



**NOVA**  
NOVA SCHOOL OF  
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA E INDUSTRIAL

PAULO MANUEL DUARTE SANTOS

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA MINIMIZAÇÃO DO ERRO DA PRESSÃO ESTÁTICA MEDIDA NA TOMADA DO TECNAM P2008

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa  
Setembro, 2022





# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA MINIMIZAÇÃO DO ERRO DA PRESSÃO ESTÁTICA MEDIDA NA TOMADA DO TECNAM P2008

**PAULO MANUEL DUARTE SANTOS**

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Orientadora:** Diana Filipa da Conceição Vieira,  
Professora Auxiliar Convidada, Universidade NOVA de Lisboa

**Júri:**

**Presidente:** Luís Miguel Chagas Costa Gil  
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

**Arguentes:** Daniel Cardoso Vaz,  
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

**Orientador:** Diana Filipa da Conceição Vieira,  
Professor Auxiliar Convidada, FCT-NOVA



**Simulação numérica da minimização do erro da pressão estática medida na tomada do tecnam P2008**

Copyright © Paulo Manuel Duarte Santos, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Quando ingressei no mestrado integrado em engenharia mecânica na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, nunca pensei que o dia de escrever esta dissertação chegasse tão rápido. Foi um percurso académico cheio de experiências e aprendizagens que irei levar para o resto da vida e que fizeram de mim, de certeza, um ser humano melhor que aquele jovem de 18 anos que iria começar a sua vida universitária e que pouco ou nada sabia da vida.

Primordialmente, agradeço à Professora Doutora Diana Vieira por me ter acompanhado e auxiliado na elaboração desta dissertação, onde sempre se demonstrou responsiva perante as minhas dúvidas que ocorreram durante a elaboração da dissertação. Com certeza, foi graças à sua forma de ensinar, à sua calma e à sua exigência que me levou a conseguir elaborar esta dissertação. Mais uma vez, o meu cândido e sincero agradecimento por todo o esforço e dedicação que incutiu em mim, professora Diana.

Gostaria de agradecer a todos os outros docentes que me acompanharam no decorrer deste percurso académico, pois sem eles não teria chegado a esta etapa final da elaboração da dissertação.

Um muito obrigado à FCT-UNL que sempre me recebeu de braços abertos e que muito possibilitou o meu sucesso durante este percurso académico.

À minha família que sempre desde cedo incutiu os valores corretos para me tornar num Homem íntegro e generoso, e que me permitiu chegar até onde hoje estou.

À Margarida, que acompanhou todo o meu percurso na faculdade, e que sempre esteve lá para me apoiar nos momentos menos bons e para me felicitar e congratular nas minhas vitórias.

A todos os meus amigos, que foram fulcrais para o meu sucesso académico, e que estiveram sempre comigo tanto nos momentos de evasão da vida académica como nos momentos de estudo, e que foram medulares na harmonia da minha vida, um enorme agradecimento.



“Once you have tasted flight, you will forever walk the earth with your eyes turned skyward. For there you have been, and there you will always long to return.” (Leonardo da Vinci).



## RESUMO

Nesta dissertação foi estudada o efeito e importância que as tomadas de pressão estática têm na diminuição de pressão dinâmica medida na linha de pressão estática. As tomadas de pressão estática que serão estudadas fazem parte do avião Tecnam P2008, que se enquadra na gama de aviões ligeiros.

Desta forma, foram efetuadas simulações numéricas com o auxílio do software denominado *Ansys Fluent*, que permitiram a obtenção de *pathlines* e *contours* acerca da distribuição da pressão dinâmica e da magnitude de vorticidade ao redor das tomadas de pressão estática.

Com isto, nesta dissertação foram estudados dois *designs* distintos de tomadas de pressão estática, ambas presentes na fuselagem do Tecnam P2008. Através disto foi possível averiguar qual dos dois *designs* de tomada de pressão estática foi o mais eficaz na prevenção da entrada de pressão dinâmica na linha de pressão estática.

Os resultados foram analisados após a verificação e validação do modelo numérico através de referências bibliográficas. Esta análise contém gráficos de distribuição de pressão dinâmica e de magnitude de vorticidade, sendo os gráficos de dois tipos: *contours* e *pathlines*. Posteriormente foi efetuada uma comparação de resultados obtidos consoante o incremento de velocidade, e outra comparação dos resultados obtidos entre cada tomada de pressão estática.

As conclusões obtidas permitiram apurar qual dos *designs* de tomada de pressão estática foi o mais eficaz na prevenção de entrada de pressão dinâmica na linha de pressão estática, sendo a mesma a tomada de pressão estática nº2 e permitiram concluir que ambos os *designs* de tomada de pressão estática contribuem para a diminuição de entrada de pressão dinâmica.

**Palavras chave:** Tomadas de pressão estática, pressão dinâmica, Ansys Fluent, simulação numérica, magnitude de vorticidade



## ABSTRACT

In this dissertation the effect and importance that static pressure ports have in the decrease of dynamic pressure measured in the static pressure line was studied. The static pressure ports that will be studied are part of the Tecnam P2008 aeroplane, which fits in the range of light aeroplanes.

In this way, numerical simulations were performed with the aid of the software called Ansys Fluent, which allowed obtaining pathlines and contours about the dynamic pressure distribution and the vorticity magnitude around the static pressure ports.

With this, in this dissertation, two different designs of static pressure ports were studied, both present in the fuselage of the Tecnam P2008. Through this it was possible to ascertain which of the two static pressure ports designs was the most effective in preventing dynamic pressure ingress into the static pressure line.

The results were analysed after verification and validation of the numerical model using literature references. This analysis contains graphs of dynamic pressure distribution and vorticity magnitude, being the graphs of two types: contours and pathlines. Subsequently, a comparison of the results obtained according to the velocity increment was carried out, and another comparison of the results obtained between each static pressure port was made.

The conclusions obtained allowed us to ascertain which of the static pressure ports designs was the most effective in preventing dynamic pressure from entering the static pressure line, this being static port no. 2, and allowed us to conclude that both static pressure port designs contribute to the reduction of dynamic pressure entering.

**Keywords:** Static pressure ports, dynamic pressure, Ansys Fluent, numerical simulation, vorticity magnitude



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação .....	1
1.2	Objetivos .....	3
1.3	Descrição da dissertação.....	5
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
2.1	Sistema pitot-estático.....	7
2.2	Pressão Estática.....	8
2.3	Pressão dinâmica.....	9
2.4	Camada limite.....	9
2.4.1	Placa plana.....	9
2.4.2	Cilindro.....	11
2.5	Geração e desprendimento de vórtices.....	15
<b>3</b>	<b>MODELAÇÃO NUMÉRICA.....</b>	<b>19</b>
3.1	Equações Governativas .....	19
3.1.1	Lei da Conservação da Massa .....	20
3.1.2	Lei da conservação da quantidade de movimento .....	21
3.2	CFD (Computational Fluid Dynamics).....	22
3.3	Turbulência .....	24
3.4	Modelos de turbulência.....	27

3.4.1	Modelo Spalart-Allmaras .....	28
3.4.2	Modelo $k - \epsilon$ .....	28
3.4.3	Modelo $k - \omega$ .....	29
3.5	Modelo de turbulência utilizado neste projeto .....	29
3.6	Malha .....	31
3.6.1	Tipos de Malha .....	32
3.6.2	Qualidade da malha .....	35
3.7	Influência da parede no tratamento da malha em escoamento turbulento .....	37
<b>4</b>	<b>CASO DE ESTUDO</b> .....	<b>43</b>
4.1	Escolha das tomadas em estudo .....	43
4.2	Parâmetros das tomadas de pressão estática .....	45
4.3	Geometria das tomadas de pressão estática .....	46
4.3.1	Tomada de pressão estática nº1 .....	46
4.3.2	Tomada de pressão estática nº2 .....	47
4.4	Domínio Computacional .....	50
4.5	Divisão do domínio computacional .....	51
4.6	Análise da independência da malha .....	55
4.7	Malha .....	58
4.7.1	Malha da tomada de pressão estática nº1 .....	58
4.7.2	Malha da tomada de pressão estática nº2 .....	61
4.8	Condições de simulação e condições de fronteira .....	65
<b>5</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>71</b>
5.1	Verificação de resultados .....	71
5.2	Resultados da tomada de pressão estática nº1 .....	74
5.3	Resultados da tomada de pressão estática nº2 .....	89
5.4	Comparação dos resultados obtidos entre a tomada de pressão estática nº1 e a tomada de pressão estática nº2 .....	106

<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>111</b>
6.1	Síntese da investigação.....	111
6.2	Sugestão para trabalho futuro.....	112
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>115</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Variação da Pressão Estática ao Longo da Fuselagem de um Avião [1].....	2
Figura 2- Posição da Tomada de Pressão Estática num Airbus A320 e num Cessna 152 .....	3
Figura 3-Esquema Pitot-Estático Tecnam P-2008 [2] .....	4
Figura 4- Esquema Pitot-Estática [3] .....	7
Figura 5- Tubo de Pitot do Cessna 172 [4] .....	8
Figura 6- Formação da camada limite numa superfície sólida [5] .....	10
Figura 7- Separação da camada limite [6] .....	11
Figura 8- Variação do número de Reynolds em escoamentos de cilindros circulares sem rugosidade [7].....	13
Figura 9- Escoamento ao redor de um cilindro sem separação das linhas de corrente [8].....	14
Figura 10- Escoamento ao redor de um cilindro com separação das linhas de corrente [8]....	14
Figura 11- Geração e desprendimento de vórtices segundo Gerrard (1966) [7] .....	16
Figura 12- Variação do número de Strouhal com o número de Reynolds [7] .....	17
Figura 13- Processo para a realização de um estudo em CFD [10].....	23
Figura 14- Diferentes regimes no escoamento: regime 1- laminar, regime 2- transição, regime 3- turbulento [11] .....	24
Figura 15- Comparação entre os modelos computacionais RANS, LES e DNS [12] .....	26
Figura 16- Tipos de formas dos elementos numa malha [14].....	32
Figura 17- Malha bidimensional estruturada.....	33
Figura 18- Malha tridimensional estruturada .....	33
Figura 19- Malha não-estruturada [15].....	35
Figura 20- Malha híbrida [16] .....	35
Figura 21- Exemplo ilustrativo do conceito de ortogonalidade [17] .....	36
Figura 22- Exemplo ilustrativo do conceito de alongamento [18] .....	36

