aerodinâmica menor.

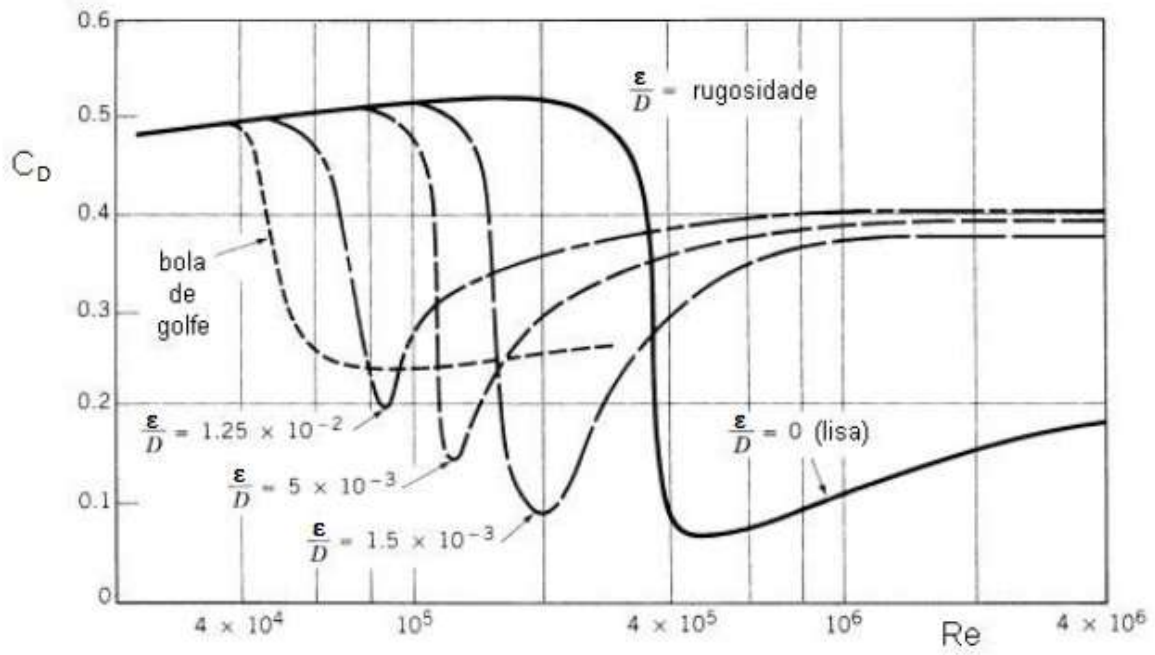


Figura 2 – O efeito da rugosidade superficial no coeficiente de resistência aerodinâmica de esferas na faixa de número de Reynolds em que a camada limite laminar se torna turbulenta (Retirado de Fundamentos da Mecânica dos Fluidos).

3. Modelo computacional

Neste capítulo são apresentados de forma resumida os modelos e equações que o ANSYS FLUENT utiliza na obtenção das soluções, pelo que foi dispensado o uso de referências bibliográficas.

3.1. Equações

As equações de Navier-Stokes são equações diferenciais que descrevem a conservação da massa e a quantidade de movimento ao longo de um escoamento, cuja resolução numérica constitui aquilo que se designa por Mecânica dos Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics). As equações podem ser escritas na seguinte notação indicial.

Equação da continuidade (ou conservação da massa), no caso particular em que o fluido é incompressível, a densidade é constante durante o escoamento, sendo a equação:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3.2)$$

3.2. Modelos de turbulência

Neste trabalho foram utilizados dois modelos de turbulência descritos nas subsecções seguintes.

3.2.1. Modelo de turbulência standard k-ε

Este modelo padrão é um modelo semi-empírico como todos os modelos de turbulência baseado em duas equações de transporte: uma da energia cinética de turbulência (k) e outra da taxa de dissipação (ε). No cálculo do modelo standard k-ε é pressuposto que o escoamento ocorre a elevado número de Reynolds turbulento. Essas equações são obtidas a partir das seguintes equações de transporte:

Energia cinética de turbulência (k):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3.3)$$

Taxa de dissipação da energia cinética de turbulência (ε):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.4)$$

Nestas equações, G_k representa a geração de energia cinética de turbulência (k) devido ao gradiente da velocidade média sendo este termo obtido através da equação:

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (3.5)$$

A viscosidade turbulência, μ_t , é calculada através da equação:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.6)$$

As constantes $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, C_μ , σ_k , e σ_ϵ têm os seguintes valores padrão que foram determinadas a partir de valores experimentais e escoamentos simples:

$$C_{1\epsilon} = 1,44; C_{2\epsilon} = 1,92; C_\mu = 0,09; \sigma_k = 1,0; \sigma_\epsilon = 1,3$$

3.2.2. Modelo de turbulência *realizable* k- ϵ

Este modelo é mais recente e tem como principais diferenças do modelo standard k- ϵ , a equação de transporte da taxa de dissipação (ϵ) e a formulação da viscosidade de turbulência (μ_t). Quanto à equação de transporte da energia cinética de turbulência (k) é utilizada a mesma do modelo standard k- ϵ (3.3).

A equação de transporte da taxa de dissipação (ϵ) fica definida como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (3.7)$$

Onde

$$C_1 = \max \left[0,43; \frac{\eta}{\eta + 5} \right]; \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}; \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

E as constantes $C_{1\epsilon} = 1,44$; $C_2 = 1,9$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,2$

A expressão da viscosidade de turbulência, μ_t , é calculada pela mesma equação (3.6), sendo a obtenção do coeficiente C_μ diferente e calculado pela expressão:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{k U^*}{\epsilon}} \quad (3.8)$$

Onde

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{ij} \tilde{ij}} \quad (3.9)$$

E

$$\tilde{ij} = \overline{ij} - \epsilon_{ijk} \omega_k \quad (3.10)$$

Em que \overline{ij} corresponde à taxa média de rotação do tensor visualizado em referencial de rotação com velocidade angular ω_k e o tensor Levi-Civita ϵ_{ijk} corresponde à transformação de coordenadas, preservando a orientação do espaço. As constantes A_0 e A_S são correspondentes a $A_0 = 4,04$ e $A_S = \sqrt{6} \cos \theta$.

4. Simulação

Para efeitos de geometria, geração de malha e simulação foi utilizado o programa ANSYS.

4.1. Geometria

Para a modelação da geometria foi utilizado o ANSYS *Workbench* nomeadamente a aplicação *DesignModeler*, na qual foi definida a geometria de uma esfera lisa com 22 cm de diâmetro designada como sólido, sendo esta esfera isolada dentro de um cilindro designado como fluido e removida de modo a obter um corpo oco. Este passo foi necessário de modo a não malhar o interior da esfera. O cilindro tem como medidas 220 cm de diâmetro e comprimento 660 cm como indicam as figuras seguintes.



Figura 3 – Plano zy na qual a esfera se encontra centrada no cilindro com 220 cm de diâmetro.

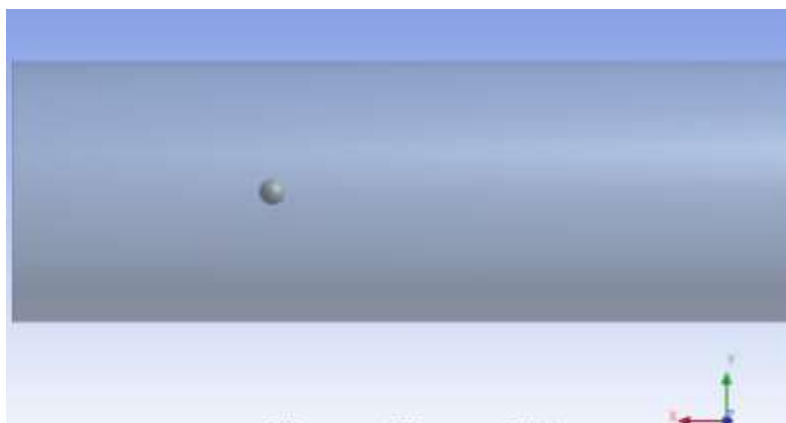


Figura 4 – Plano xy com comprimento total de 660 cm e a esfera colocada a 220 cm da esquerda e 440 cm da direita.

4.2. Malha

Após a conclusão da geometria foi executado também dentro do ANSYS *Workbench* a aplicação *Meshing* de modo a gerar uma malha para o fluido em torno da esfera. Esta foi uma malha tetraédrica configurada a partir do método automático *Patch Conforming/sweeping* e com refinamento de nível dois, de que resultou uma malha com 34074 nós e 181085 elementos, representada na Figura 5.

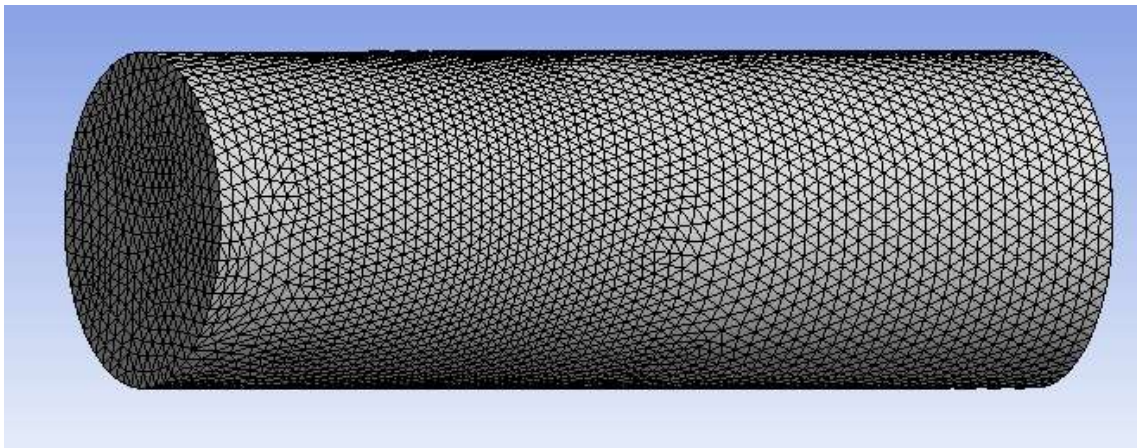


Figura 5 – Malha gerada a partir do ANSYS *Workbench* – *Meshing*.

Neste aplicativo foram também definidas as condições fronteira na entrada do domínio de integração, na saída, na fronteira do domínio e na bola, como se vê na Figura 6.

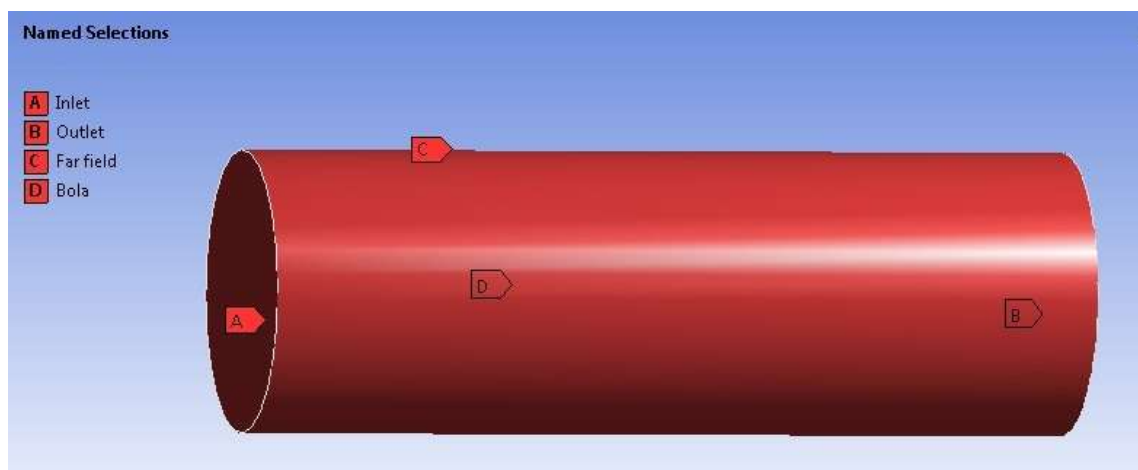


Figura 6 – Condições fronteira para a entrada, a saída, a bola e as paredes exteriores.

4.3. Simulação no ANSYS FLUENT

No passo seguinte foi executado a aplicação ANSYS FLUENT.

Iniciando-se o ANSYS FLUENT, foi importada a malha gerada anteriormente e feita a verificação da mesma na qual se conseguiu obter dados da qualidade da malha, sendo os valores retirados os seguintes:

Maximum cell skewness = 0,890735

Maximum aspect ratio = 17,7943

Estes valores estão dentro dos valores admitidos pelo programa que define o valor máximo do *cell skewness* igual a 0,95 e o *aspect ratio* o valor máximo de 30.

Após a verificação da malha foi escolhido o modelo de turbulência a utilizar. Para a simulação foram utilizados dois modelos, o modelo standard $k-\epsilon$ e o modelo *realizable* $k-\epsilon$. Nas condições iniciais os valores considerados para a massa volúmica foi $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade dinâmica $\mu=1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$. Para cada condição fronteira foram definidos vários parâmetros de funcionamento. O *outlet* (saída) foi especificado como *outflow*, a bola foi definida como *no-slip wall* (parede sem escorregamento) e as velocidades angulares impostas no sentido horário em torno do eixo zz , o *far field* (parede do domínio) foi definido como *slip-wall* (parede com escorregamento) com tensão de corte igual a zero e no *inlet* foram definidas as velocidades do escoamento para cada ensaio no eixo xx .

No *Reference Values* foi definido o valor de área frontal $A=0,038 \text{ m}^2$ e para cada ensaio uma velocidade diferente, no *Compute From e Reference Zone* foi definido a bola e o fluido respectivamente. No *Solution Methods* foi escolhido o algoritmo SIMPLE para estados estacionários e *Second Order Upwind* para a discretização espacial de segunda ordem. No *Monitors* definiu-se o sentido da resistência aerodinâmica e da sustentação tendo em conta a direcção da velocidade e o eixo de rotação da bola de modo a obter os coeficientes correctamente. Também no *Monitors* na secção dos resíduos foi definido o valor de critério absoluto de 0,001.

As velocidades de escoamento definidas na entrada bem como as velocidades angulares impostas à bola estão representados na Tabela 1:

Tabela 1 – Velocidades angulares impostas à bola calculadas para cada velocidade de escoamento em função do parâmetro de rotação.

	v (m/s)		
	10	15	30
Sp	ω (rad/s)		
0	0	0	0
0,1	9,1	13,6	27,3
0,2	18,2	27,3	54,5
0,3	27,3	40,9	81,8
0,4	36,4	54,5	109,1

As velocidades angulares foram calculadas através da expressão (2.5), com o raio da bola $r=0,11$ m e utilizando os valores dos parâmetros de rotação definidos na Tabela 1. A consideração desses parâmetros de rotação poderá não corresponder à realidade, visto que ao chutar uma bola em diferentes pontos fazem com que ela adquira diferentes velocidades e rotações, havendo uma dependência do local do remate, mas sendo o parâmetro de rotação importante na geração de sustentação, para o ensaio das três velocidades, será visto a influência nesses pontos escolhidos.