Figura 23- Exemplo ilustrativo do conceito de assimetria [17].....	37
Figura 24- Evolução de um escoamento turbulento sobre uma placa plana horizontal [19]...38	
Figura 25-Perfil da velocidade média em camada limite turbulenta [19].....	39
Figura 26- Abordagem para resolver a parede através de wall functions [20].....	40
Figura 27- Abordagem para resolver a parede sem recurso a wall functions [20] .....	40
Figura 28- Aeronave Tecnam P2008 [21] .....	43
Figura 29- Design nº1 da tomada de pressão estática do Tecnam P2008 (tomada nº1).....	44
Figura 30- Design nº2 da tomada de pressão estática do Tecnam P2008 (tomada nº2).....	45
Figura 31- Representação bidimensional da tomada de pressão estática nº1.....	47
Figura 32- Ilustração tridimensional da tomada de pressão estática nº1 .....	48
Figura 33- Representação bidimensional da tomada de pressão estática nº2.....	49
Figura 34- Ilustração tridimensional da tomada de pressão estática nº2 .....	50
Figura 35- Domínio Computacional da tomada de pressão estática nº1.....	51
Figura 36- Domínio Computacional da tomada de pressão estática nº2.....	52
Figura 37- Divisão do domínio computacional da tomada nº1 .....	53
Figura 38- Divisão do domínio computacional da tomada nº1 mais aproximado da zona pretendida para este estudo.....	54
Figura 39- Divisão do domínio computacional da tomada nº2 .....	54
Figura 40- Divisão do domínio computacional da tomada nº2 mais aproximado da zona pretendida para este estudo.....	55
Figura 41- Análise da independência da malha da tomada de pressão estática nº1 .....	57
Figura 42- Análise da independência da malha da tomada de pressão estática nº2 .....	57
Figura 43- Perspetiva da malha gerada da tomada de pressão estática nº1 .....	59
Figura 44- Vista aproximada da zona da tomada de pressão estática nº1 da malha gerada....	59
Figura 45- Pormenor interior da tomada de pressão estática nº1 da malha gerada.....	60
Figura 46- Ortogonalidade da malha da tomada de pressão estática nº1 .....	60
Figura 47- Assimetria da malha da tomada de pressão estática nº1 .....	61
Figura 48- Perspetiva da malha gerada da tomada de pressão estática nº2 .....	62
Figura 49- Vista aproximada da zona da tomada de pressão estática nº2 da malha gerada...63	
Figura 50- Pormenor interior da tomada de pressão estática nº2 da malha gerada.....	63
Figura 51- Ortogonalidade da malha da tomada de pressão estática nº2 .....	64
Figura 52- Assimetria da malha da tomada de pressão estática nº2 .....	64
Figura 53- Vista da condição de fronteira do inlet da tomada de pressão estática nº1.....	66
Figura 54- Vista da condição de fronteira outlet da tomada de pressão estática nº1 .....	66

Figura 55- Vista da condição de fronteira wall da tomada de pressão estática nº1 .....	67
Figura 56- Vista da condição de fronteira "tomada" da tomada de pressão estática nº1 .....	67
Figura 57- Vista da condição de fronteira inlet da tomada de pressão estática nº2 .....	68
Figura 58- Vista da condição de fronteira outlet da tomada de pressão estática nº2 .....	68
Figura 59- Vista da condição de fronteira wall da tomada de pressão estática nº2 .....	69
Figura 60- Vista da condição de fronteira "tomada" da tomada de pressão estática nº2 .....	69
Figura 61- Escala de resíduos da tomada de pressão estática nº1 (50m/s).....	73
Figura 62- Escala de resíduos da tomada de pressão estática nº2 (50m/s).....	73
Figura 63- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s.....	74
Figura 64- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s .....	75
Figura 65- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s.....	75
Figura 66- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s .....	75
Figura 67- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s .....	76
Figura 68- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s .....	76
Figura 69- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s.....	76
Figura 70- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s.....	77
Figura 71- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s.....	77
Figura 72- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s.....	77
Figura 73- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s .....	78
Figura 74- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s.....	78
Figura 75- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s .....	78

Figura 76- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s .....	79
Figura 77- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s .....	79
Figura 78- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s.....	79
Figura 79- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s.....	80
Figura 80- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s.....	80
Figura 81- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s.....	80
Figura 82- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s .....	81
Figura 83- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s.....	81
Figura 84- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s .....	81
Figura 85- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s .....	82
Figura 86- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s .....	82
Figura 87- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s.....	82
Figura 88- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s.....	83
Figura 89- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s.....	83
Figura 90- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s.....	84
Figura 91- - Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s.....	84
Figura 92- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s.....	84

Figura 93- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s .....	85
Figura 94- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s .....	85
Figura 95- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s .....	85
Figura 96- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s.....	86
Figura 97- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s.....	86
Figura 98- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s.....	86
Figura 99- Comparação da distribuição da pressão dinâmica na tomada de pressão estática nº1 nas simulações de 50 m/s (esquerda) e 80 m/s (direita) para a tomada de pressão estática nº1 .....	87
Figura 100- Comparação da bolha de recirculação e da esteira deixada na simulação de 50 m/s (esquerda) e 80 m/s (direita) para a tomada de pressão estática nº1 .....	88
Figura 101- Comparação da vorticidade deixada na simulação de 50 m/s (esquerda) e 80 m/s (direita) para a tomada de pressão estática nº1 .....	89
Figura 102- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s.....	90
Figura 103- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s .....	90
Figura 104- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão .....	90
Figura 105- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s .....	91
Figura 106- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s .....	91
Figura 107- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s .....	91
Figura 108- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s.....	92

Figura 109- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s .....	92
Figura 110- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s.....	92
Figura 111- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s.....	93
Figura 112- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s .....	93
Figura 113- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s.....	94
Figura 114- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s .....	94
Figura 115- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s.....	94
Figura 116- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s .....	95
Figura 117- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s.....	95
Figura 118- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s .....	95
Figura 119- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s.....	96
Figura 120- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s.....	96
Figura 121- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s .....	97
Figura 122- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s.....	97
Figura 123- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s .....	97
Figura 124- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s .....	98
Figura 125- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s .....	98

Figura 126- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s.....	98
Figura 127- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s.....	99
Figura 128- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s.....	99
Figura 129- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s.....	100
Figura 130- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s.....	100
Figura 131- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s.....	100
Figura 132- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s.....	101
Figura 133- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s.....	101
Figura 134- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s.....	101
Figura 135- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s.....	102
Figura 136- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s.....	102
Figura 137- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s.....	102
Figura 138- Comparação da distribuição da pressão dinâmica na tomada de pressão estática nº2 nas simulações de 50 m/s (esquerda) e 80 m/s (direita).....	104
Figura 139- Comparação da bolha de recirculação e da esteira deixada na simulação de 50 m/s (esquerda) e 80 m/s (direita) para a tomada de pressão estática nº2.....	104
Figura 140- Comparação da magnitude de vorticidade na simulação de 50 m/s (esquerda) e 80 m/s (direita) para a tomada de pressão estática nº2.....	105
Figura 141- Comparação entre a distribuição de pressão dinâmica entre a tomada de pressão estática nº1 (tomada de cima) e nº2 (tomada de baixo), para a mesma velocidade de escoamento exterior.....	107

Figura 142- Comparação entre a magnitude de vorticidade entre a tomada de pressão estática nº1 (tomada de cima) e nº2 (tomada de baixo), para a mesma velocidade de escoamento exterior (80m/s).....	108
Figura 143- Novos designs para tomadas de pressão estática .....	113

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Síntese comparativa dos resultados obtidos na tomada de pressão estática nº1 consoante a velocidade .....	87
Tabela 2- Síntese comparativa dos resultados obtidos na tomada de pressão estática nº2 consoante a velocidade .....	103
Tabela 3- Comparação dos resultados obtidos entre as duas tomadas de pressão estática	106



## SIGLAS

<b>CFD</b>	Computer Fluid Dynamics, em português mecânica dos fluidos computacional.
<b>DNS</b>	Direct Numerical Simulation, em português simulação numérica direta.
<b>LES</b>	Large Eddy Simulation, em português simulação de grandes escalas
<b>RANS</b>	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
<b>RSM</b>	Reynolds Stress Models



## SÍMBOLOS

$\rho$	Massa volúmica do fluido [ $Kg/m^3$ ]
$D$	Diâmetro do cilindro [m]
$l$	Comprimento específico [m]
$\delta$	Altura da camada limite [m]
$Re$	Número de Reynolds
$\mu$	Viscosidade dinâmica do fluido [ $Pa \cdot s$ ]
$V_\infty$	Velocidade do escoamento livre [ $m/s$ ]
$p$	Pressão [ $Pa$ ]
$\omega$	Taxa de dissipação específica [ $1/s$ ]
$\varepsilon$	Taxa de dissipação da turbulência [ $m^2/s^3$ ]
$k$	Energia cinética turbulenta [ $J/Kg$ ]
$y^+$	Distância adimensional à fronteira da parede
$Y_k$	Dissipação de $k$
$Y_\omega$	Dissipação de $\omega$
$G_k$	Geração de energia cinética turbulenta
$G_\omega$	Geração de taxa de dissipação específica
$\Gamma_k$	Difusividade de $k$
$\Gamma_\omega$	Difusividade de $\omega$