Os resultados do ensaio para a esfera lisa serão apresentados no Capítulo 5, sendo que os passos desde capítulo referem-se à simulação na esfera lisa. De modo a simular a esfera com rugosidade, os passos descritos neste capítulo desde 4.1. foram repetidos mas com uma rugosidade relativa imposta à esfera de $\varepsilon/D = 5 \times 10^{-3}$ ($\varepsilon = 1 \times 10^{-3}$ m). Os restantes parâmetros mantiveram-se iguais. Os resultados serão igualmente apresentados no seguinte capítulo.

5. Análise dos resultados

Neste capítulo será apresentado o conjunto de resultados obtidos da simulação bem como a análise e a comparação com outros resultados de simulações disponíveis na literatura.

5.1. Escolha do modelo utilizado

Os resultados obtidos da simulação para a velocidade de 30 m/s (108 km/h) do modelo standard k- ϵ e do modelo *realizable* k- ϵ para a esfera com $\epsilon = 1 \times 10^{-3}$ m, estão na Tabela 2 e foram comparados com dados de ensaios efectuados e publicados nos artigos científicos, em que os valores do modelo *realizable* k- ϵ foram os mais aproximados com os artigos como se verá mais adiante.

A força de resistência aerodinâmica foi calculada, tendo em conta os valores de coeficientes de resistência aerodinâmica Cd, obtidos da Tabela 2 e utilizando a seguinte expressão:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2$$

A força de sustentação (ou Magnus) foi obtida de maneira semelhante à força de resistência aerodinâmica alterando só o coeficiente de resistência aerodinâmica Cd para o coeficiente de sustentação (ou Magnus) Cl.

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A v^2$$

Tabela 2 – Comparação entre os modelos standard k- ϵ e *realizable* k- ϵ para a velocidade de 30 m/s.

	Standard k- ϵ (esfera com $\epsilon = 1 \times 10^{-3}$ m)				<i>Realizable</i> k- ϵ (esfera com $\epsilon = 1 \times 10^{-3}$ m)			
Sp	C _L	C _D	F _L (N)	F _D (N)	C _L	C _D	F _L (N)	F _D (N)
0	0	0,444	0	9,309	0	0,162	0	3,403
0,1	0,061	0,450	1,280	9,435	0,026	0,161	0,551	3,377
0,2	0,112	0,467	2,356	9,778	0,096	0,174	2,006	3,642
0,3	0,154	0,488	3,219	10,221	0,151	0,199	3,162	4,168
0,4	0,189	0,511	3,951	10,705	0,191	0,227	4,001	4,765

Na escolha do melhor modelo a adaptar nos ensaios foram tidas em conta várias considerações. Através da leitura do artigo do Mehta (Mehta, 2008) foi retida a ideia que o modelo mais adequado e com melhores resultados para o ensaio em causa seria o modelo *realizable* k- ϵ . No guia de leitura do ANSYS FLUENT recomenda-se este modelo a escoamentos que envolvem rotação, o que também corresponde ao que se passa nesta simulação.

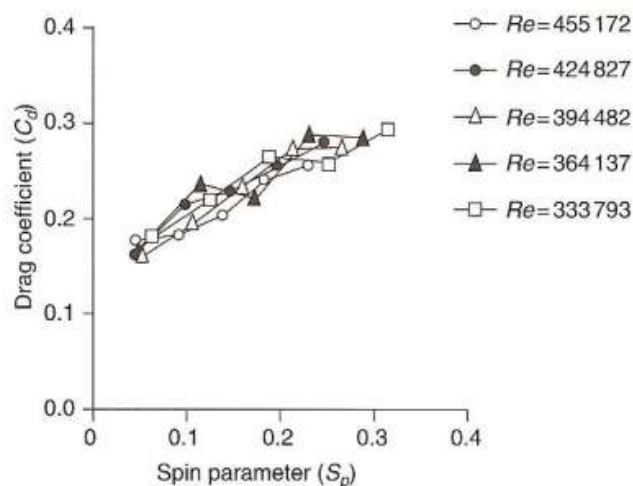
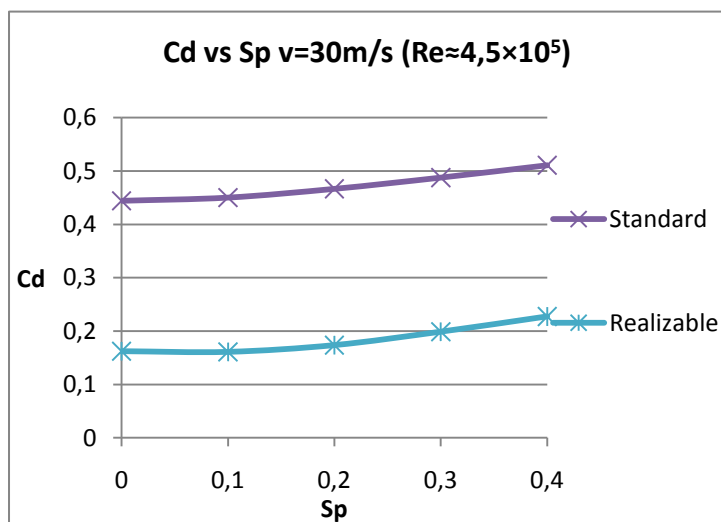


Figura 7 – Comparação entre os gráficos do coeficiente de resistência aerodinâmica em função do parâmetro de rotação obtidos do ensaio e do artigo (Mehta, 2008).

A utilização deste modelo como a melhor escolha, comprova-se através da comparação dos resultados obtidos do coeficiente de resistência aerodinâmica da simulação dos dois modelos com os resultados do artigo. Através da comparação entre coeficientes de resistência aerodinâmica da Figura 7, verifica-se no gráfico do artigo e no gráfico do modelo *realizable* $k-\epsilon$, que o intervalo de valores de C_d variou entre 0,15 e 0,25 em ambos os gráficos, e tomando como exemplo um valor de $Sp=0,1$, o valor de C_d de ambos os gráficos foram aproximadamente $C_d \approx 0,18$. Em relação ao gráfico do modelo standard $k-\epsilon$, os valores de C_d foram superiores a 0,4, não se encontrando muita semelhança com gráfico do artigo e concluindo que o modelo *realizable* $k-\epsilon$ foi a melhor escolha.

5.2. Influência da rugosidade

Neste ensaio foram obtidos resultados para a velocidade de 15 m/s (54 km/h), sendo esta uma velocidade média de uma bola num jogo de futebol. Para essa velocidade foi calculado o número de Reynolds, sendo o diâmetro da bola 0,22 m, a massa volúmica $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ e a viscosidade dinâmica $\mu=1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$, que corresponde ao número de Reynolds igual a $Re = 2,3 \times 10^5$.

Para a mesma velocidade de 15 m/s, foram considerando diferentes parâmetros de rotação (Sp) e calculadas as respectivas velocidades angulares ω correspondentes a cada Sp através da expressão (2.5), os valores de ω estão apresentados na Tabela 1, tendo-se obtido:

$$\omega = 13,6 \text{ rad/s (130 rpm), para } Sp=0,1$$

$$\omega = 27,3 \text{ rad/s (261 rpm), para } Sp=0,2$$

$$\omega = 40,9 \text{ rad/s (391 rpm), para } Sp=0,3$$

$$\omega = 54,5 \text{ rad/s (520 rpm), para } Sp=0,4$$

Os resultados apresentados seguidamente serão os do modelo *realizable* $k-\epsilon$. Para este modelo foram ensaiados uma esfera lisa e uma esfera com rugosidade relativa $\epsilon/D = 5 \times 10^{-3}$ (rugosidade absoluta $\epsilon = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$), os valores de resistência aerodinâmica e sustentação para cada parâmetro bem como as respectivas forças são apresentados na tabela seguinte e referentes à velocidade de 15 m/s:

Tabela 3 – Valores dos coeficientes e as forças de sustentação e resistência aerodinâmica para uma esfera lisa e a esfera com $\epsilon = 1 \times 10^{-3}$ m.

Sp	Realizable k- ϵ (esfera lisa)					Realizable k- ϵ (esfera com $\epsilon = 1 \times 10^{-3}$ m)				
	C _L	C _D	F _L (N)	F _D (N)	C _L /C _D	C _L	C _D	F _L (N)	F _D (N)	C _L /C _D
0	0	0,103	0	0,558	0	0	0,163	0	0,885	0
0,1	0,008	0,103	0,043	0,559	0,077	0,029	0,162	0,158	0,877	0,180
0,2	0,021	0,104	0,116	0,566	0,206	0,095	0,174	0,516	0,944	0,547
0,3	0,037	0,105	0,201	0,572	0,351	0,152	0,199	0,823	1,083	0,760
0,4	0,054	0,110	0,291	0,596	0,488	0,191	0,227	1,036	1,233	0,840

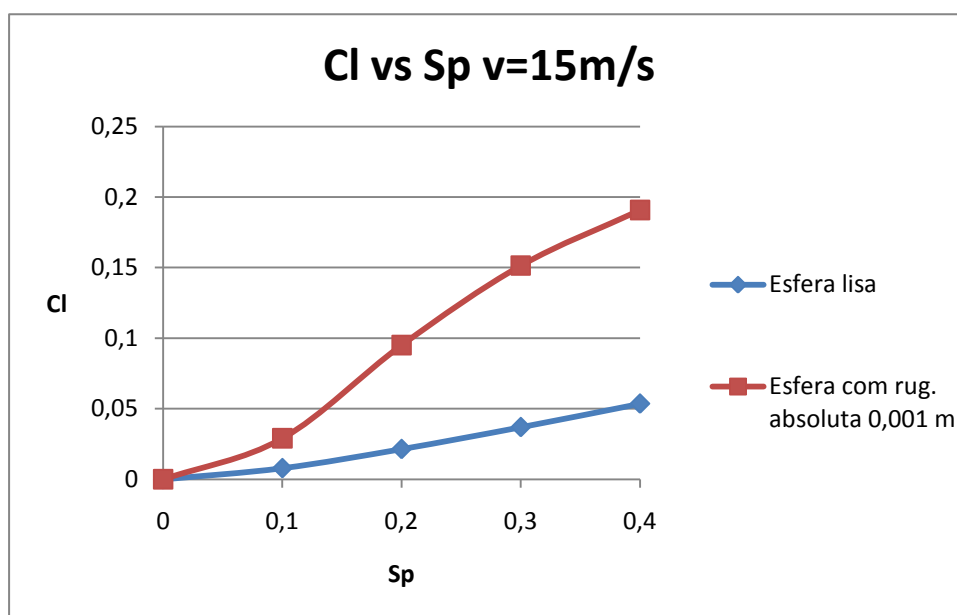


Figura 8 – Gráfico do coeficiente de sustentação em função do parâmetro de rotação.

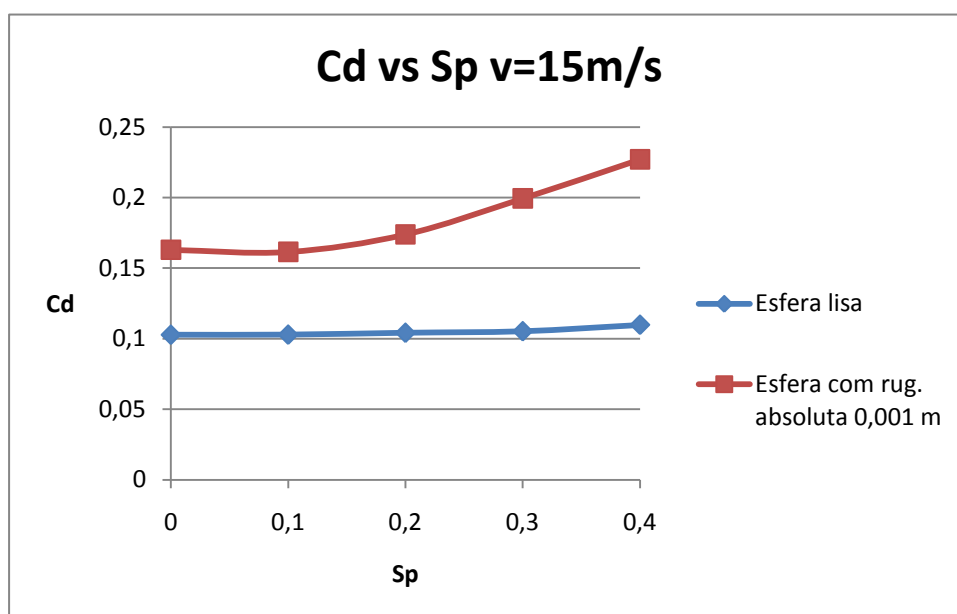


Figura 9 – Gráfico do coeficiente de resistência aerodinâmica em função do parâmetro de rotação.

Numa primeira comparação podemos verificar pela Figura 8 e Figura 9, que o aumento da rotação desempenha um papel importante na geração de sustentação. Entre os resultados dos dois casos verificou-se que para um mesmo parâmetro de rotação conseguimos gerar mais sustentação e resistência aerodinâmica para a esfera rugosa.

No caso do coeficiente de resistência aerodinâmica, verifica-se um aumento significativo na esfera rugosa, podendo-se visualizar na Tabela 3, por exemplo, para um $Sp=0,4$ o valor do coeficiente de resistência aerodinâmica foi de $Cd=0,110$ para a esfera lisa e para a esfera rugosa um valor superior $Cd=0,227$. A maior influência no coeficiente de resistência aerodinâmica foi devida à resistência aerodinâmica devido à pressão, na qual se verifica a diferença de pressões na parte posterior e dianteira da esfera, o que contribui para o aumento de Cd , sendo que na esfera lisa (ver Figura 15) a resistência aerodinâmica devido à pressão é menor quando comparado com a esfera rugosa (ver Figura 16). Um outro parâmetro que contribui para a obtenção do coeficiente de resistência aerodinâmica é o coeficiente de resistência aerodinâmica superficial devido ao atrito que neste caso não teve uma contribuição significativa na esfera lisa, sendo esta contribuição na ordem dos 20% ($Cdf=0,021$). Quanto à esfera rugosa teve uma contribuição ligeiramente superior na ordem dos 26% ($Cdf=0,060$).

No caso do coeficiente de sustentação, podemos tomar como exemplo um valor de $Sp=0,4$, onde o Cl para a esfera lisa foi de $Cl=0,054$ e para a esfera com rugosidade $Cl=0,191$, verificando-se assim a existência de um maior aumento de Cl na esfera rugosa, devido influência da rugosidade, sendo que esta arrasta maior quantidade de fluido aumentando a sua circulação para um aumento da rotação, evidenciando assim o efeito de Magnus. Na zona onde a velocidade é maior, a pressão diminui, sendo que na zona oposta a velocidade diminui e a pressão aumenta, isto faz com que a esfera rugosa se desvie da linha de corrente e ocorra uma separação da camada limite mais tardia originando uma esteira assimétrica. Esta ocorrência é visível na Figura 10 e Figura 13, na qual se verifica uma esteira mais alongada na esfera rugosa e na esfera lisa mais curta, isto demonstra a importância da rugosidade na geração do efeito de Magnus.