<b>K</b>	Constante de Von Karman
<b><math>\alpha^*</math></b>	Coeficiente de correção da viscosidade turbulenta
<b><math>\mu_t</math></b>	Viscosidade turbulenta [ $Pa \cdot s$ ]
<b><math>u^+</math></b>	Velocidade adimensional
<b>B</b>	Constante empírica
<b>g</b>	Constante gravítica [ $m^2/s$ ]
<b><math>v_{\infty}</math></b>	Velocidade do escoamento natural não perturbado [m/s]
<b>t</b>	Tempo [s]

# INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Antes de enunciar os objetivos da dissertação final de mestrado, importa realçar qual a relevância em aviões ligeiros de uma boa leitura de pressão na tomada de pressão estática, sendo esta a principal motivação deste projeto. Portanto neste tipo de aeronaves existem seis instrumentos de voo essenciais para desempenhar o voo, três destes são baseados em giroscópios e os outros 3 são baseados em leituras de pressão tanto na tomada de pressão estática como de pressão lida através do tubo de *pitot*.

Estes três instrumentos baseados em leituras de pressão são: o velocímetro ou *air speed indicator* que fornece a velocidade a que o avião se desloca, o altímetro que permite a leitura da altitude a que a aeronave se encontra e por fim o variómetro ou *vertical speed indicator* que proporciona ao piloto a leitura da velocidade a que o avião se encontra a subir ou descer.

Portanto o altímetro funciona através da pressão medida pelas tomadas de pressão estática, pois dentro da sua constituição possui duas cápsulas aneróides que se encontram diretamente conectadas à linha de pressão estática, e que ao serem comprimidas ou descomprimidas irão fornecer ao instrumento a leitura das altitudes, ou seja, à medida que o avião sobe a pressão vai diminuindo fazendo com que estas cápsulas não sejam comprimidas, em oposição quando o avião desce ocorre o processo inverso.

Por sua vez, o variómetro tem um princípio de funcionamento semelhante ao altímetro só que ao invés de possuir duas cápsulas aneróides possui um diafragma ligado também à linha de pressão estática que lê as variações de pressão.

Por fim existe o velocímetro que combina a leitura tanto da tomada de pressão estática como do tubo de *pitot*, ou seja, o tubo de *pitot* fornece a leitura da pressão total onde está

incluída a soma da pressão estática com a pressão dinâmica, e visto que este instrumento se encontra ligado diretamente ao tubo de *pitot* e à linha de pressão estática, o mesmo efetua a diferença entre a pressão total e a pressão estática ficando apenas a pressão dinâmica que irá ditar a velocidade a que o avião se desloca.

A importância de uma boa medição de pressão na tomada de pressão estática está em que todos estes três instrumentos baseados em leituras de pressão possuem o mesmo tipo de erro, no caso o erro de posição da tomada de pressão estática. Sendo assim, esta deverá estar posicionada de modo que a pressão que seja lida naquela tomada apenas seja pressão estática e não pressão dinâmica. Para isso, a tomada de pressão estática tem de estar colocada numa localização da fuselagem onde não seja exercida pressão dinâmica pois caso contrário a tomada de pressão estática estaria a funcionar como uma espécie de "tubo de *pitot*" e iria provocar inúmeros erros na leitura destes três tipos de instrumentos. De modo a contrariar este acontecimento, são efetuados inúmeros testes aquando da conceção da aeronave acerca de uma possível localização da fuselagem que não seja muito solicitada aerodinamicamente. Na generalidade estas tomadas de pressão estática encontram-se a seguir ao nariz das aeronaves perpendiculares ao sentido do escoamento, para assim contrariar a leitura de pressão dinâmica. Abaixo encontra-se uma ilustração (figura 1) da variação da pressão estática ao longo da fuselagem de uma aeronave, bem com a ilustração de tomadas de pressão estática num Airbus A320 e num Cessna 152 (figura2).

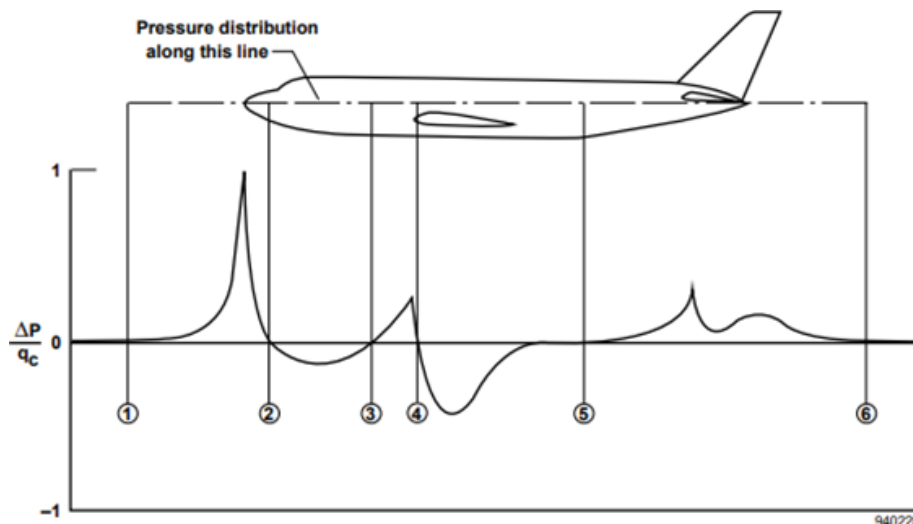


Figura 1- Variação da Pressão Estática ao Longo da Fuselagem de um Avião [1]



Figura 2- Posição da Tomada de Pressão Estática num Airbus A320 e num Cessna 152

Existem inúmeros designs de tomadas de pressão estática para tornar a medição da pressão o mais precisa possível, e nos anos 70 aquando da construção do Cessna 152 criou-se uma anilha ao redor da linha de pressão estática, capaz de reduzir em cerca de 90% a pressão dinâmica sentida ao redor dessa linha de pressão estática provocada por alguma turbulência vinda da hélice, ou pelo deslocamento do ar perpendicular à linha de pressão estática.

## 1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é a realização de simulações numéricas tridimensionais, de forma a estudar o impacto da colisão de um escoamento com velocidade uniforme contra dois designs de tomada de pressão estática do Tecnam P-2008, para assim verificar-se a diminuição da pressão dinâmica que entra na linha de pressão estática através do design da tomada de pressão estática. Os resultados obtidos da simulação serão posteriormente analisados e comparados, de modo a verificar-se qual dos designs de tomada de pressão estática é o mais eficaz na prevenção da entrada de pressão dinâmica na linha de pressão estática.

Nas simulações numéricas irão ser variados os módulos das velocidades a que o escoamento se desloca, porém serão sempre aproximadas às velocidades a que esta aeronave costuma deslocar-se em cruzeiro, sendo estas valores entre os 80 e os 150 nós, valores entre 150 km/h e 285 km/h. No entanto, e visto que estaremos a simular condições de cruzeiro o ângulo de ataque não será variado, sendo este sempre igual a 0 graus.

Os resultados relevantes a obter-se nas simulações serão a magnitude de vorticidade e a pressão dinâmica junto ao "furo" ou linha de pressão estática que se encontra dentro da tomada de pressão estática. Este "furo" em termos práticos será a entrada da linha de pressão

estática que irá fornecer a medida de pressão para depois ser lida pelos instrumentos tal como se verifica pela figura 3, relativa ao sistema pitot-estático do Tecnam P2008.

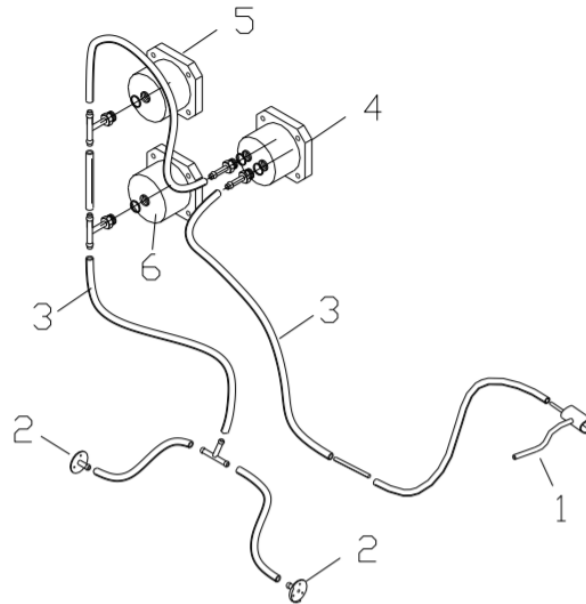


Figura 3-Esquema Pitot-Estático Tecnam P-2008 [2]

As simulações referidas acima serão efetuadas através de um programa de Mecânica dos Fluidos Computacional nomeadamente através do *Ansys Fluent*, que utiliza o método de volumes finitos como modelo de discretização.

## 1.3 Descrição da dissertação

Ao longo desta dissertação foram escritos 6 capítulos mais o capítulo respeitante às referências bibliográficas.

O primeiro capítulo foi escrito com o intuito de abordar os objetivos pretendidos para a elaboração desta dissertação bem como as motivações que levaram à elaboração da mesma.

No segundo capítulo é efetuada uma revisão bibliográfica acerca dos fundamentos teóricos importantes e relativos para a elaboração desta dissertação tais como: o sistema pitot-estático, o conceito de camada limite e por fim é tratado também a geração e desprendimento de vórtices.

Ao longo do terceiro capítulo são expostos os conceitos teóricos relativos à modelação numérica a ser utilizada nesta dissertação, onde são descritas as equações governativas, os vários modelos de turbulência incluindo o modelo de turbulência utilizado nesta dissertação e por fim é exposto o tipo de malha que é utilizado para este projeto, bem como a influência da parede no tratamento da malha.

Em relação ao quarto capítulo é analisado o caso de estudo para esta dissertação, onde são descritos os parâmetros e as geometrias das tomadas de pressão estática a serem tratadas nesta dissertação. É exposto também o domínio computacional e a sua divisão para esta modelação, onde são definidas todas as condições de fronteira e de simulação do mesmo. Por fim é efetuada também uma análise da independência da malha.

No quinto capítulo é efetuada a análise dos resultados obtidos aquando da execução das simulações. Primeiramente, é validado e verificado o modelo numérico e posteriormente são comparados os resultados obtidos entre as duas tomadas bem como os resultados obtidos consoante o incremento da velocidade, de modo a verificar-se a influência do aumento da pressão dinâmica em cada tomada de pressão estática.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas com a realização desta dissertação bem como sugestões para um trabalho futuro relacionado com esta dissertação.

No sétimo e último capítulo são exibidas todas as referências bibliográficas utilizadas ao longo da elaboração desta dissertação.



## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sistema pitot-estático

O sistema pitot-estático inclui diversos componentes: um tubo de pitot e uma ou mais tomadas de pressão estáticas dispostas ao longo da aeronave. Posteriormente existem condutas associadas ao tubo de pitot e às tomadas de pressão que conduzem as pressões capturadas por esses dispositivos até ao velocímetro, variómetro e altímetro, onde de seguida esses instrumentos após receberem essas pressões traduzem as mesmas na medida pretendida a que o instrumento em questão fornece. A figura 4 representa um esquema explicativo do supramencionado acima.

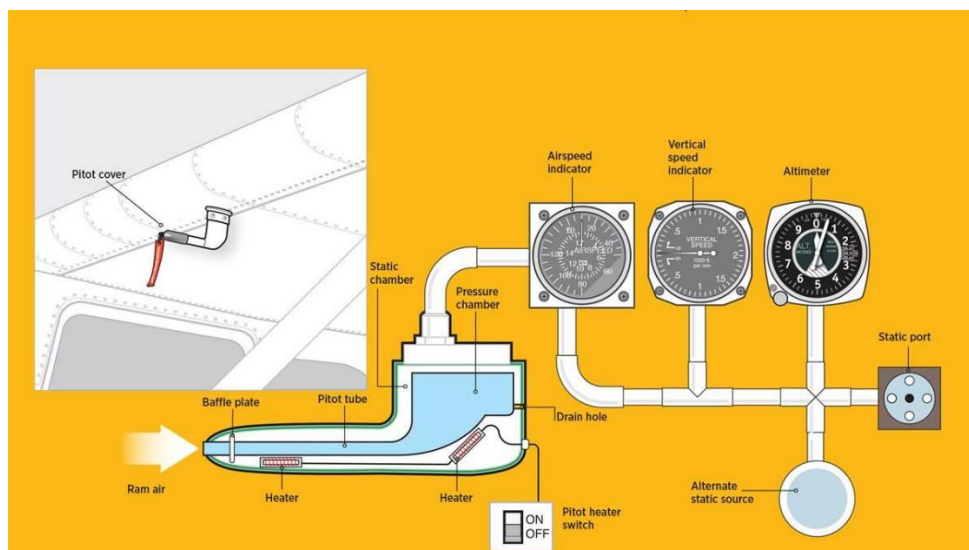


Figura 4- Esquema Pitot-Estática [3]

Antes de se iniciar qualquer voo, é obrigatório verificar o tubo de pitot e as portas de pressão estáticas para garantir que não há bloqueios dentro desses componentes, porque a presença de areias ou pequenos insetos irão impedir com que o tubo de pitot e as portas de pressão estática desempenhem a sua função, traduzindo-se assim em erros na velocidade a que o avião se desloca e na altura a que o avião se encontra conduzindo assim a que possam ocorrer anomalias durante o voo.

O tubo de pitot encontra-se usualmente montado na asa do avião ou então ao longo da fuselagem da aeronave, porém visto que esta dissertação se foca em aviação ligeira normalmente os tubos de pitot encontram-se debaixo da asa como a figura 5 demonstra. Esta orientação do tubo de pitot deve-se a que o mesmo quer-se localizado contra o escoamento oposto ao deslocamento do avião, e através de um pequeno orifício localizado na extremidade do tubo de pitot entra a pressão total resultante do deslocamento da aeronave ao longo do escoamento. No entanto as tomadas de pressão estática encontram-se ao longo da fuselagem em áreas aerodinamicamente pouco solicitadas.



Figura 5- Tubo de Pitot do Cessna 172 [4]

## 2.2 Pressão Estática

Um fluido exerce uma pressão igual em todas as direções num certo ponto devido ao peso causado justamente por essa coluna de fluido, essa pressão denomina-se pressão

estática. Esta pressão resulta do peso das moléculas desse fluido. No caso da pressão estática do ar, esta diminui à medida que a altitude aumenta sendo assim a razão pela qual quando a pressão está mais baixa ao redor da aeronave o altímetro irá traduzir uma altitude mais elevada.

O nome deste tipo de pressão implica que não há envolvimento na medição desta pressão com o movimento da aeronave. Esta medição é efetuada através de uma tomada (pequeno furo) virada para um ângulo reto (90°) ao escoamento de ar. Usualmente e como referido encontra-se na fuselagem, mas por vezes poderá ser encontrada no tubo de pitot.

## 2.3 Pressão dinâmica

De forma geral, a pressão é uma medida de força exercida por unidade de área. O termo pressão dinâmica (por vezes denominada pressão de velocidade) está associado ao escoamento de fluidos e ao efeito do Bernoulli descrito pela equação 2.1.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (2.1)$$

Este efeito provoca a diminuição da pressão do fluido (pressão estática) em regiões onde a velocidade do fluxo é aumentada.

## 2.4 Camada limite

### 2.4.1 Placa plana

Aquando da ocorrência de um escoamento de um fluido sobre uma superfície plana sólida, observa-se que as partículas desse fluido que se encontram a escoar paralelamente a essa superfície plana aderem-se à mesma. Verifica-se também que com o aumento da velocidade, desde zero até ao valor da velocidade do escoamento exterior, irá ser formada uma camada estreita. Portanto, denota-se então que nesta camada as forças viscosas tomam um papel fundamental, pois desaceleram as partículas do fluido a escoar sobre a parede até ser atingido o completo repouso das mesmas junto à parede, sendo então esta camada estreita como referida acima denominada de camada limite.

Assim sendo, através do conceito de camada limite, o estudo do campo de escoamento de fluidos pode ser dividido em dois espaços independentes, sendo o primeiro o campo junto

às superfícies planas sólidas onde atuam as forças viscosas (camada limite) e o segundo na região que se encontra distante da superfície sólida, onde as forças viscosas não exercem qualquer tipo de ação, nesta região referida o escoamento considera-se natural não perturbado.

A figura 6 representa a formação da camada limite numa superfície plana sólida, onde na parte superior da sua superfície encontra-se um escoamento de um fluido com velocidade constante  $v_0$  e o ângulo de ataque nulo em oposição a velocidade do escoamento natural não perturbado encontra-se representado por  $v_\infty$ .

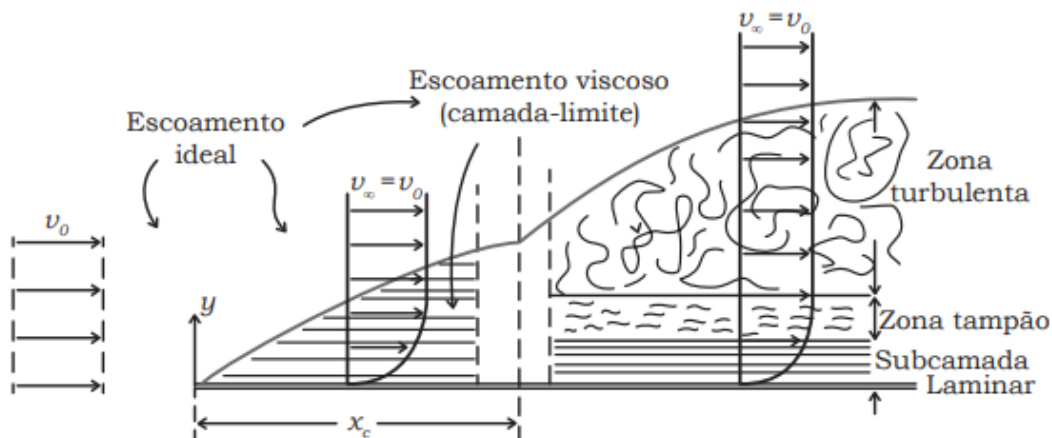


Figura 6- Formação da camada limite numa superfície sólida [5]

Considerando que no escoamento natural não perturbado as linhas de corrente são paralelas à parede e desprezando a coordenada  $y$  da velocidade de  $v_\infty$  teremos então  $v_\infty = v_0$ , o que significa que o escoamento em causa se encontra em regime laminar, no entanto após percorrida uma certa distância denominada de componente crítica ou  $x_c$ , a camada limite entra num regime denominado regime de transição onde a mesma passa a conter além de uma região laminar, uma região turbulenta. Após percorrida essa distância  $x_c$  a camada limite na sua maioria da espessura torna-se bastante turbulenta. Importa realçar que a camada limite nas zonas próximas ao bordo de ataque é sempre laminar. De salientar também que, para valores baixos de  $v_0$  a camada limite pode ser laminar ao longo de toda a sua extensão.