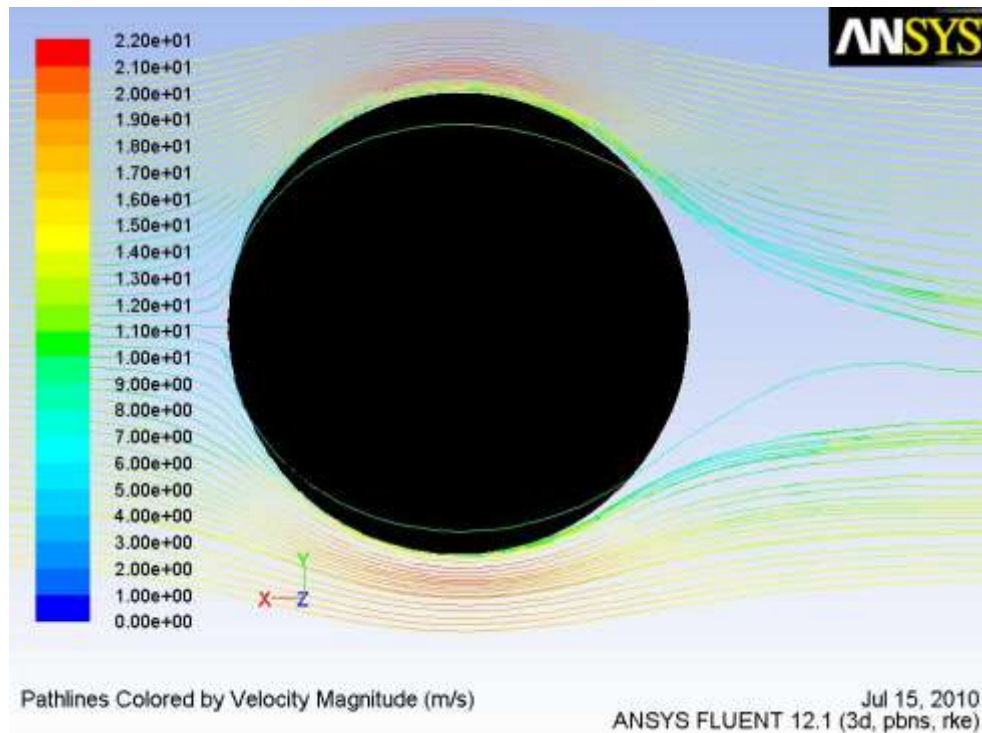


Figura 10 - Linhas de passagem da velocidade para a esfera lisa com velocidade de 15 m/s e velocidade angular $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).

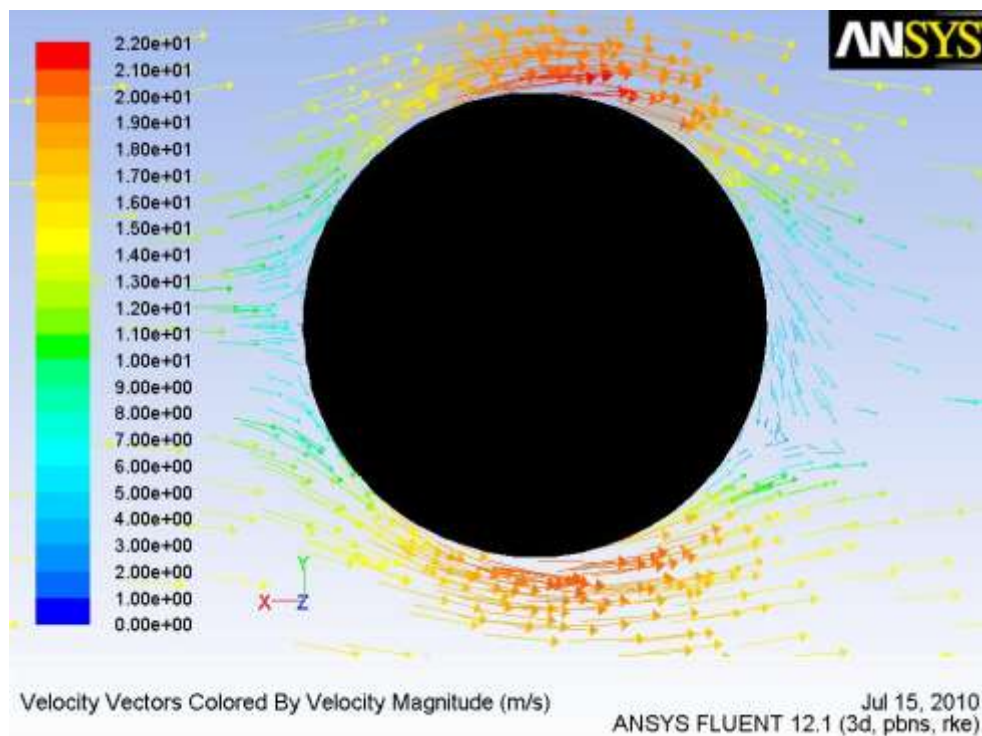


Figura 11 - Vectores da velocidade para a esfera lisa com velocidade de 15 m/s e velocidade angular $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).

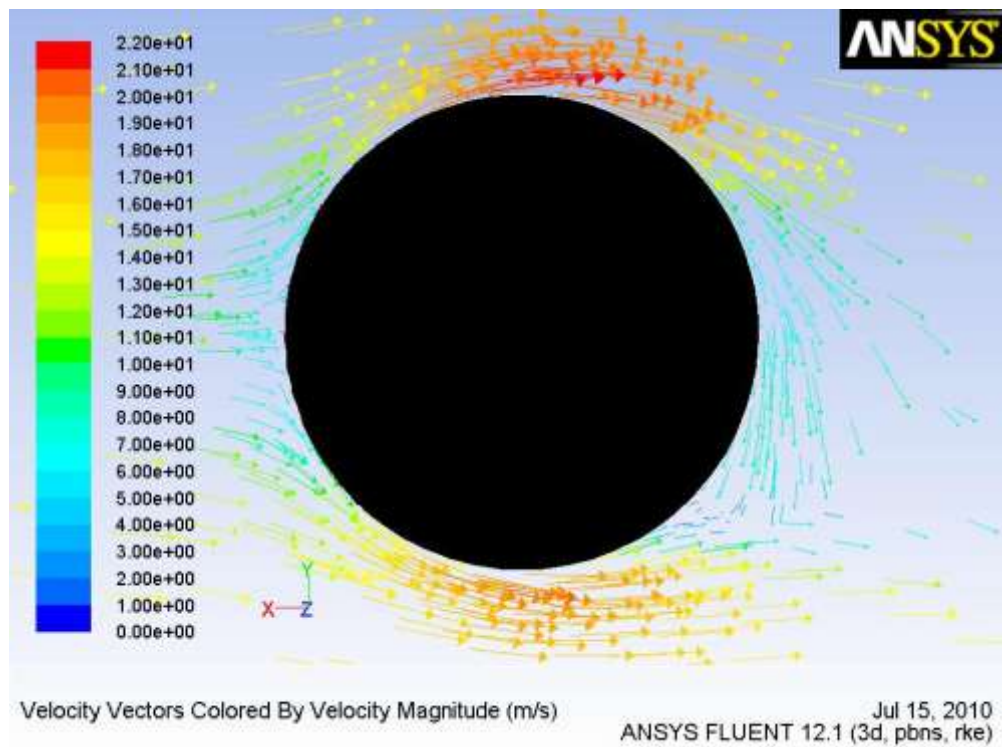


Figura 12 - Vectores da velocidade para a esfera rugosa com velocidade de 15 m/s e velocidade angular $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).

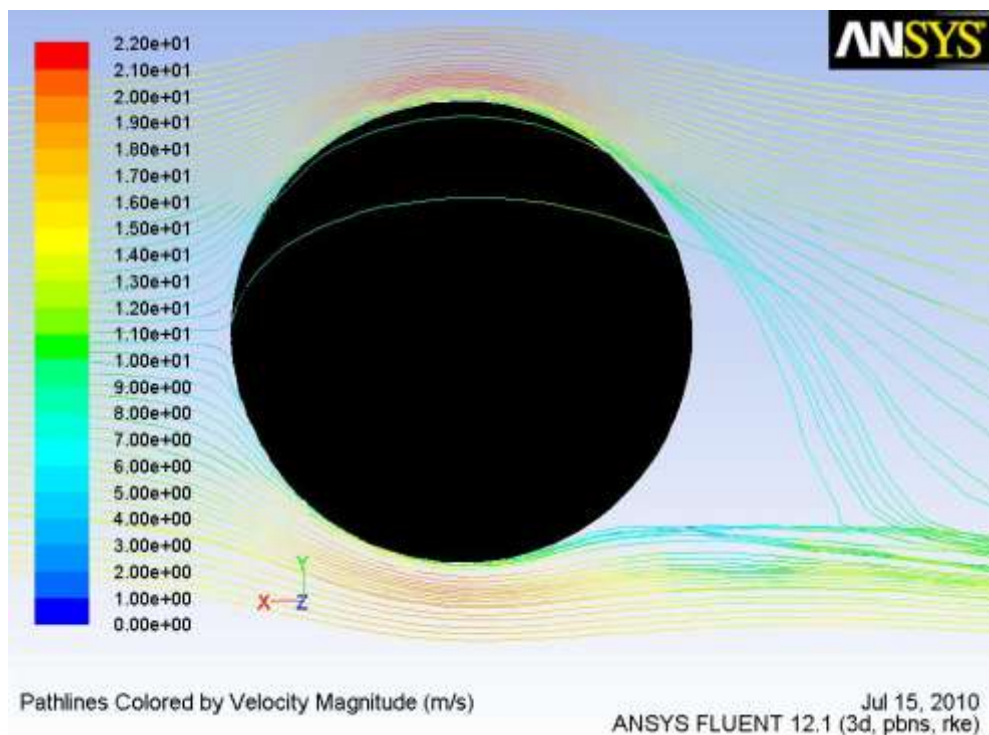


Figura 13 - Linhas de passagem da velocidade para a esfera rugosa com velocidade de 15 m/s e velocidade angular $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).

Na Figura 10 e Figura 13 conseguimos visualizar a zona da separação da camada limite, donde existe o refluxo do escoamento e a formação dos vórtices (apesar de não estarem visíveis nas figuras referidas) dando origem à esteira assimétrica. Essa evidência é mais notória na Figura 13, onde os coeficientes de sustentação foram superiores aos da Figura 10 e onde se comprova a influência que a rugosidade tem na influência da sustentação.

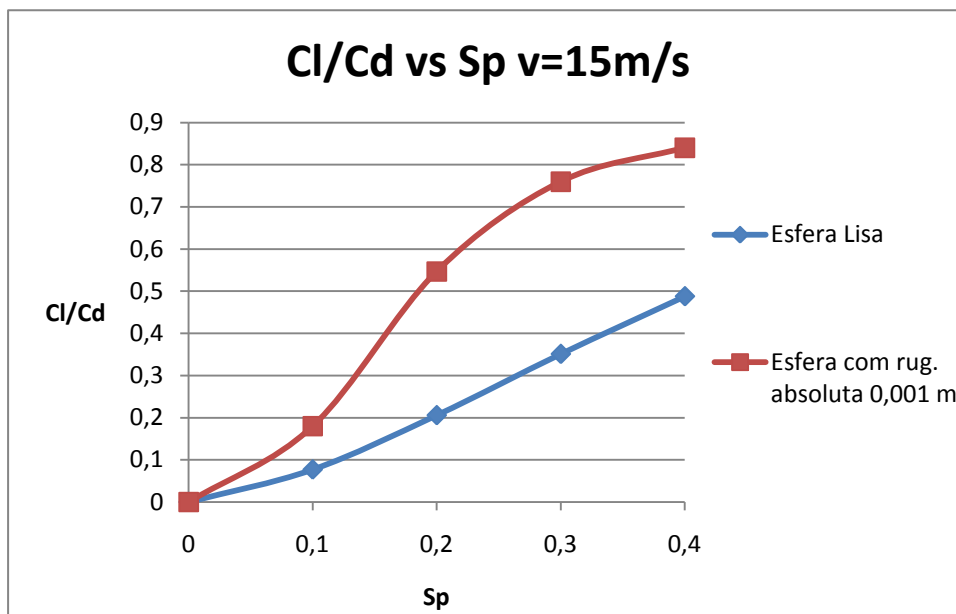


Figura 14 - Gráfico de Cl/Cd em função do parâmetro de rotação.

Na Figura 14 está representada a razão do coeficiente de sustentação com o coeficiente de arrasto, que corresponde à eficiência aerodinâmica, em função de Sp. Pela figura verifica-se a tendência de aumento desta eficiência com o aumento de Sp. Tomando um valor de Sp=0,4, podemos ver que entre a esfera lisa e a esfera rugosa a eficiência foi quase o dobro para a esfera rugosa sendo o valor correspondente da eficiência aerodinâmica para esfera lisa de Cl/Cd=0,488 e para a esfera com rugosidade de Cl/Cd=0,840 (valores retirados da Tabela 3).

Em relação ao coeficiente de pressão verifica-se uma distribuição de pressões mais baixas na zona posterior da esfera rugosa que na zona dianteira (ver Figura 16), na esfera lisa também se verifica essa evidência (ver Figura 15), mas em menor proporção, sendo a distribuição de pressões maior na parte dianteira, contribuindo para um menor aumento do valor de Cd em comparação à esfera rugosa. Também já podemos notar a influência que a rotação tem na zona superior e inferior onde se pode verificar na Figura 16 uma diferença

apesar de pouco significativa na esfera rugosa. Pela Tabela 3 é visível o aumento de C_l apesar de não ser significativo, mas demonstra-se a sua evolução com o aumento da rotação sendo o valor máximo atingido para o $Sp = 0,4$ de $C_l = 0,054$.

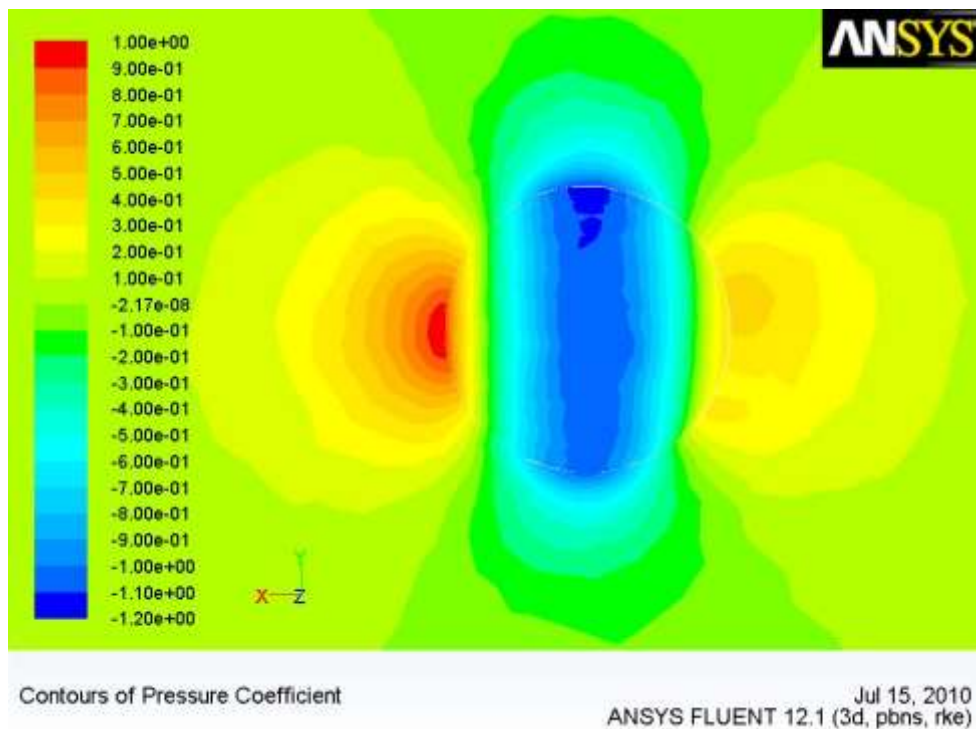


Figura 15 - Contornos do coeficiente de pressão para a esfera lisa com velocidade $v=15$ m/s e velocidade angular $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).