A extensão da camada limite está diretamente relacionada com o número de *Reynolds*,  $Re$ , que representa a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas tal como *Prandtl* referiu em 1904, essa relação pode ser representada pela equação 2.2.

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (2.2)$$

Portanto, para baixos valores de números de *Reynolds* existirá uma maior preponderância das forças viscosas ficando assim mais extensa a zona da camada limite, no entanto em contradição para valores elevados de número de *Reynolds* as forças de inércia terão maior presença o que conduz à existência de apenas camada limite junto às superfícies sólidas.

Em relação à espessura da camada limite esta é fortuita pois apenas só se consegue atingir um valor aproximado da mesma. Porém a espessura da mesma pode ser definida através da distância entre as coordenadas onde  $y = 0$  e  $v = 0$  até à coordenada  $y = \delta$  quando  $v = 0,99v_{\infty}$ .

Por outro lado, a camada limite também se pode separar devido à ocorrência de uma modificação na geometria da superfície sólida ou então através da existência de um gradiente de pressão adverso. A separação da camada limite através da existência do gradiente nomeado anteriormente, prende-se no facto de que quando o gradiente do escoamento natural é positivo isto provoca com que a pressão num certo ponto seja inferior à de outro ponto imediatamente a jusante, agindo assim contra o sentido de inércia do escoamento. Evidentemente este acontecimento não beneficia o escoamento do fluido, criando-se assim um escoamento de retorno que irá levar à separação do mesmo. O ponto de separação deste escoamento é definido quando o gradiente da velocidade normal à parede da superfície plana é nulo. Abaixo encontra-se uma ilustração (figura 7) exemplificativa desta separação da camada limite.

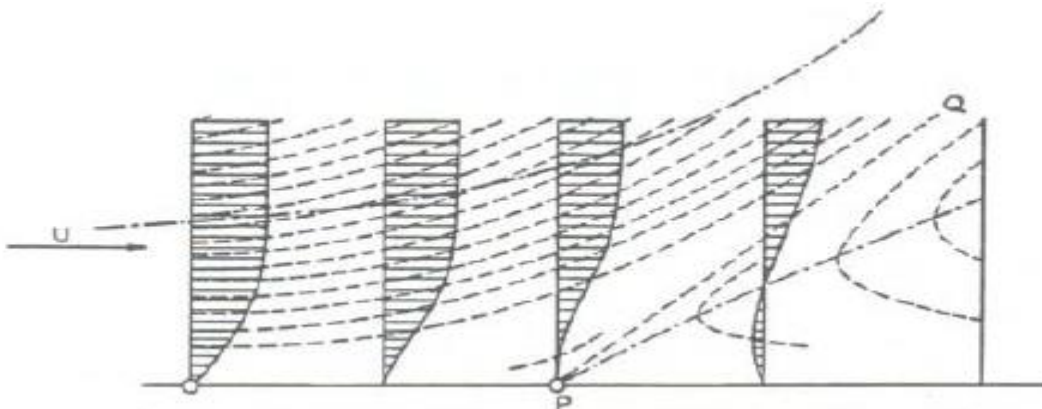


Figura 7- Separação da camada limite [6]

## 2.4.2 Cilindro

No caso de um escoamento ao redor de um cilindro aquando comparado com um escoamento de uma superfície plana sólida, o primeiro apresenta uma atuação díspar. Portanto através dos estudos acerca de escoamentos ao redor de cilindros efetuados por *Sumer* em

1997, o mesmo verificou que para números de *Reynolds* entre 5 e 40 é formada uma bolha de recirculação a jusante do cilindro, porém para números de Reynolds de ordem superior a  $10^5$  o escoamento começa a separar-se da parede do cilindro conduzindo a que as linhas de corrente do escoamento não adiram mais à parede circular do cilindro e que se assim se comece a formar uma esteira a jusante do cilindro. Esta esteira é gerada através do aparecimento de pressões substancialmente diminutas que conduzem à formação de uma força no sentido contrário ao movimento do escoamento, esta é denominada por arrasto de pressão; obviamente que outra razão que conduz à formação desta esteira é a carência de quantidade de movimento.

A figura 8 ilustra como o escoamento ao redor de um cilindro sem rugosidade varia consoante o número de Reynolds, desde números de Reynolds bastante baixos onde não ocorre separação de escoamento até números de Reynolds bastante elevados onde se forma uma esteira.





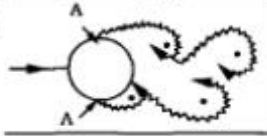

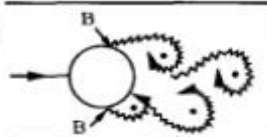


a)		No separation. Creeping flow	$Re < 5$
b)		A fixed pair of symmetric vortices	$5 < Re < 40$
c)		Laminar vortex street	$40 < Re < 200$
d)		Transition to turbulence in the wake	$200 < Re < 300$
e)		Wake completely turbulent. A: Laminar boundary layer separation	$300 < Re < 3 \times 10^5$  Subcritical
f)		A: Laminar boundary layer separation B: Turbulent boundary layer separation; but boundary layer laminar	$3 \times 10^5 < Re < 3.5 \times 10^5$ Critical (Lower transition)
g)		B: Turbulent boundary layer separation; the boundary layer partly laminar partly turbulent	$3.5 \times 10^5 < Re < 1.5 \times 10^6$  Supercritical
h)		C: Boundary layer comple- tely turbulent at one side	$1.5 \times 10^6 < Re < 4 \times 10^6$ Upper transition
i)		C: Boundary layer comple- tely turbulent at two sides	$4 \times 10^6 < Re$ Transcritical

Figura 8- Variação do número de Reynolds em escoamentos de cilindros circulares sem rugosidade [7]

Como se verifica pela figura 8 disposta acima, existem alguns fatores capazes de alterar a formação de uma esteira a jusante de um cilindro circular, nomeadamente a rugosidade do mesmo e o número de Reynolds do escoamento a que o cilindro está sujeito. Portanto para baixos números de Reynolds as linhas de corrente atravessam o cilindro sempre aderentes à parede do mesmo devido ao facto que para baixos números de Reynolds as forças viscosas prevalecem sobre as forças de inércia, daí as linhas de corrente serem simétricas quer na parte superior do cilindro quer na parte inferior e também devido à dominância destas forças viscosas a camada limite não sofre qualquer tipo de deslocamento, tal como a figura 9 ilustra.

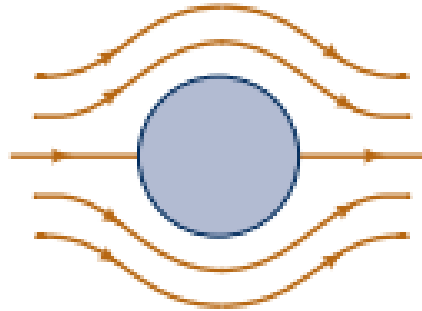


Figura 9- Escoamento ao redor de um cilindro sem separação das linhas de corrente [8]

Por outro lado, com o aumento do número de Reynolds as forças de inércia começam a ter maior predominância sobre as forças viscosas o que vai evidenciar o aumento dos gradientes de velocidade não só devido à diminuição da espessura da região viscosa, porque as forças de inércia já estão em superioridade em relação às forças viscosas, o que conduz ao incremento das tensões de corte viscosas junto à parede circular do cilindro. Tal como nas superfícies planas sólidas, quando as linhas de corrente já não conseguem aderir às paredes do cilindro devido ao gradiente de pressão adverso, ocorre a separação do escoamento tal como evidenciado na figura 10.

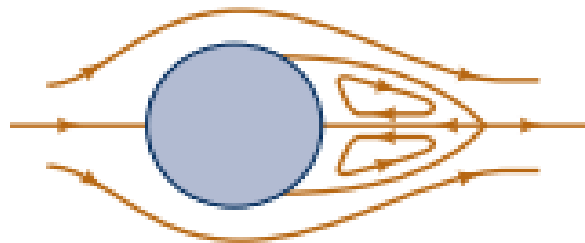


Figura 10- Escoamento ao redor de um cilindro com separação das linhas de corrente [8]

Evidentemente que para maiores números de Reynolds mais turbulência será gerada e, portanto, menos preponderância terão as forças viscosas em detrimento das forças de inércia, formando-se assim as esteiras enunciadas anteriormente a jusante do cilindro que podem conter instabilidades na sua conceção, como vórtices que se irão desprender tanto no lado superior como no lado inferior do cilindro, a este tipo de esteira denomina-se esteira de Von Kármán.

## 2.5 Geração e desprendimento de vórtices

A característica mais importante dos escoamentos descritos acima nomeadamente dos escoamentos exteriores ao redor de cilindros circulares é o fenómeno de geração e desprendimento de vórtices, que começa a tornar-se visível, segundo Sumer [7] a partir de números de Reynolds superiores a 40, onde a camada limite se separa através do gradiente de pressão adverso determinado pelo facto da geometria circular do cilindro ser divergente a jusante.