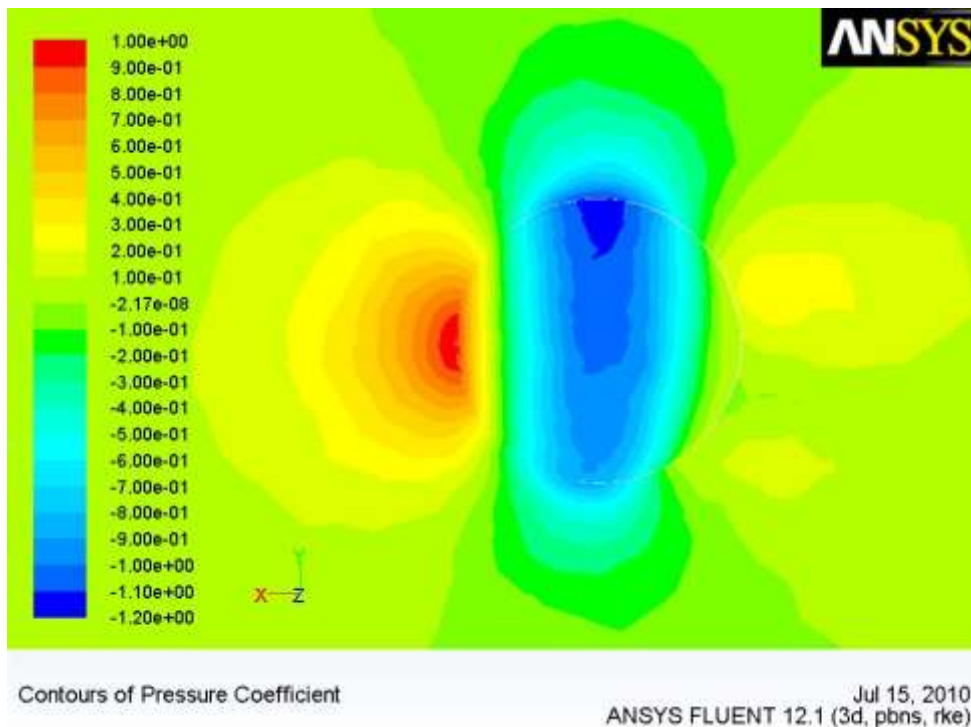


Figura 16 - Contornos do coeficiente de pressão para a esfera com $= 1 \times 10^{-3}$ m com velocidade $v=15$ m/s e $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).

5.3. Influência da bola de futebol

De modo a obter uma comparação mais realista em termos da temática do trabalho, foi repetido o capítulo 4.1., na qual se substituiu a esfera lisa por uma geometria importada de uma bola de futebol com 32 painéis e com rugosidade relativa $\varepsilon/D = 7,5 \times 10^{-4}$ ($\varepsilon = 1,65 \times 10^{-4} \text{ m}$), sendo este o valor intermédio de rugosidade numa bola de futebol, retirado do artigo de Carré (Carré et al, 2002). A malha foi gerada de igual forma ao Capítulo 4.2. obtendo-se 60149 nós e 333927 elementos. No capítulo 4.3. o *cell skewness* foi de 0,906476 e o *aspect ratio* de 26,6056, sendo estes valores aceitáveis dentro dos limites estabelecidos pelo programa. Os valores de ω , para a velocidade 15 m/s continuaram iguais aos mencionados anteriormente (subcapítulo 5.2). No cálculo para os 10 m/s (36 km/h) obteve-se o número de Reynolds $Re = 1,5 \times 10^5$.

Os valores de ω foram obtidos da mesma forma como descrito anteriormente através da expressão (2.5) e os resultados estão apresentados na Tabela 1 na qual se obteve:

$$\omega = 9,1 \text{ rad/s (87 rpm), para Sp=0,1}$$

$$\omega = 18,2 \text{ rad/s (174 rpm), para Sp=0,2}$$

$$\omega = 27,3 \text{ rad/s (261 rpm), para Sp=0,3}$$

$$\omega = 36,4 \text{ rad/s (348 rpm), para Sp=0,4}$$

Para a velocidade de 30 m/s foi obtido o número de Reynolds foi $Re = 4,5 \times 10^5$.

Os valores de ω foram obtidos da através da expressão (2.5) e estão presentes na Tabela 1, sendo respectivamente:

$$\omega = 27,3 \text{ rad/s (261 rpm), para Sp=0,1}$$

$$\omega = 54,5 \text{ rad/s (520 rpm), para Sp=0,2}$$

$$\omega = 81,8 \text{ rad/s (781 rpm), para Sp=0,3}$$

$$\omega = 109,1 \text{ rad/s (1042 rpm), para Sp=0,4}$$

Tabela 4 – Resultados obtidos dos ensaios na bola de futebol.

Sp	Velocidade 10 m/s				Velocidade 15 m/s				Velocidade 30 m/s			
	C _L	C _D	F _L (N)	F _D (N)	C _L	C _D	F _L (N)	F _D (N)	C _L	C _D	F _L (N)	F _D (N)
0	0	0,125	0	0,291	0	0,123	0	0,666	0	0,129	0	2,694
0,1	0,069	0,131	0,162	0,305	0,054	0,127	0,294	0,691	0,074	0,136	1,542	2,849
0,2	0,121	0,147	0,282	0,343	0,122	0,147	0,665	0,796	0,131	0,154	2,739	3,225
0,3	0,185	0,194	0,431	0,451	0,196	0,212	1,067	1,153	0,207	0,231	4,336	4,837
0,4	0,210	0,239	0,489	0,556	0,213	0,242	1,159	1,314	0,225	0,252	4,711	5,272

Os valores obtidos dos coeficientes de sustentação e de resistência aerodinâmica para a velocidade de 30 m/s da Tabela 4 foram comparados com dados de ensaios efectuados e publicados nos artigos científicos seguidamente mencionados.

5.3.1. Resistência aerodinâmica

A primeira comparação foi entre o gráfico da Figura 17 do coeficiente de resistência aerodinâmica em função do parâmetro de rotação com o gráfico da Figura 18 do artigo de Mehta (Mehta, 2008).

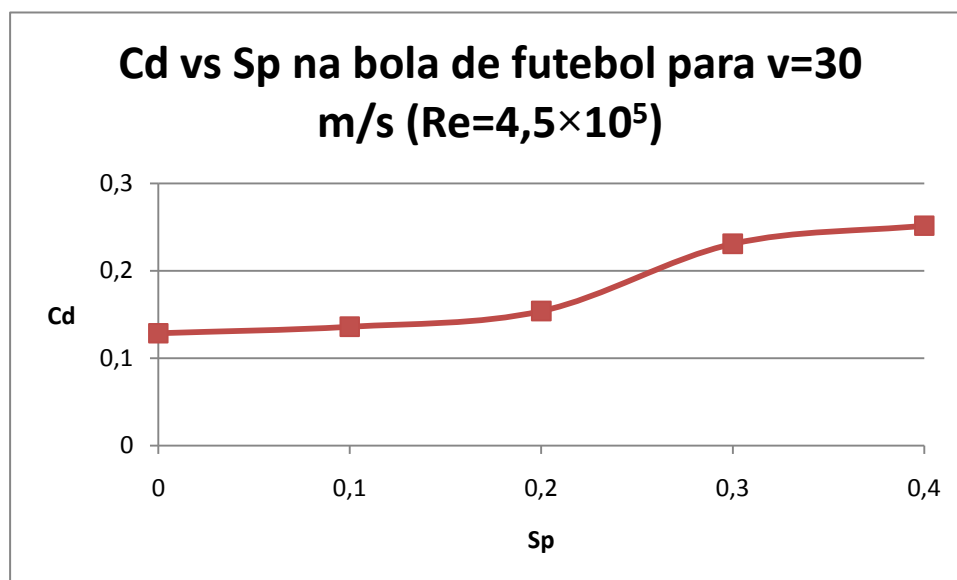


Figura 17 - Relação entre o coeficiente de resistência aerodinâmica e o parâmetro de rotação para a velocidade de 30m/s.

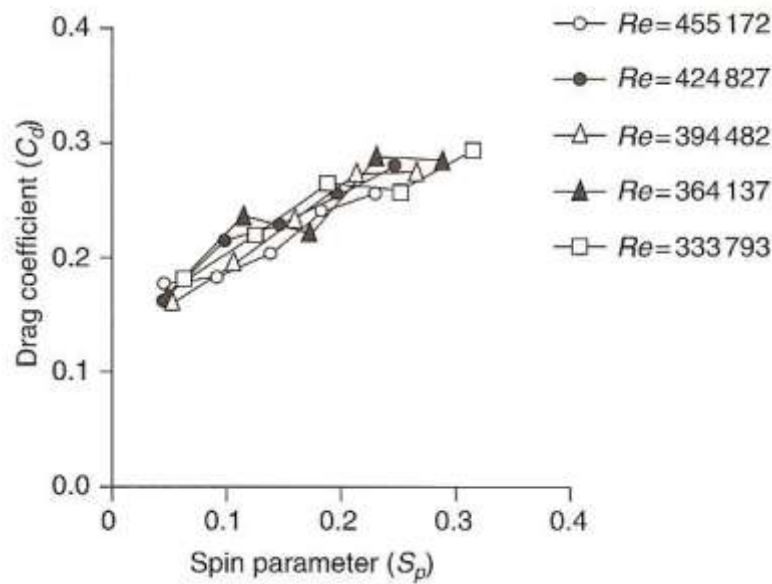


Figura 18 - Relação entre o coeficiente de resistência aerodinâmica e parâmetro de rotação (retirado do Sport Aerodynamics de Mehta).

Para efeito de comparação, o valor de Reynolds da Figura 17, $Re = 4,5 \times 10^5$, foi aproximado ao valor $Re=455172$ da Figura 18. Na comparação entre ambos, verifica-se a tendência de crescimento do coeficiente de resistência aerodinâmica em função do aumento do parâmetro de rotação, como também algum desfasamento dos valores de coeficiente de resistência aerodinâmica entre o ensaio no túnel de vento do artigo e o CFD deste trabalho, como exemplo quantitativo podemos verificar para um $Sp=0,2$ e dos resultados obtidos da Tabela 4 um $C_d=0,131$ e do artigo um $C_d \approx 0,2$. Pôde-se concluir que estas discrepâncias se devem provavelmente aos parâmetros de condição impostos na simulação no CFD, como também as condições do túnel de vento do artigo, visto ambos terem condições de simulação diferentes.

Nos ensaios efectuados sem rotação foram analisados o efeito da resistência aerodinâmica na esfera lisa e na bola de futebol com velocidade de 30 m/s. Na Figura 19 e Figura 20 é visível a diferença de pressões na parte frontal e a parte traseira tanto na esfera como na bola, sendo essa diferença mais visível na Figura 20, onde se verifica uma diferença maior no coeficiente de pressões o que provoca um maior aumento do coeficiente de resistência aerodinâmica, tendo o maior contributo para esse aumento a influência da rugosidade. Na esfera lisa também existe essa diferença mas em menor proporção, justificando o valor menor do coeficiente de resistência aerodinâmica.

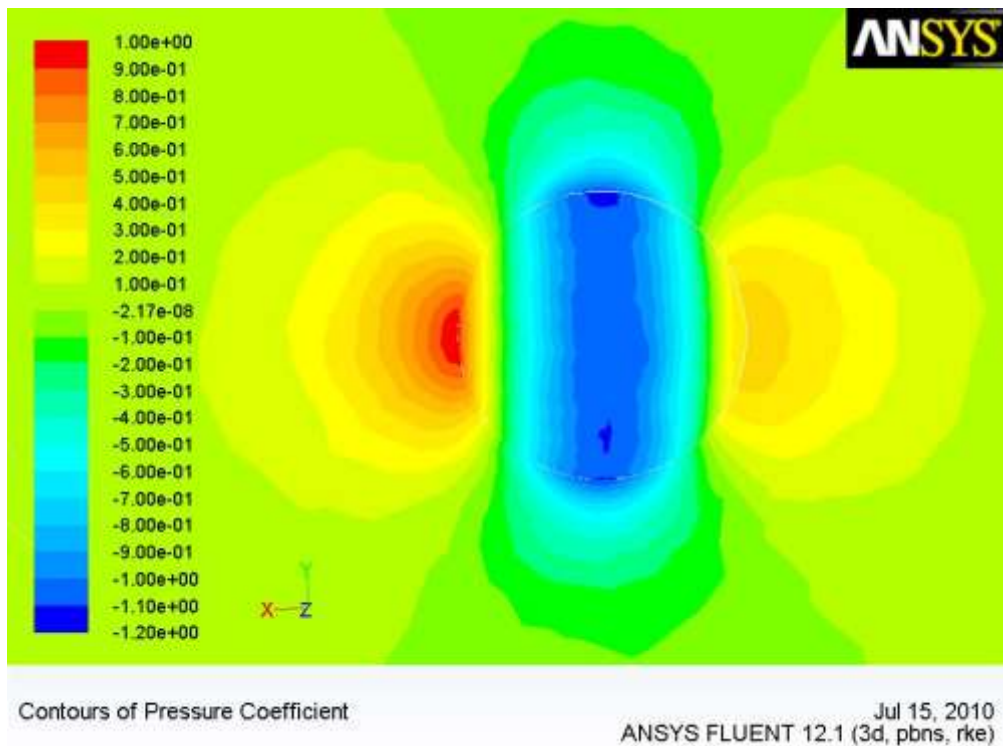


Figura 19 – Contornos do coeficiente de pressão na esfera lisa sem rotação.

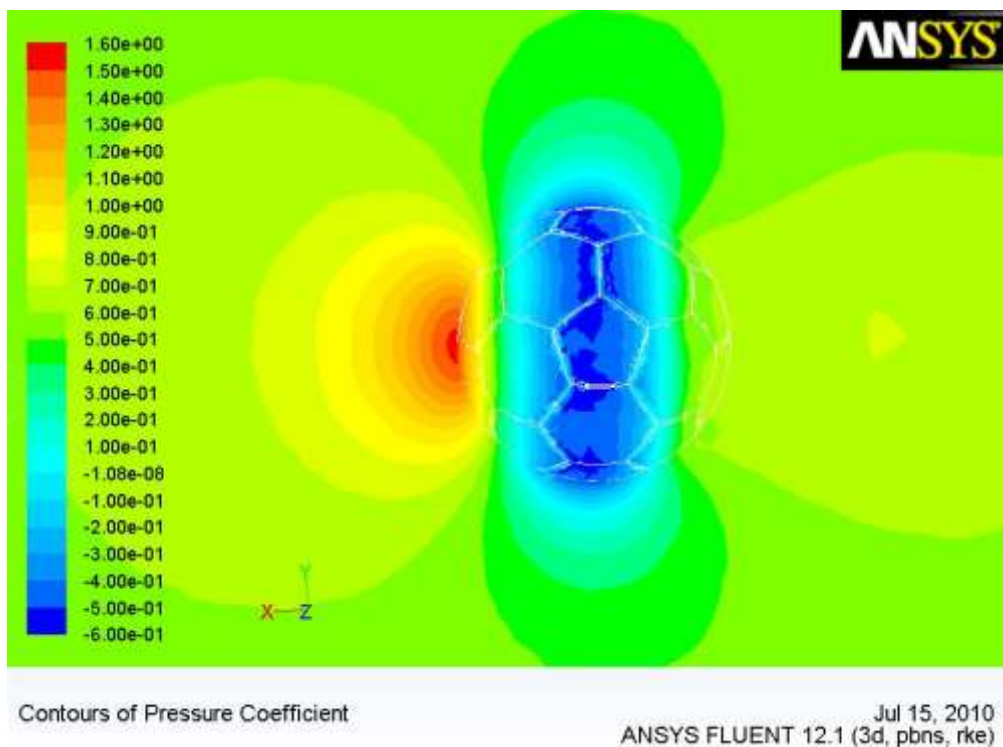


Figura 20 – Contornos do coeficiente de pressões da bola de futebol sem rotação.

5.3.2. Sustentação

Quanto ao coeficiente de sustentação foram também comparados o gráfico da Figura 21 do coeficiente de sustentação em função do parâmetro de rotação obtido nos resultados, com o gráfico da Figura 22 do artigo de Mehta (Mehta, 2008).

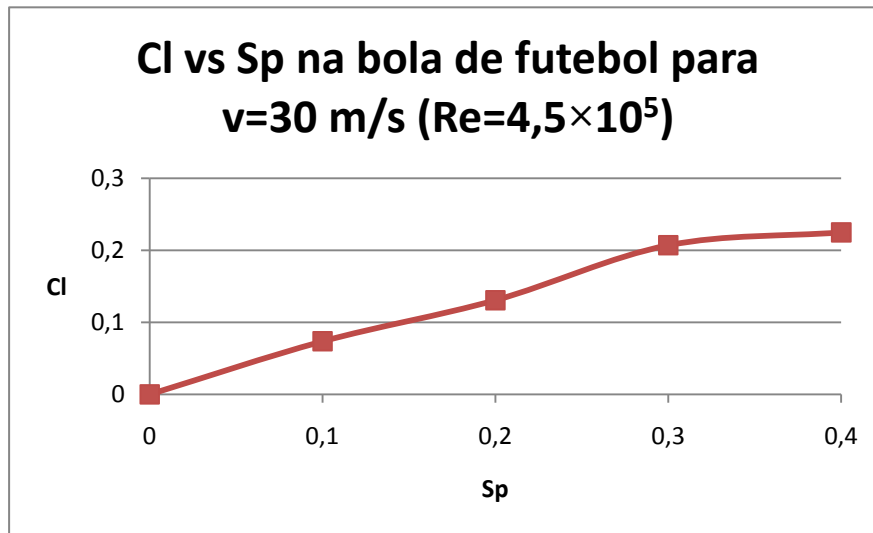


Figura 21 - Relação entre o coeficiente de sustentação e o parâmetro de rotação para a velocidade de 30 m/s.

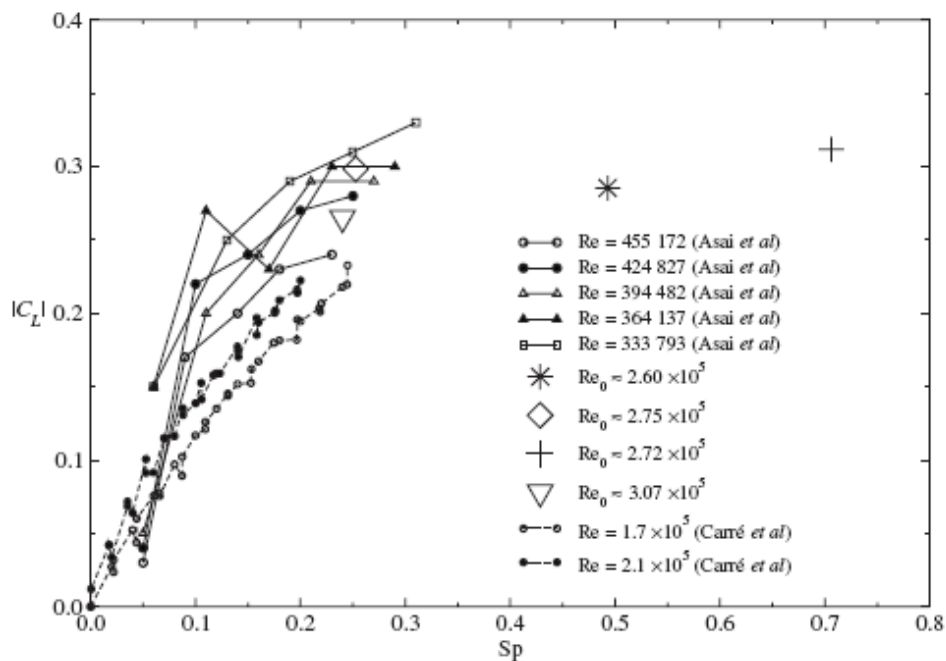


Figura 22 - Relação entre o coeficiente de sustentação e parâmetro de rotação (retirado do Sport Aerodynamics de Mehta).

Para efeitos de comparação o valor de Reynolds da Figura 21, $Re = 4,5 \times 10^5$, foi aproximado ao valor $Re=455172$ da Figura 22. Na comparação entre as figuras, verifica-se igualmente uma tendência de crescimento da sustentação em função do aumento do parâmetro de rotação, como também alguma diferença dos valores do coeficiente de sustentação entre o ensaio no túnel de vento do artigo e os obtidos da simulação no ANSYS FLUENT, podemos tomar como exemplo um valor de $Sp=0,2$ e para esse mesmo parâmetro, retirando da Tabela 4 o valor de $Cd=0,154$ e do artigo o valor de $Cd \approx 0,22$. Verificou-se novamente diferença nos valores obtidos, devendo-se isto também às condições de simulação do túnel de vento e do CFD, sendo que essas diferenças entre os resultados provavelmente se devem à influência que as costuras têm na geometria da bola de futebol e posição donde se encontrava, como também a montagem no túnel de vento.

5.3.3. Influência do número de Reynolds

O seguinte gráfico foi feito em termos de coeficiente de resistência aerodinâmica em função do número de Reynolds, tendo-se considerado a situação na qual não existe rotação na bola de futebol e as velocidades de 10,15,20,25 e 30 m/s.

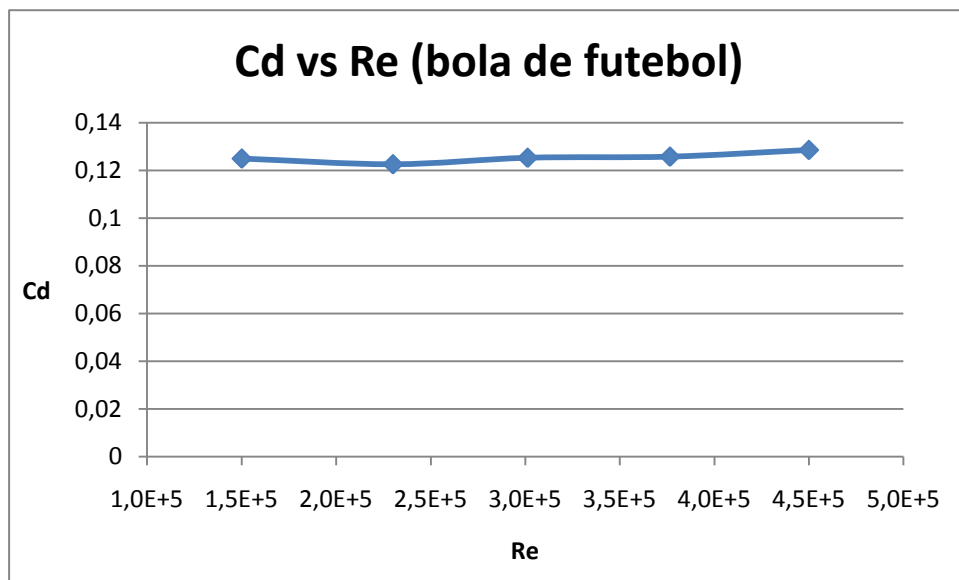


Figura 23 - Coeficiente de resistência aerodinâmica em função do número de Reynolds.

Pela análise do gráfico verifica-se que o coeficiente de resistência aerodinâmica deixa de ser dependente de Reynolds no regime turbulento, isto devido aos efeitos de inércia que são maiores comparativamente aos efeitos viscosos, sendo que a pressão estática (diferença entre a pressão absoluta na superfície e a pressão atmosférica), $(p - p_0)$, varia proporcionalmente com a pressão dinâmica, $(\rho \times U^2 \times 0,5)$, e o coeficiente de pressão ($C_p = (p - p_0)/(\rho \times U^2 \times 0,5)$) torna-se independente do número de Reynolds, esperando-se o mesmo no coeficiente de resistência aerodinâmica que tem maior influência do coeficiente de resistência aerodinâmica devido à pressão, sendo por isso que se visualiza uma diferença pouco significativa do coeficiente de resistência aerodinâmica na Figura 23.

O gráfico da Figura 23 também pode ser comparado com o *CFD: Ball 1* do seguinte gráfico da Figura 24 retirado do artigo de Barber (Barber et al., 2009), que corresponde à bola com os 32 painéis de revestimento.

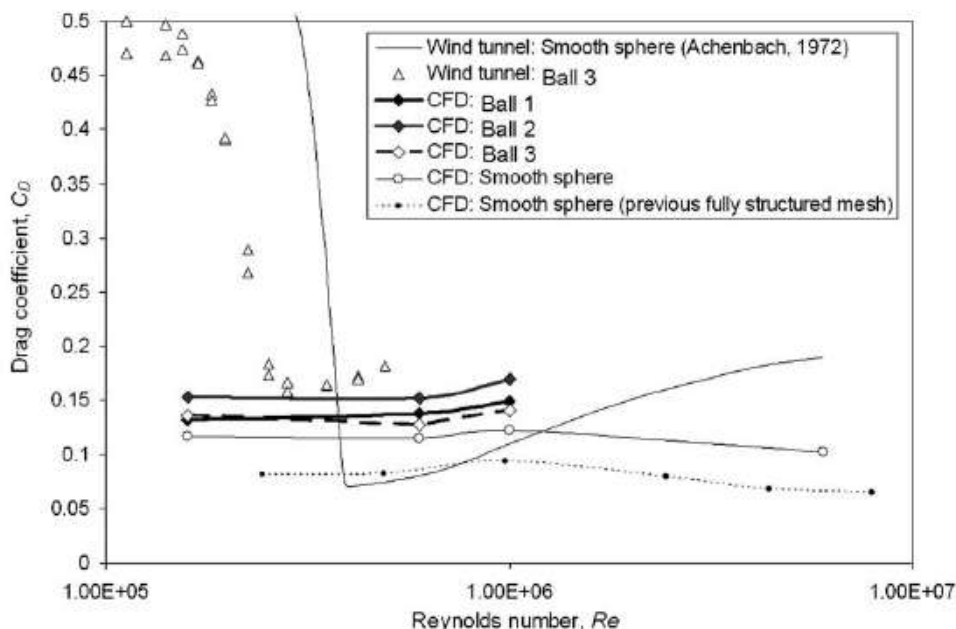


Figura 24 - Coeficiente de resistência aerodinâmica em função do número de Reynolds (retirado de Computers & Fluids de Barber).

Tomando como exemplo um valor de $Re = 4,5 \times 10^5$ da Figura 23, foi obtido um valor de $C_d=0,13$ e comparando com um mesmo valor Re da Figura 24 do artigo obteve-se um valor de $C_d \approx 0,14$, verificando-se um intervalo dos valores C_d com o aumento de Re entre $C_d=0,12$ e $C_d=0,15$, para ambas as figuras e depreendendo-se que os valores do coeficiente de resistência aerodinâmica obtidos do ensaio foram aproximados aos do artigo publicado.

5.3.4. Influência de ω no coeficiente de sustentação

Apesar do coeficiente de sustentação ser gerado com o aumento de Sp , é necessário ter em conta a razão $Sp = r \times \omega/v$. No gráfico da Figura 25 foi fixado o valor de $\omega=27,3$ rad/s (261 rpm) e visualizado a evolução de Cl com o aumento da velocidade. Como se verifica pelo gráfico da Figura 25, no aumento da velocidade de 10 m/s para 30 m/s houve um decréscimo de $Cl \approx 0,18$ para $Cl \approx 0,07$, uma vez que o valor de ω foi fixado houve uma diminuição de Sp . Em termos reais, quanto mais rotação tiver a bola mais efeito irá ser induzido, isso consegue-se através de um remate mais afastado do centro da bola, sendo que quanto mais afastado, maior a rotação da bola e menor a velocidade da bola.

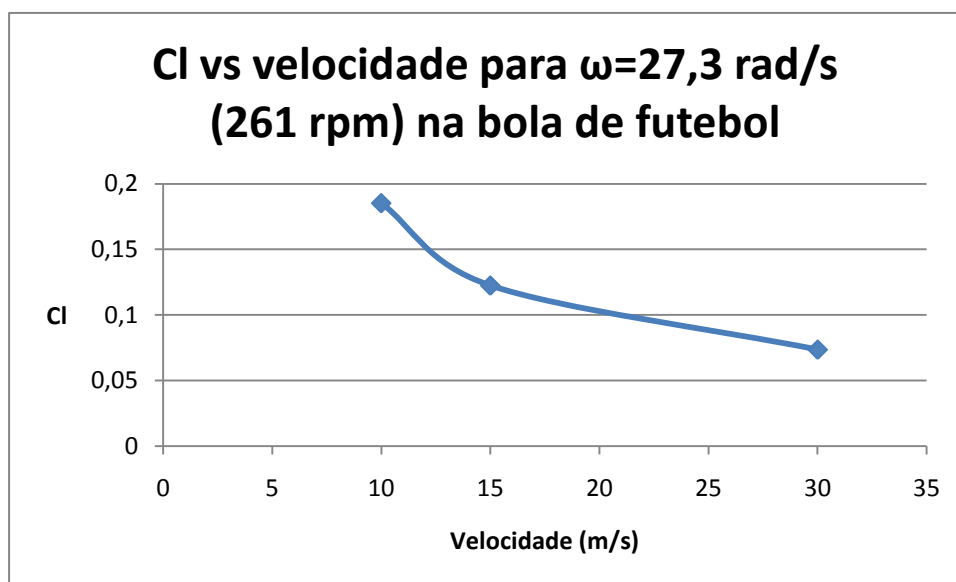


Figura 25 - Gráfico do coeficiente de sustentação em função da velocidade.