Este fenómeno de geração e de desprendimentos de vórtices ao longo de escoamento ao redor de cilindros circulares foi amplamente estudado por Gerrard em 1966 [7]. Segundo Gerrard, aquando a formação de vórtices num cilindro, se um desses vórtices for maior que o outro, o maior irá atrair o vórtice oposto, ou seja, supondo que o vórtice obtido na parte superior do cilindro é maior (vórtice A figura 11 a)) que o vórtice obtido na parte inferior (vórtice B figura 11 a)), o vórtice da parte inferior irá ser atraído pelo vórtice da parte superior, devido ao facto de que os dois vórtices contêm vorticidade inversa, ou seja, o vórtice da parte superior terá vorticidade no sentido horário enquanto que o vórtice da parte inferior terá vorticidade no sentido anti-horário. Quando o vórtice B se aproximar do vórtice A irá então cortar a vorticidade do vórtice A, e o mesmo irá se desprender da camada limite o que irá conduzir a que o vórtice A sofra convecção a jusante do escoamento. Após esse desprendimento do vórtice A, irá se formar outro vórtice na mesma posição (vórtice C) onde o vórtice A foi formado, no caso na parte superior do cilindro como se verifica pela figura 11 b), e acontecerá exatamente o mesmo processo referido anteriormente. Portanto o vórtice B irá atrair o vórtice C devido a que agora o vórtice B é maior que o vórtice C recém-formado, pois ambos têm vorticidade oposta, sendo que o vórtice B continua a conter vorticidade no sentido anti-horário enquanto o vórtice C tem vorticidade horária. Através do mesmo raciocínio supramencionado acima o vórtice C irá cortar o fornecimento da vorticidade do vórtice B e o mesmo irá se desprender da camada limite. Este processo de geração e desprendimento de vórtices irá continuar a acontecer sempre que um vórtice se desprenda e irá sempre acontecer de forma alternada entre os lados do cilindro. A esteira será gerada sempre que as duas camadas de corte interajam entre si. Esta metodologia de geração e desprendimento de vórtices encontra-se ilustrada abaixo na figura 11.

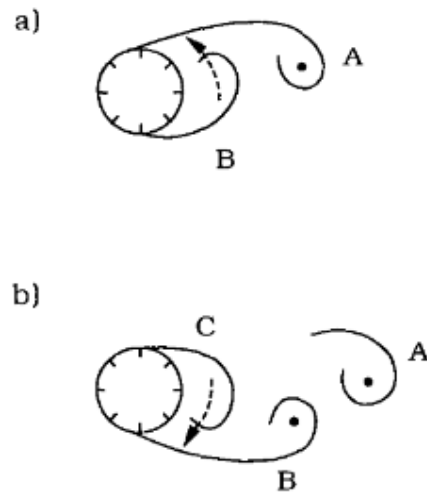


Figura 11- Geração e desprendimento de vórtices segundo Gerrard (1966) [7]

Tal como explicado anteriormente, a geração e o desprendimento dos vórtices é um dos fenômenos mais importantes, e portanto o número de Strouhal,  $St$ , é um número adimensional que representa um quociente entre a frequência de desprendimentos dos vórtices e a velocidade do escoamento livre, pelo diâmetro do cilindro, sendo este um dos parâmetros mais importantes neste tipo de estudo de vórtices. [9]

Como se consegue prever, o número de Strouhal irá ser dependente do número de Reynolds, pois visto que este parâmetro adimensional estuda a frequência do desprendimento do número de vórtices e visto que esse fenômeno é altamente influenciado com o aumento do número de Reynolds, é expectável que o número de Strouhal seja bastante dependente do número de Reynolds. A figura 12 representa a relação existente entre o número de Strouhal e o número de Reynolds.

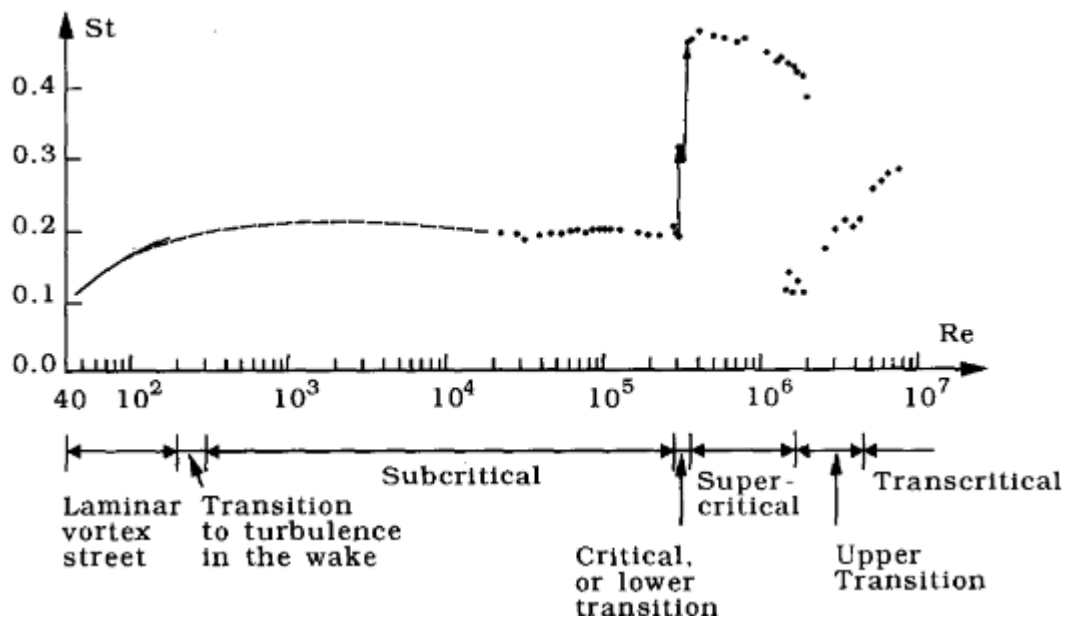


Figura 12- Variação do número de Strouhal com o número de Reynolds [7]

Como se verifica na figura acima, o primeiro desprendimento de vórtices aparece para valores de Reynolds de 40 onde o número de Strouhal é de 0,1, e após esse valor de Reynolds cresce gradualmente até estabilizar para números de Reynolds de 300 até ao regime critico, sendo o número de Strouhal nesse intervalo de cerca de 0,2.



## MODELAÇÃO NUMÉRICA

No presente capítulo irão ser expressos os conceitos teóricos por detrás da modelação numérica em CFD deste projeto. Obviamente, que só através do conhecimento destes fundamentos teóricos das modelações numéricas é que assim se conseguiu dar suporte teórico às decisões tomadas ao longo deste estudo cujo seu foco principal é a Mecânica de Fluidos Computacional (CFD) onde por detrás desta área tão vasta está fortemente presente a modelação numérica.

Portanto importa conhecer todos os fundamentos teóricos existentes da simbiose entre o fluido e a estrutura, sendo o mais importante as equações de Navier-Stokes, que serão descritas posteriormente.

Evidentemente que visto que o projeto a ser tratado ser um projeto com algum tipo de complexidade, de forma a ser estudado em “tempo útil”, recorreu-se à Mecânica de Fluidos Computacional (CFD) que irá resolver e discretizar as equações de Navier-Stokes, através de simulações numéricas.

Nesse sentido, o programa de CFD mais indicado a ser utilizado neste projeto é o *Ansys Fluent* que tem por base a modelação numérica através do método de volumes finitos.

### 3.1 Equações Governativas

De forma a caracterizar a atuação de um fluido sob condições particulares é necessário saber no seu todo o seu número de variáveis dependentes. Normalmente para se analisar o comportamento de um fluido é imprescindível conhecer as suas propriedades ou variáveis inerentes ao mesmo, sendo estas: as componentes do seu vetor velocidade, as suas variáveis termodinâmicas no caso a pressão e a temperatura, a sua propriedade de transporte sendo

esta a viscosidade e por fim importa conhecer a massa volúmica do fluido em causa, que irá definir o fluido como incompressível ou compressível, pois se a massa volúmica não for constante estamos diante um fluido compressível, em oposição estaríamos diante de um fluido incompressível se e apenas se a sua massa volúmica se mantiver constante. Com o intuito de estudar o comportamento de um fluido existem três equações governativas, sendo que uma destas trata-se de uma equação vetorial que se divide em três componentes, ficando assim um total de cinco equações sendo as mesmas:

- Lei da conservação da massa (equação da continuidade)
- Lei da conservação da quantidade de movimento (segunda lei de Newton)
- Lei da conservação da energia

Indubitavelmente, para se conseguir desenvolver e resolver as equações acima é necessário que no seu conjunto existam tantas incógnitas a solucionar como equações para desenvolver, caso contrário não seria possível resolver este tipo de problemas.

No caso do estudo comportamental de escoamentos turbulentos, estes envolvem a resolução de problemas tridimensionais, onde por vezes os mesmos exigem recursos computacionais e recursos temporais bastante elevados. Por essa razão, é necessário recorrer às equações de Reynolds pois as mesmas recorrem ao conceito de média temporal devido a que as componentes médias da velocidade têm a aptidão de desempenhar as equações de movimento para regime turbulento, porém as tensões de Reynolds terão de ser acrescentadas às tensões laminares. No entanto, com a inclusão das tensões de Reynolds irão surgir mais incógnitas o que provoca com que não existam equações suficientes para as conseguir resolver.

Por essa razão, de modo a conseguir-se resolver esse problema surgiram os modelos de turbulência, de forma a complementar as equações em falta. Posteriormente, irá ser abordado alguns modelos de turbulência para as equações governativas do tipo de equações médias de Reynolds com suporte nas equações de Navier Stokes (RANS).