O seguinte gráfico da Figura 26 também evidencia o que foi dito para a Figura 25, na qual se verifica que ao aumentar a velocidade da bola, a contribuição para Cl não foi significativa com o aumento de Sp , confirmando-se a importância no aumento da rotação na geração de mais coeficiente de sustentação. Apesar desta constatação em relação ao coeficiente de sustentação, o aumento da velocidade desempenhou uma maior importância no cálculo da força de sustentação, devido ao termo da velocidade ao quadrado.

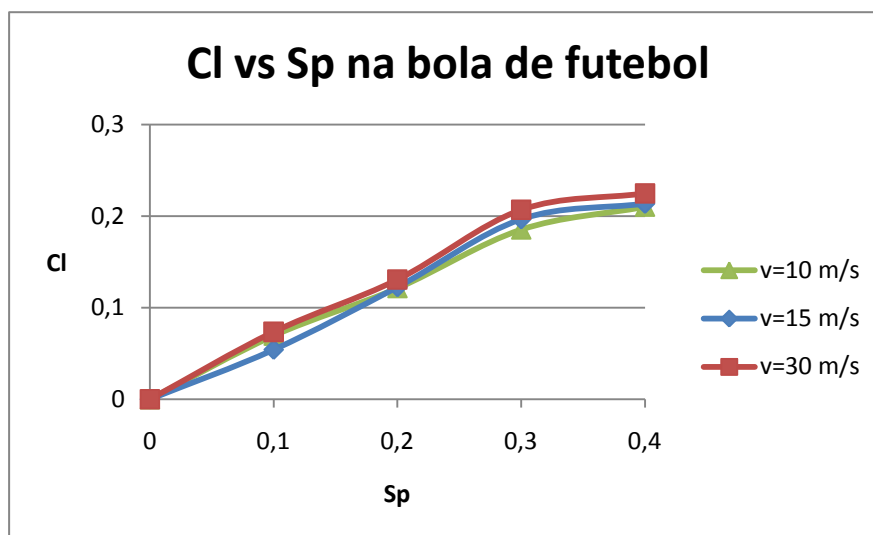


Figura 26 – Gráfico do coeficiente de sustentação em função do parâmetro de rotação.

5.4. Influência de várias rugosidades

Na tentativa de compreender melhor a influência da rugosidade na bola, foram feitas outras simulações com a esfera e a bola de futebol. Numa simulação foi utilizada a rugosidade relativa de $\varepsilon/D = 1,5 \times 10^{-3}$ ($\varepsilon = 3,3 \times 10^{-4} m$) com as mesmas condições, noutra simulação foi utilizada a geometria obtida da bola de futebol com os 32 painéis de revestimento, mas sem rugosidade. Os resultados destas duas simulações encontram-se no Anexo B. O seguinte gráfico foi feito para a velocidade de 15 m/s e mostra evolução do coeficiente de sustentação como também o coeficiente de resistência aerodinâmica em função do parâmetro de rotação dos vários ensaios.

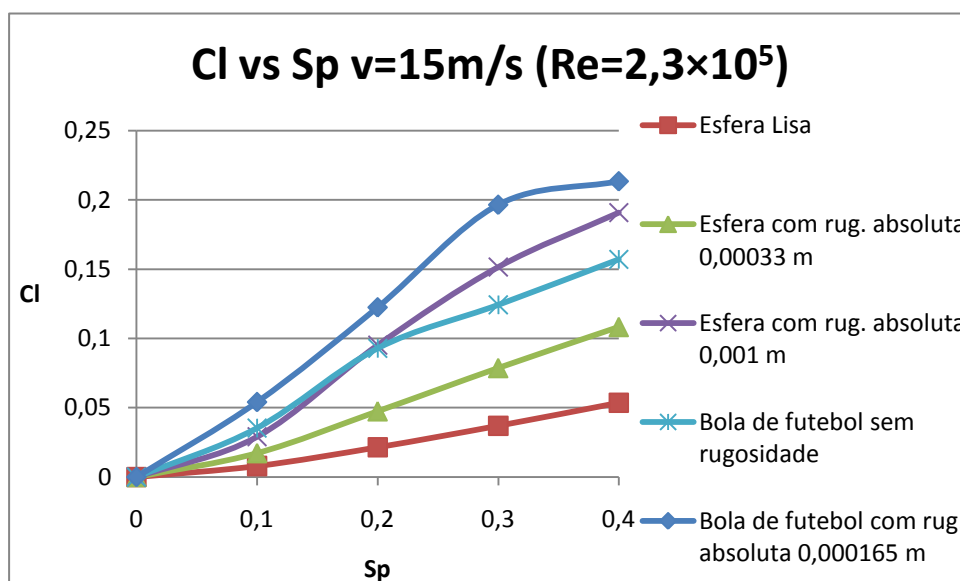


Figura 27 – Gráfico do coeficiente de sustentação em função do parâmetro de rotação para a velocidade de 15 m/s.

Pela análise da Figura 27 podemos verificar que a rugosidade desempenha um papel importante no aumento do coeficiente de sustentação, mas também se observa que as costuras nos painéis de revestimento também têm relativa importância. Tomando como exemplo um $Sp=0,4$, o valor de C_l da bola de futebol com rugosidade foi de $C_l \approx 0,22$, obtendo o maior valor dos ensaios. A esfera com $\varepsilon = 1 \times 10^{-3} m$ obteve um valor de $C_l \approx 0,18$ tendo obtido um valor superior à bola de futebol sem rugosidade de $C_l \approx 0,16$, que por sua vez foi superior à esfera lisa $C_l \approx 0,05$ e à esfera com $\varepsilon = 3,3 \times 10^{-4} m$ sendo $C_l \approx 0,11$.

Podemos concluir assim que apesar das costuras dos painéis de revestimento terem influência no valor de C_l , a rugosidade também desempenha um papel importante, na qual se demonstrou que só com as costuras consegue-se obter maior C_l que a esfera lisa e com $\varepsilon = 3,3 \times 10^{-4} m$. Mas a partir de um certo valor de rugosidade, neste caso a esfera com $\varepsilon = 1 \times 10^{-3} m$, conseguiu-se maior C_l que a bola de futebol sem rugosidade, sendo que a melhor solução seria a utilização da bola de futebol com uma rugosidade, visto este ter obtido um maior valor de C_l .

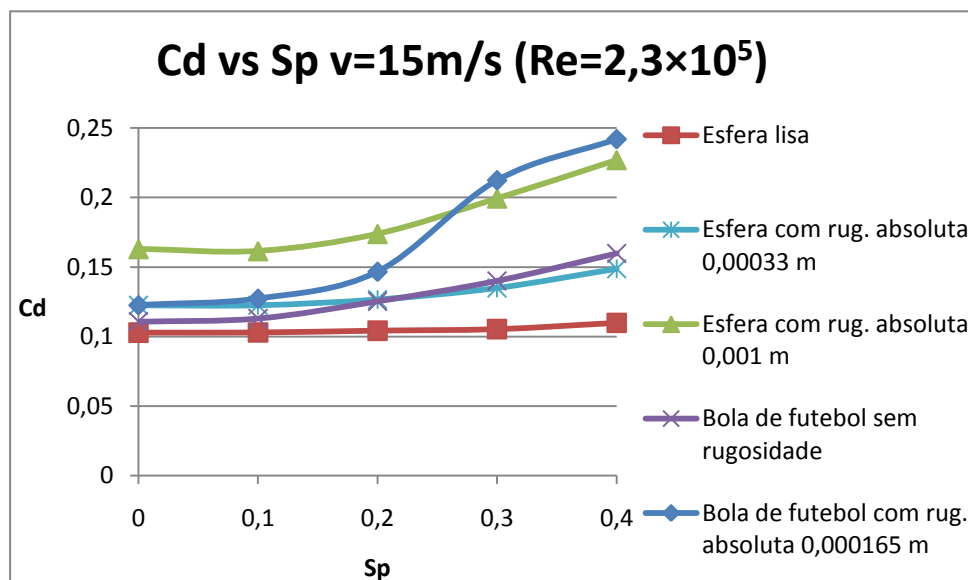


Figura 28 - Gráfico do coeficiente de resistência aerodinâmica em função do parâmetro de rotação para a velocidade de 15 m/s.

Na Figura 28 e tomando um valor de $Sp=0,4$, verifica-se um maior valor de C_d para a bola de futebol com rugosidade sendo $C_d \approx 0,24$. Na esfera com $\varepsilon = 1 \times 10^{-3} m$ foi obtido um valor de $C_d \approx 0,23$ superior à de bola de futebol sem rugosidade $C_d \approx 0,16$, sendo por sua vez superior à esfera lisa $C_d \approx 0,11$ e à esfera com $\varepsilon = 3,3 \times 10^{-4} m$ de $C_d \approx 0,15$. O ocorrência do aumento de C_d justifica-se pelo aumento do parâmetro de rotação, sendo que as costuras e a rugosidade também tiveram influência nos resultados obtidos.

5.5. Coeficiente de resistência aerodinâmica devido ao atrito

Para esta próxima comparação foi utilizado a bola de futebol sem rotação e com rotação de modo a verificar a influência na resistência aerodinâmica devido ao atrito, sendo as imagens referentes aos coeficientes de resistência aerodinâmica devido ao atrito para uma velocidade da bola 15 m/s.

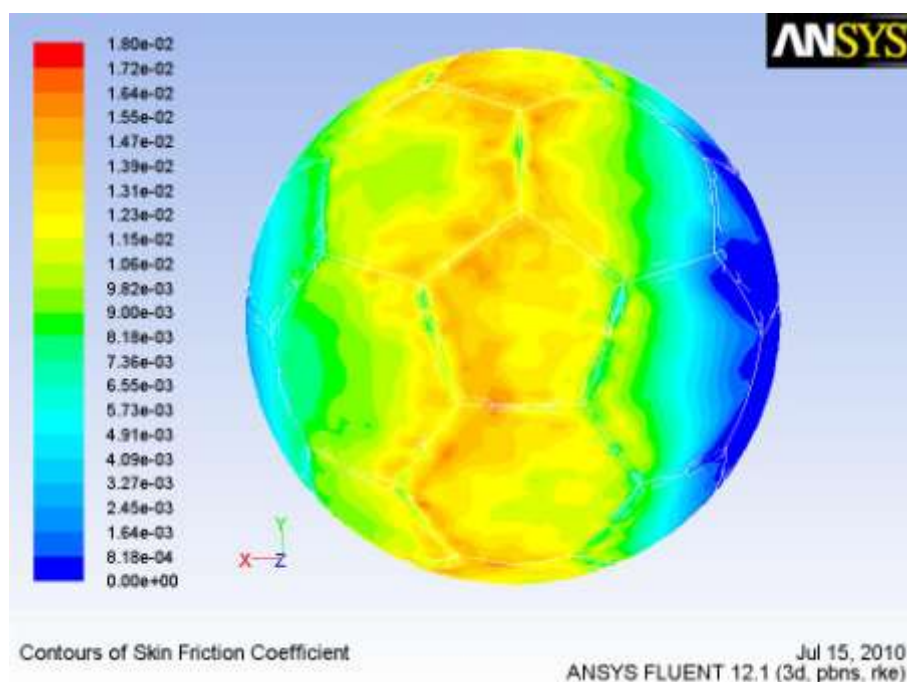


Figura 29 – Contornos do coeficiente de resistência aerodinâmica devido ao atrito para a bola de futebol sem rotação.

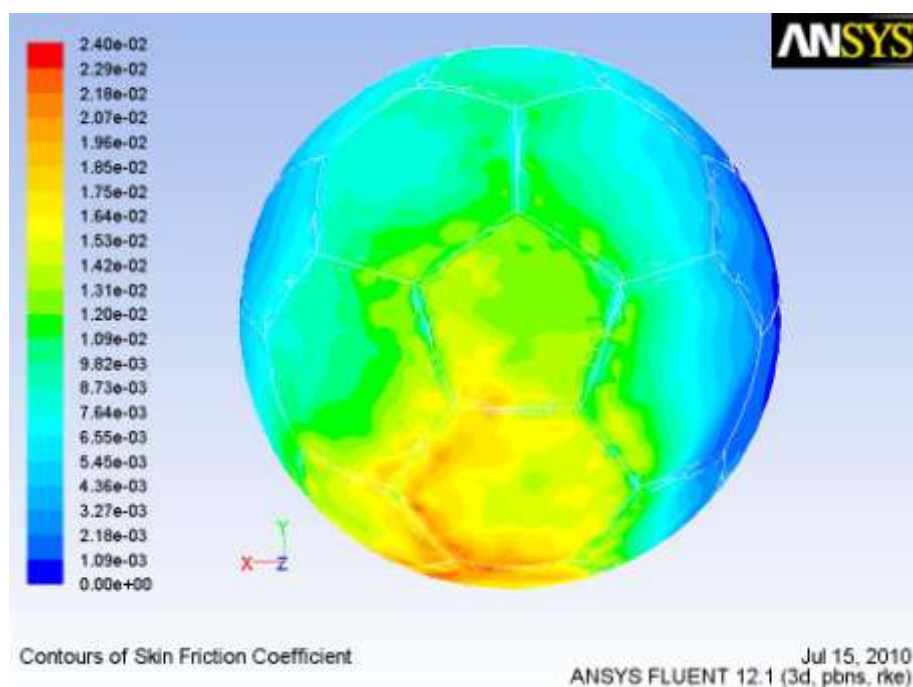


Figura 30 – Contornos do coeficiente de resistência aerodinâmica devido ao atrito para a bola de futebol com rotação $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).

Comparando as duas figuras observou-se que os contornos da Figura 29 tem maior distribuição do valor do coeficiente de resistência aerodinâmica devido ao atrito, desde a superfície superior à superfície inferior da bola, tendo nessas zonas ocorridos maiores perda de energia durante o escoamento. Na superfície posterior e dianteira da bola os valores de coeficiente de resistência aerodinâmica devido ao atrito foram inferiores, devido à predominância de maiores pressões (ver Anexo C). Na Figura 30 existe uma maior concentração da resistência aerodinâmica devido ao atrito na zona inferior da bola, devido à direcção da rotação imposta na bola que por sua vez “colide” com a velocidade do escoamento.

5.6. Linhas de escoamento da velocidade

As linhas do escoamento para a bola de futebol podem ser vistas na seguinte figura e comparada com a Figura 10 e Figura 13.

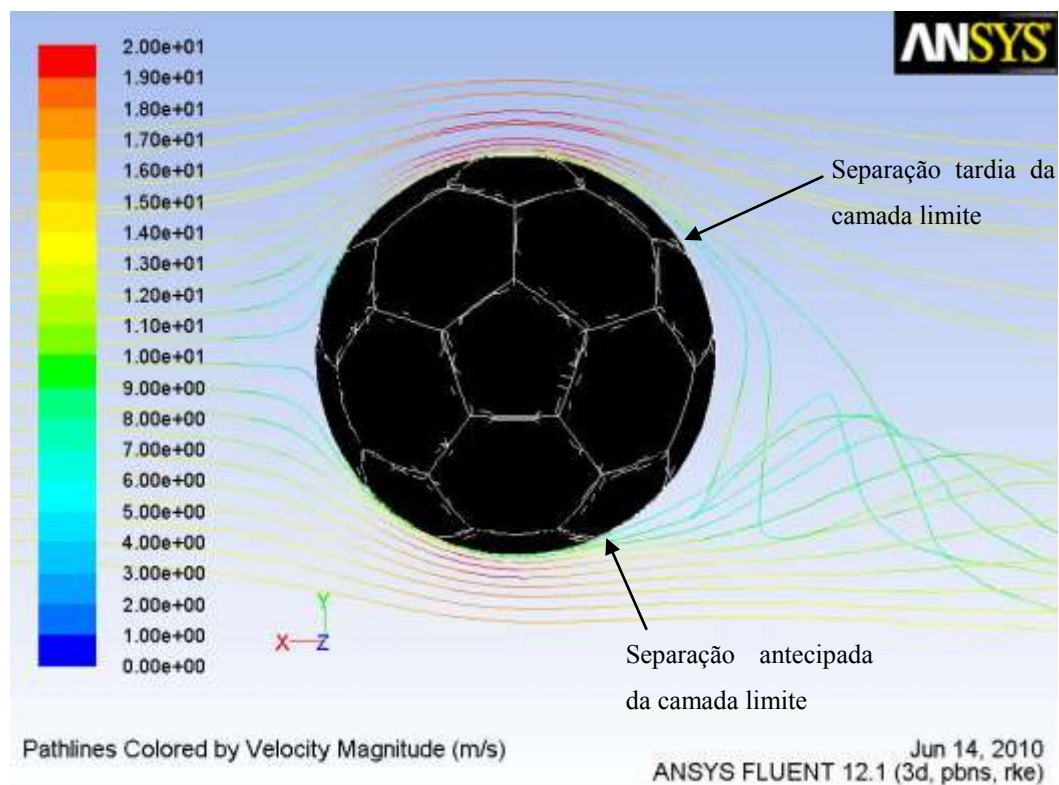


Figura 31 – Linhas de escoamento da velocidade em torno da bola de futebol para a velocidade de 15 m/s e $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).

Na Figura 31 das linhas do escoamento é visível a separação da camada limite, sendo que na zona superior a separação da camada limite teve uma ocorrência mais tardia e na zona inferior a separação da camada limite foi mais antecipada, na qual se formou uma esteira assimétrica e uma maior formação de vórtices. Comparando esta ocorrência com a Figura 10 e Figura 13, verifica-se que a separação da camada limite foi mais tardia para este caso e que ocorreu uma maior formação de vórtices, e com isso provocando uma maior sustentação na bola.

Nas figuras seguintes será mostrado as linhas de escoamento da velocidade, para a velocidade de entrada 15 m/s. As figuras foram colocadas sequencialmente de modo a mostrar a formação da esteira quando aumentado a rotação.

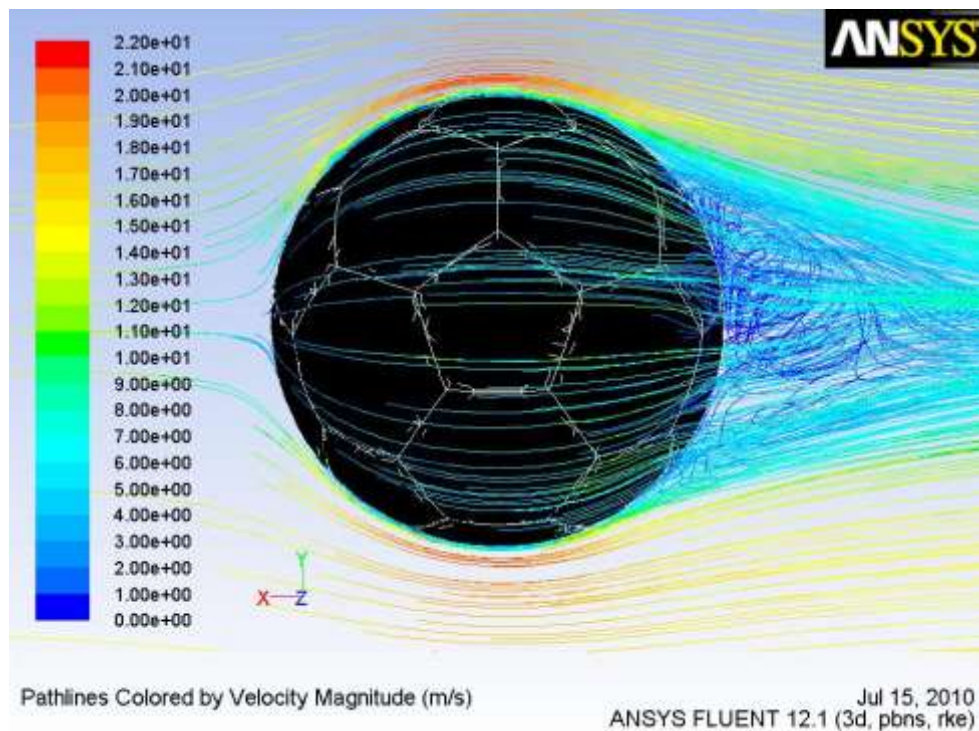


Figura 32 – Contornos da velocidade para a velocidade da bola $v=15$ m/s e sem rotação.

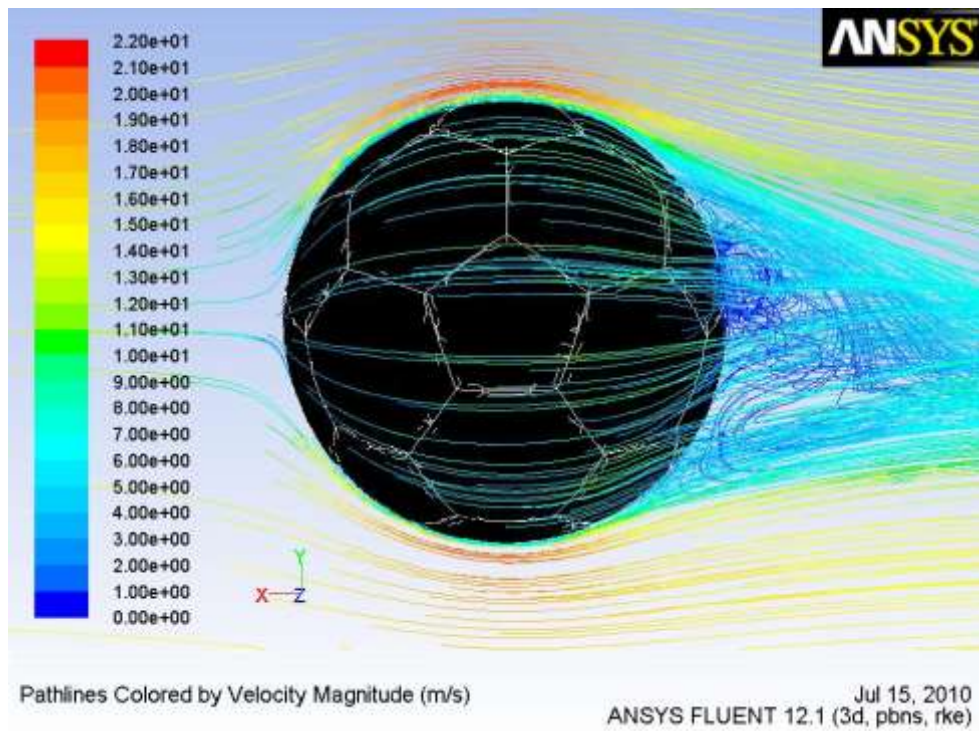


Figura 33 - Contornos da velocidade para a velocidade da bola $v=15$ m/s e com $\omega=13,6$ rad/s (130 rpm).

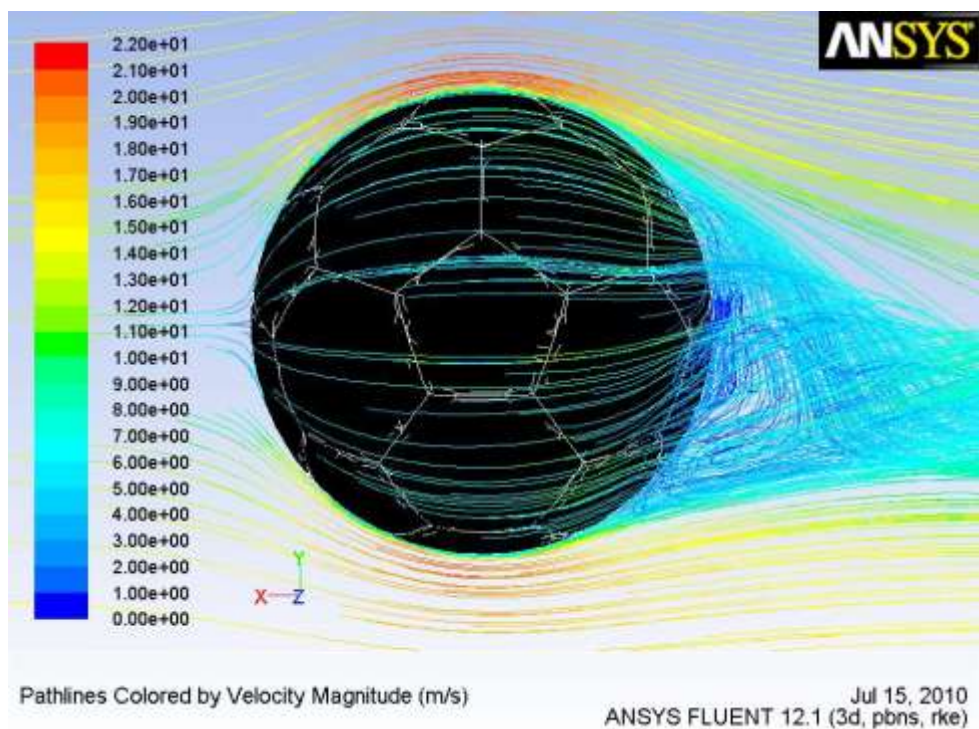


Figura 34 - Contornos da velocidade para a velocidade da bola $v=15$ m/s e com $\omega=27,3$ rad/s (261 rpm).

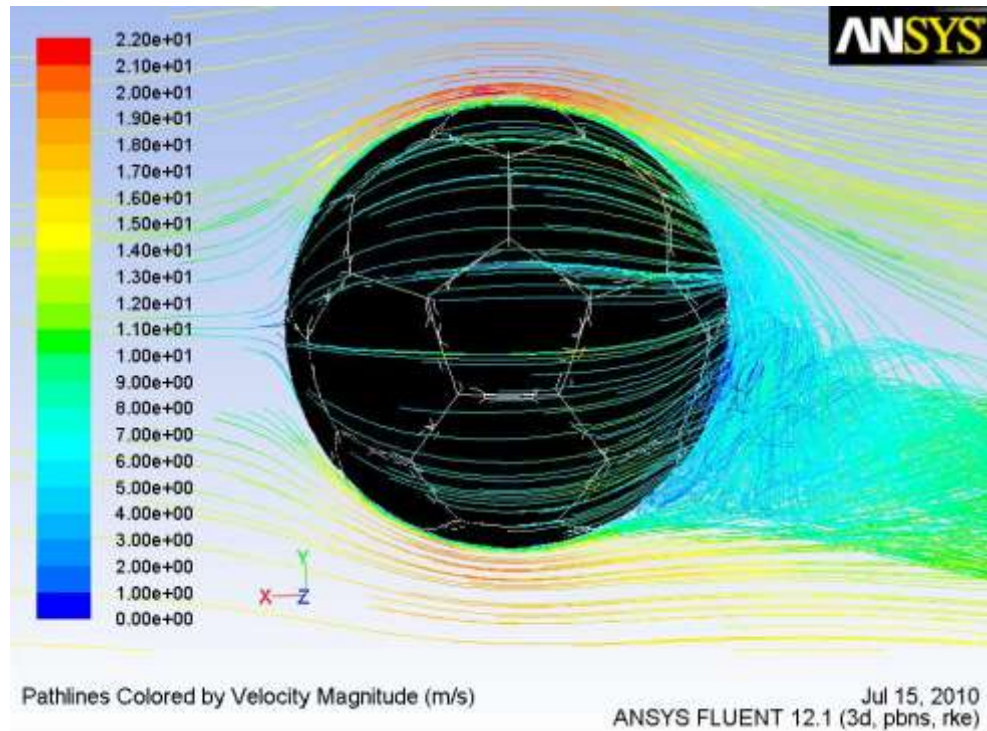


Figura 35 - Contornos da velocidade para a velocidade da bola $v=15$ m/s e com $\omega=40,9$ rad/s (391 rpm).

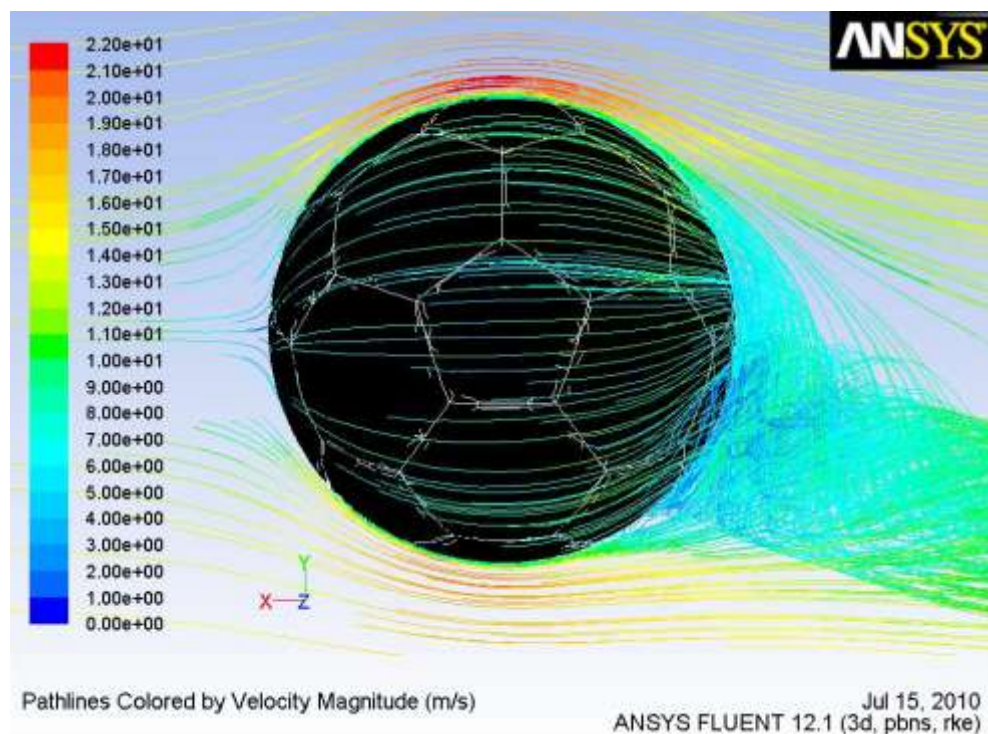


Figura 36 - Contornos da velocidade para a velocidade da bola $v=15$ m/s e com $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm).