### 3.1.1 Lei da Conservação da Massa

A equação da continuidade ou também conhecida como lei da conservação da massa, é caracterizada pela equação 3.1, aquando referente a uma partícula de um fluido num escoamento:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i) = 0 \quad (3.1)$$

Onde  $\rho$  é a massa volúmica do fluido e  $U_i$  a velocidade do mesmo. A equação descrita e como referida acima, trata uma partícula de um fluido num escoamento, porém trata o fluido de forma compressível. No entanto, e visto que no projeto em estudo trata-se o fluido como incompressível, ou seja, o seu  $\rho$  mantém-se constante, considera-se o quociente  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$  aproximadamente igual a 0, ficando assim a equação diferencial da continuidade para um fluido incompressível em coordenadas cartesianas descrita como a equação 3.2:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

### 3.1.2 Lei da conservação da quantidade de movimento

A lei da conservação da quantidade de movimento ou segunda lei de Newton aplicada para a partícula de um escoamento é uma segunda lei de Newton adaptada para o estudo da mecânica dos fluidos, ou seja, relaciona as grandezas da massa e da aceleração do fluido com as forças externas ao seu redor. No entanto, de forma a equação poder ser simplificada através da substituição entre o tensor das tensões viscosas pela relação entre a tensão e a taxa de deformação para fluidos Newtonianos e isentrópicos, resulta a equação 3.3 de Navier-Stokes para um fluido com viscosidade  $\mu$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (3.3)$$

Dividindo a equação acima descrita nas suas componentes (3.4, 3.5 e 3.6):

**Componente x:**

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

**Componente y:**

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.5)$$

**Componente z:**

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.6)$$

As equações descritas acima são justificadas em qualquer tipo de escoamento com um fluido Newtoniano, e as mesmas demonstram a taxa de variação da quantidade de movimento do fluido, ou seja, relacionam o produto da massa do fluido pela sua correspondente aceleração com a panóplia de forças a que o mesmo se encontra sujeito sendo estas forças viscosas, gravíticas ou até de pressão.

## 3.2 CFD (Computational Fluid Dynamics)

A mecânica dos fluidos computacional ou em inglês Computational Fluid Dynamics consiste em processos matemáticos onde é modelado pelo utilizador um fenómeno físico que envolva um escoamento de um fluido e posteriormente esse problema é resolvido de forma numérica através do poder computacional disponível pelo utilizador.

Tal como referido anteriormente, para se resolver um problema em CFD são necessárias duas fases, a primeira fase trata-se da fase da modelação onde o utilizador formula o seu problema aplicado e adaptado para a forma matemática, já a segunda fase trata das construções das malhas necessárias para uma boa abordagem para a resolução do problema, da definição dos parâmetros numéricos e por fim a segunda fase contém também os métodos de discretização necessários para a resolução do problema.

Para cada problema físico onde se utilize o CFD para solucionar o mesmo, é necessário um modelo matemático e um método numérico para analisar o tipo de escoamento do fluido a tratar. Nomeadamente, as equações de Navier-Stokes correspondem ao modelo matemático que será utilizado na resolução dos problemas que envolvam CFD, pois essas equações acima supramencionadas relacionam as mudanças nas propriedades físicas do fluido bem como nas suas transferências de calor. No entanto, o modelo matemático pode variar consoante o caso que se pretenda tratar com CFD, por exemplo o modelo matemático para problemas que envolvam transferências de calor será diferente do modelo matemático onde sejam estudadas transferências de massa ou mudanças de fase.

Obviamente, de forma a se conseguir obter bons resultados quando se trabalha em CFD, é de extrema importância verificar se o modelo matemático se enquadra ou não para o tipo

de problema a tratar, caso contrário as conclusões que poderão ser retiradas estarão incorretas e fora de contexto, para além disso aliado a uma boa escolha de um modelo matemático apropriado é necessário também a determinação de métodos numéricos adequados de forma a que a solução seja o mais exata e precisa possível. A análise em CFD é de extrema importância pois não só é uma forma bastante sustentável de estudar um produto ou um problema físico, pois também através desta ferramenta o número de protótipos físicos a ser utilizado para um estudo a este nível torna-se bastante reduzido graças ao CFD.

Neste projeto a ferramenta de CFD que será utilizada será o *Ansys Fluent*, que tem como suporte o método dos volumes finitos. Visto que o programa a ser utilizado utiliza este tipo de método de resolução, o domínio computacional terá de ser dividido de forma a ocorrer uma melhor discretização para assim serem obtidos melhores resultados nas simulações numéricas que recorrem de processos iterativos onde resulta a convergência dos resultados. Posteriormente, após efetuadas as simulações onde as iterações tenham convergido, retira-se então os resultados para assim se chegar a conclusões de modo a comparar com o problema real. Evidentemente que CFD não será a única forma para resolver problemas relacionados com a mecânica dos fluidos, porém é a forma mais eficaz, rentável e barata de resolver problemas com alguma complexidade, pois se os mesmos fossem resolvidos de forma experimental consumiriam quer mais recursos financeiros como mais recursos temporais. A figura 13 ilustra uma representação acerca do processo que envolve um estudo em CFD.

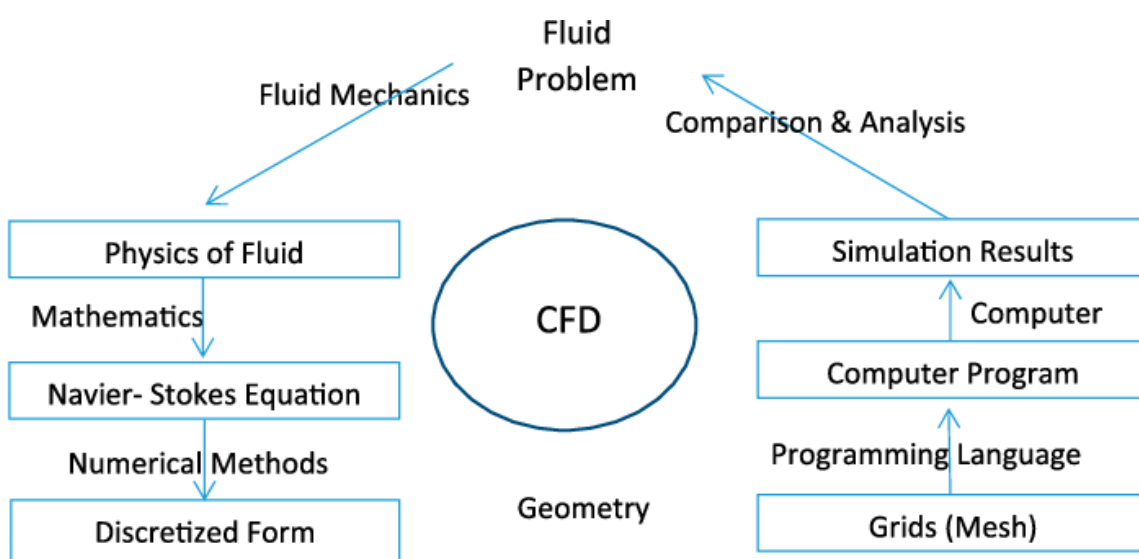


Figura 13- Processo para a realização de um estudo em CFD [10]

### 3.3 Turbulência

Aquando do estudo comportamental de um escoamento do fluido, um dos parâmetros mais importante no estudo dos escoamentos é sem dúvida a que nível de turbulência é que esse escoamento está enquadrado. Tal como referido anteriormente neste projeto, um escoamento para se tornar turbulento tem de passar por algumas fases, sendo estas: o regime laminar, o regime de transição e por fim o regime turbulento.

Começando pelo regime laminar, onde as partículas do fluido deslocam-se sempre em camadas ou linhas de corrente paralelas pois a agitação do escoamento é mínima ou mesmo nula, daí não existir misturas nas linhas de corrente. Quando um escoamento entra em regime de transição, começa a existir pequenas perturbações ou flutuações no escoamento dito em regime laminar, no entanto essas perturbações não são consideráveis para tornar esse escoamento turbulento. Todavia, quando as perturbações já são suficientemente consideráveis para alterar o comportamento do escoamento, o mesmo entra em regime turbulento, onde as partículas desse fluido começam a deslocar-se de forma desordenada, invadindo o trajeto das outras partículas contíguas. A figura 14 demonstra um escoamento passando pelos três regimes, segundo Van Dyke em 1982 [11].

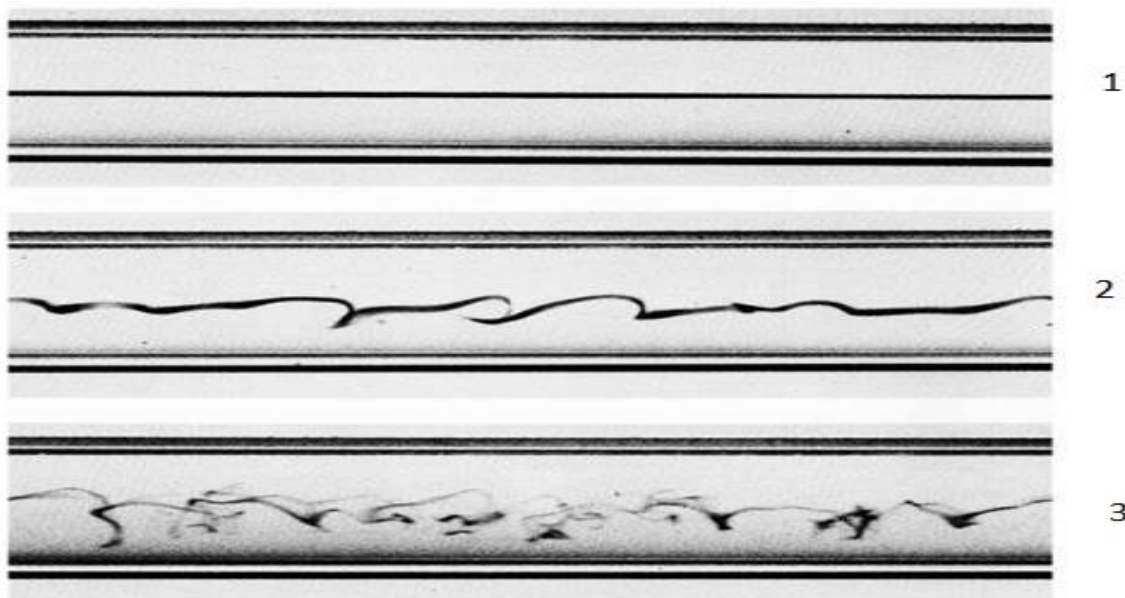


Figura 14- Diferentes regimes no escoamento: regime 1- laminar, regime 2- transição, regime 3- turbulento [11]

Como se verifica pela ilustração anterior, o regime turbulento é imprevisível e consiste numa condição onde ocorrem inúmeras irregularidades nos deslocamentos das partículas desse fluido fazendo com que as mesmas estejam sempre a colidir umas com as outras, o que

provoca com que o escoamento tenha elevada taxa de deformação derivado do comportamento caótico das partículas do fluido.