Através da sequência de imagens desde a Figura 32 à Figura 36, consegue-se visualizar a influência que a rotação tem nas linhas de escoamento da velocidade da bola desde a ausência de rotação até à rotação máxima imposta (velocidade angular de $\omega=54,5$ rad/s), na qual se verifica uma deslocação gradual da esteira com o aumento da rotação originando uma esteira mais assimétrica e com maior formação de vórtices após a separação da camada limite.

6. Conclusões e recomendação de trabalhos futuros

Neste capítulo, serão abordados as várias conclusões retidas das análises realizadas e dos resultados, como também a comparação com os resultados da literatura.

Na escolha do melhor modelo a utilizar pôde-se concluir que para os casos na qual existe rotação numa esfera o mais apropriado seria o modelo *realizable* k- ϵ , isto através das recomendações do software ANSYS FLUENT, como também, através da comparação entre os valores do coeficiente de resistência aerodinâmica obtidos para os modelos standard k- ϵ e *realizable* k- ϵ do ensaio com os da literatura, o que correspondeu às recomendações do ANSYS FLUENT.

As primeiras comparações de valores obtidos dos coeficientes de sustentação e resistência aerodinâmica, foram feitas entre uma esfera lisa e uma esfera com rugosidade absoluta 1 mm. A rugosidade mostrou-se de uma grande importância na influência dos resultados, sendo que para o aumento da rugosidade, foi gerada mais sustentação como também mais resistência aerodinâmica.

Dos outros ensaios com outras rugosidades na esfera e na geometria da bola de futebol com 32 painéis de revestimento, concluiu-se que a rugosidade presente na bola de futebol contribuiu para a obtenção de maiores valores dos coeficientes, mostrando também que a influência dos painéis de revestimento na bola de futebol mostrou uma significativa importância na geração de sustentação.

O aumento da rotação também teve grande influência no aumento do coeficiente de sustentação, sendo que para uma dada rotação quando se aumentou a velocidade houve uma diminuição do coeficiente de sustentação, o que significa que se rematarmos a bola com mais rotação e menos velocidade teremos uma melhor visualização do efeito de Magnus, que por sua vez aumenta o parâmetro de rotação sendo este a razão entre a velocidade angular e velocidade da bola.

Para ensaios sem rotação só com a bola de futebol concluiu-se que o aumento do número de Re teve pouca influência na variação do coeficiente de resistência aerodinâmica da bola de futebol, por este se encontrar no regime turbulento. Não foi possível a simulação da transição do regime laminar para o regime turbulento, pelo que não se conseguiu ver o valor de Re no qual ocorre a redução abrupta do C_d na bola de futebol.

Neste momento, em que decorre o campeonato do Mundo de Futebol, para recomendação de trabalhos futuros, seria interessante a análise em CFD da nova bola do mundial 2010 Jabulani, e comparar com os resultados já obtidos das outras bolas. Os ensaios das trajetórias com a técnica das câmaras como também os túneis de vento seriam igualmente de grande interesse. A experimentação de novas geometrias com diferentes técnicas de moldagem dos painéis de revestimento e outras rugosidades também são factores a ter em conta para futuros ensaios.

Referências

- ANSYS *Workbench* 12.1 User's Guide, USA, 2010.
- ANSYS FLUENT 12.1 User's Guide, USA, 2010.
- Barber, S., Carré, M.J., 2009. Soccer Ball Aerodynamics. *Computational Fluid Dynamics for Sport Simulation*, 83-102.
- Barber, S., Chin, S.B., Carré, M.J., 2009. Sports ball aerodynamics: A numerical study of the erratic motion of soccer balls. *Computers and Fluids*, 38(6):1091-1109.
- Barkla, H., Auchterlonie, A., 1971, The Magnus or Robins effect on rotating spheres, *Journal of Fluid Mechanics*, 47:437-447 (citado por Lorenz, 2006).
- Carré, M.J., Akatsuka, T., Haake, S.J., 2002. The curve kick of a football II: Flight through the air. *Sports Engineering*, 5:193-200.
- Carré, M.J., Goodwill, S.R., Haake, S.J., 2005. Understanding the effect of seams on the aerodynamics of an association football. *Journal Mechanical Engineering Science, Part C* Vol. 219:657-666.
- Goff, John Eric, Carré, M.J., 2009. Trajectory analysis of a soccer ball. *American Journal of Physics*, 77:1020-7.
- Goodyear, Charles (1836), <http://www.soccerballworld.com/Oldestball.htm>, 24/04/2010
- Lord Rayleigh, 1878, On the irregular flight of the tennis ball. *Mathematical Messenger* 7, 14-16, (citado por Mehta, 2008).
- Lorenz, Ralph D., 2006. 2-Aerodynamics of Balls. *Spinning Flight*. Springer New York, pp.19-22.

Mehta, Rabindra D., 2008. Sport Ball Aerodynamics. *Sport Aerodynamics*, 229-231.

Newton, I., 1672. New theory of light and colours. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, 80:3075–3087 (citado por Barber et al, 2009).

Anexo A: Critérios de avaliação de qualidade das bolas de futebol da FIFA (retirado de www.fifa.com)

Actualmente a FIFA tem dois critérios de avaliação das bolas de futebol, o “FIFA INSPECTED” e o “FIFA APPROVED”. Ambos têm as mesmas condições de avaliação, sendo que no “FIFA APPROVED” a avaliação é feita sob condições mais rigorosas. Para passar a aprovação de qualquer uma destas avaliações é necessário que a avaliação na bola passe aos seis testes exigidos pela FIFA (no caso da “FIFA APPROVED” são sete):

- Circunferência consistente – Para uma bola de tamanho normal com uma pressão insuflada de 0,8 bar, o diâmetro é medido em 16 pontos e o perímetro calculado aritmeticamente de modo a garantir consistência, este perímetro da bola deverá ser:
 - “FIFA APPROVED”: 68,5 cm – 69,5 cm
 - “FIFA INSPECTED”: 68,0 cm – 70,0 cm
- Redondeza permanente – A partir do cálculo do diâmetro médio dos 16 pontos referidos anteriormente, é feita uma diferença entre esse diâmetro médio e o diâmetro individual de cada ponto, sendo que essa diferença percentual não poderá exceder os seguintes valores percentuais:
 - “FIFA APPROVED”: Máximo 1,5%
 - “FIFA INSPECTED”: Máximo 2%
- Repique uniforme – Este teste verifica a elasticidade da bola, na qual a bola é largada de uma altura de dois metros batendo numa placa de metal e medido o ressalto através de uma régua vertical. O espaço onde é efectuado o teste está sob condições de temperatura controlada, na qual é necessário o ressalto não exceder um valor de 10 cm do valor anterior. Para as temperaturas indicadas as seguintes o intervalo de alturas tem de ser:
 - “FIFA APPROVED”: T=20° C: 135-155 cm, T=5° C: no mínimo 125 cm
 - “FIFA INSPECTED”: T=20° C: 125-155 cm, T=5° C: no mínimo 115 cm
- Absorção mínima de água – Neste teste é necessário garantir que a bola absorva o mínimo de água possível, isto é feito mergulhando a bola num tanque com 2 cm de água e através de um sistema mecânico comprime a bola 250 vezes com rotação constante da mesma durante a compressão, sendo os valores admitidos de absorção os seguintes:

- “FIFA APPROVED”: A média da água absorvida admitida é de 10% do seu peso inicial e a água absorvida por bola não deverá exceder os 15% do seu peso.
- “FIFA INSPECTED”: A média da água absorvida admitida é de 15% do seu peso inicial e a água absorvida por bola não deverá exceder os 20% do seu peso.
- Peso – Neste teste a bola é pesada três vezes num compartimento fechado e os pesos devem se encontrar nos dentro destes limites:
 - “FIFA APPROVED”: 420-445 gramas
 - “FIFA INSPECTED”: 410-450 gramas
- Perda de pressão – Neste ensaio, a bola é insuflada até a uma pressão de 1 bar na qual é deixada durante 72 horas e verificada a perda máxima, sendo os valores máximos admitidos pela FIFA:
 - “FIFA APPROVED”: Máximo 20%
 - “FIFA INSPECTED”: Máximo 25%
- Retenção da forma e do tamanho: Este teste é só aplicável às bolas de qualidade “FIFA APPROVED” na qual a bola é disparada 2000 vezes contra um painel de aço a aproximadamente 50 km/h (≈ 14 m/s) e a 2,5 metros do local de disparo e da placa, sendo que após este teste a bola não deverá exceder os seguintes valores:
 - “FIFA APPROVED”: Aumento do perímetro – no máximo 1,5 cm, desvio da esfericidade – no máximo 1,5%, variação da pressão – no máximo 0,1 bar.

Anexo B: Tabela de resultados para a velocidade da bola de 15 m/s

Tabela 5 – Resultados da Esfera com $\varepsilon = 3,3 \times 10^{-4}$ m e da bola de futebol sem rugosidade

Sp	Esfera com $\varepsilon = 3,3 \times 10^{-4}$ m				Bola de futebol sem rugosidade			
	C _L	C _D	F _L (N)	F _D (N)	C _L	C _D	F _L (N)	F _D (N)
0	0	0,122	0	0,665	0	0,111	0	0,601
0,1	0,017	0,123	0,094	0,665	0,035	0,113	0,192	0,613
0,2	0,047	0,127	0,258	0,688	0,093	0,125	0,505	0,680
0,3	0,079	0,135	0,427	0,733	0,124	0,140	0,675	0,760
0,4	0,108	0,149	0,588	0,808	0,157	0,160	0,853	0,868

Anexo C: Contornos dos coeficientes de pressão para a velocidade da bola $v=15$ m/s

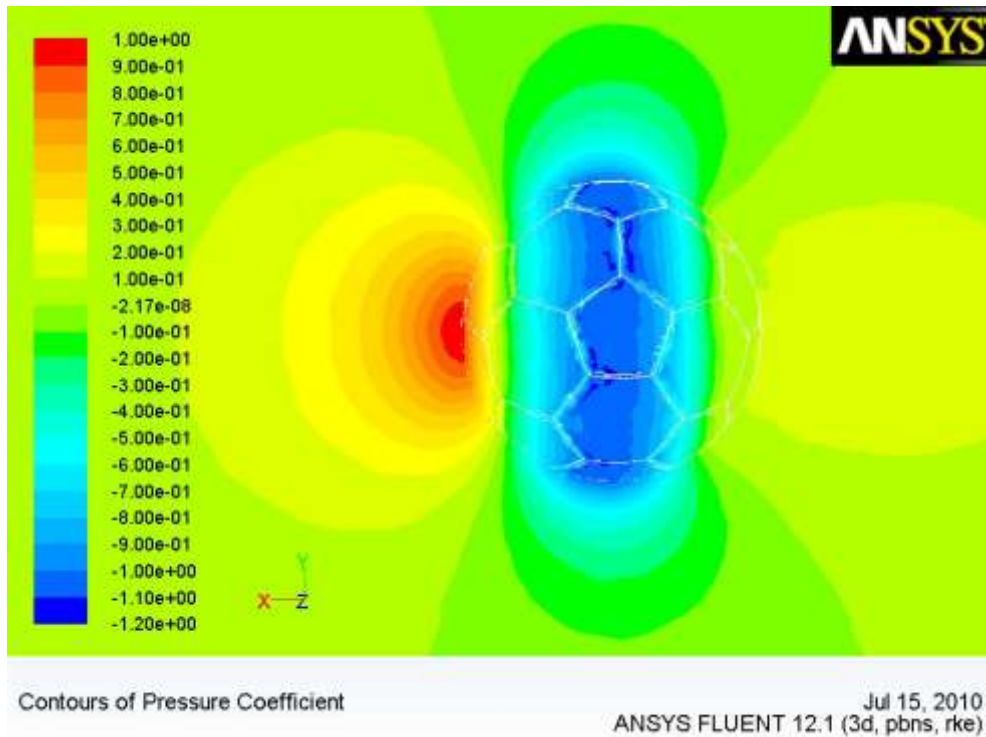


Figura 37 - Contornos do coeficiente de pressão para a bola de futebol sem rotação com a velocidade da bola $v=15$ m/s.

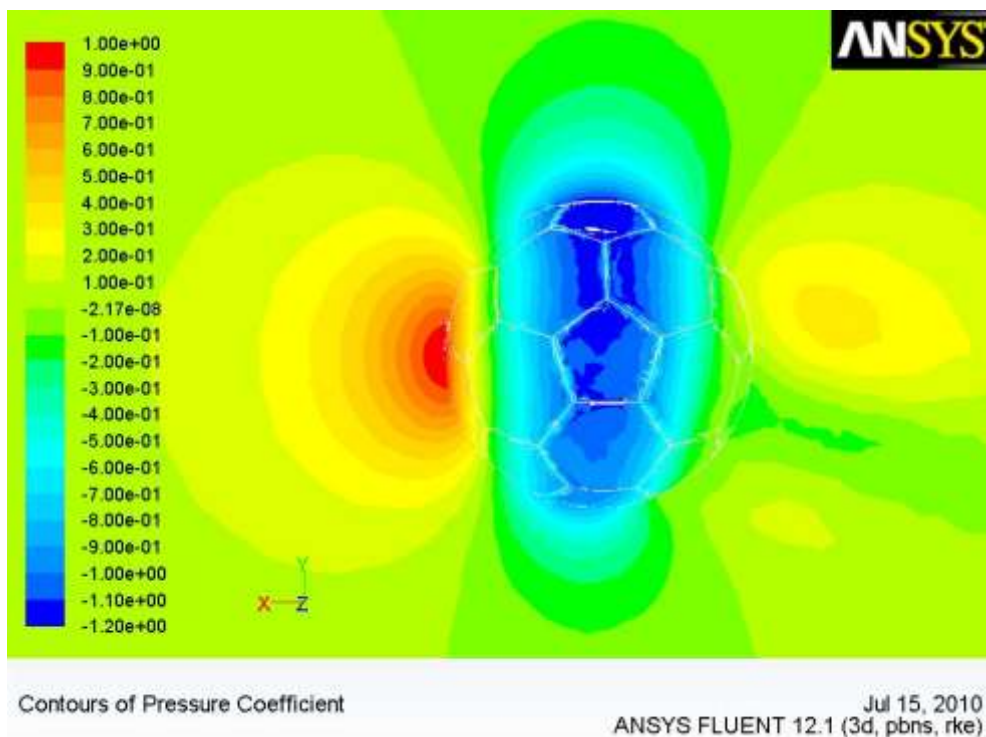


Figura 38 - Contornos do coeficiente de pressão para a bola de futebol com rotação $\omega=54,5$ rad/s (520 rpm) e velocidade da bola $v=15$ m/s.