Portanto, de modo a identificar-se o regime em que o escoamento se encontra, surgiu um parâmetro adimensional denominado número de Reynolds, que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas, através da equação 3.7:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (3.7)$$

Onde,  $\rho$  diz respeito à massa específica do fluido,  $v$  à velocidade do fluido,  $l$  à dimensão característica do fluido e por fim  $\mu$  à viscosidade dinâmica.

Sendo assim, quando as forças de inércia são bastante superiores às forças viscosas estamos perante um escoamento turbulento. Usualmente considera-se que o escoamento se encontra em regime turbulento para valores de  $Re_x \cong 50000$ , porém o escoamento pode tornar-se turbulento mais cedo dependendo da rugosidade e do atrito que essa superfície provoque ao deslocamento do escoamento.

Como referido anteriormente, a temática e o estudo de escoamentos turbulentos é bastante complexa e por vezes difícil de prever, todavia existem modelos computacionais capazes de auxiliar no estudo dos escoamentos turbulentos, sendo estes: o *Direct Numerical Simulation* (DNS), o *Large Eddy Simulation* (LES) e por fim o *Reynolds- Averaged Navier Stokes* (RANS).

A simulação numérica direta ou em inglês *Direct Numerical Simulation* (DNS), consiste numa simulação de mecânica dos fluidos computacional onde as equações de Navier-Stokes são resolvidas numericamente, sem auxílio de qualquer modelo de turbulência, o que acarreta que quer as escalas espaciais e temporais da turbulência tenham de ser tratadas e resolvidas. Obviamente que nestas condições, a simulação numérica direta (DNS) requer um custo computacional bastante avultado e de muito difícil alcance, mesmo quando se trata de escoamentos com números de Reynolds baixos, porém a mesma produz soluções bastante exatas e complexas.

Derivado da existência destas escalas espaciais e temporais da turbulência, a simulação numérica direta é muitas vezes impraticável, no entanto para colmatar essas dificuldades, atualmente são utilizados os outros dois modelos computacionais referidos anteriormente sendo eles o *Large Eddy Simulation* (LES) e o *Reynolds- Averaged Navier Stokes* (RANS), que já

recorrem a modelos de turbulência de modo a evitar as escalas espaciais e temporais da turbulência.

O modelo LES, veio relativizar as complexidades impostas pelo modelo DNS, pois apenas resolve as grandes escalas de vórtices turbulentos enquanto os vórtices de pequena escala ou dissipativos apenas são modelados. Contrariamente ao DNS, o modelo LES não requer um poder computacional tão poderoso quanto o DNS, pois a necessidade de resolver os vórtices de pequena escala do escoamento é retirada, porém ainda assim este modelo computacional pode requerer um poder computacional ainda assim significativo consoante a percentagem de energia cinética que é resolvida.

Por fim, a opção mais rentável para este tipo de projeto e o modelo computacional que será utilizado para o mesmo será o modelo computacional RANS. Este modelo computacional é empregue para casos de estudo onde o caráter é estacionário, o mesmo resolve as equações de Navier-Stokes com o auxílio das equações ou médias de Reynolds e recorre também ao uso de modelos de turbulência para modelar os efeitos e o comportamento que a turbulência exerce no fluido. Ao invés de todos os outros modelos computacionais supramencionados acima, o modelo RANS não exige um transcendente poder computacional daí ser utilizado inúmeras ocasiões em problemas na área da mecânica dos fluidos computacional.

A figura 15 ilustra como os três tipos de modelos computacionais se distinguem através da alta precisão do modelo DNS até ao tratamento da turbulência pelo modelo RANS.

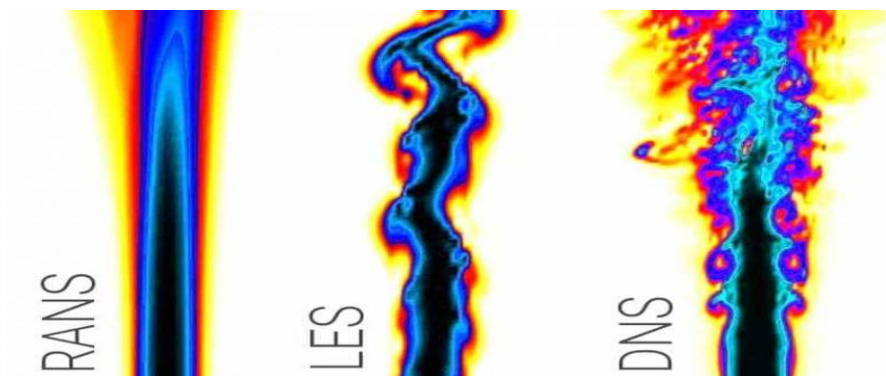


Figura 15- Comparação entre os modelos computacionais RANS, LES e DNS [12]

As equações utilizadas no modelo computacional *Reynolds-Averaged Navier Stokes*, provêm como o nome indica das equações de Navier-Stokes, porém as variáveis são decompostas, através das equações de Reynolds, numa componente de média  $\bar{\phi}$  e numa componente de variação desse valor  $\phi'$ , tal como a equação 3.7 expressa:

$$\phi = \phi' + \bar{\phi} \quad (3.7)$$

Tal como referido anteriormente, a variação de massa volúmica só poderá ser desprezada quando se trata de um fluido incompressível, caso contrário não será possível desprezá-la. Sendo assim e considerando o fluido como incompressível as equações RANS ficarão expressas como as equações 3.8,3.9 e 3.10:

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \vec{v} \nabla(\bar{u}) \right) = \rho g_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \nabla^2 \bar{u} - \rho \left( \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \quad (3.8)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \vec{v} \nabla(\bar{v}) \right) = \rho g_y - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \mu \nabla^2 \bar{v} - \rho \left( \frac{\partial \overline{v'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right) \quad (3.9)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \vec{v} \nabla(\bar{w}) \right) = \rho g_z - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} - \rho \left( \frac{\partial \overline{w'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{w'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} \right) \quad (3.10)$$

### 3.4 Modelos de turbulência

O objetivo dos modelos de turbulência, no modelo RANS, além de auxiliar na resolução eficaz a nível temporal e a nível computacional projetos em engenharia, tem como objetivo direto calcular as tensões de Reynolds, existindo assim três categorias de modelos: os modelos lineares de viscosidade turbulenta, os não-lineares de viscosidade turbulenta e por fim os modelos de tensão de Reynolds (RSM).

No caso dos modelos lineares de viscosidade turbulenta, estes são um tipo de modelos de turbulência, onde as tensões de Reynolds, são conseguidas através das médias de Reynolds das equações de Navier-Stokes e que a partir do qual são modeladas por uma relação constitutiva linear, ou seja, relação essa relaciona o tensor de Reynolds com o gradiente de velocidade média, e a esta relação linear dá-se o nome de hipótese de Boussinesq. A grande vantagem deste tipo de modelos é que não requer um elevado poder computacional, logo são modelos rentáveis a nível temporal, e o facto de não requerer elevado poder computacional faz com que o parâmetro da viscosidade dinâmica turbulenta,  $u_t$ , seja obtida em tempo útil. Por não ser propriedade do fluido, mas sim um aspeto do escoamento, é necessário calcular

esse mesmo parâmetro. Existem alguns gêneros dentro destes modelos lineares de viscosidade turbulenta, pois irão variar o número de equações de transporte que terão de ser determinadas para se obter o parâmetro da viscosidade dinâmica turbulenta, sendo eles: modelos de duas equações, modelos de uma só equação e por fim modelos algébricos.

Os modelos não-lineares de viscosidade turbulenta, são modelos de turbulência que consistem em que a viscosidade dinâmica turbulenta,  $\mu_t$ , é aplicada para relacionar o campo de turbulência média com o campo de velocidade média, todavia e como o nome indica, relaciona essas grandezas através de uma relação não-linear.

Por fim, os modelos de tensão de Reynolds (RSM) são modelos de turbulência mais complexos e que pesam em termos de poder computacional, pois não utilizam o conceito de viscosidade turbulenta, porém os mesmos calculam as tensões de Reynolds diretamente.

Atualmente, os modelos de turbulência através do método de RANS são os modelos lineares de viscosidade turbulenta com duas equações, nestes modelos são resolvidas as equações de transporte da quantidade de movimento, (no modelo de Spalart-Allmaras apenas se resolve uma equação de transporte), da energia cinética de turbulência e da dissipação da mesma, no caso do modelo  $k - \varepsilon$ , ou então da dissipação específica, no caso do modelo  $k - \omega$ .

Abaixo encontra-se a descrição de cada um dos modelos de turbulência acima mencionados:

### 3.4.1 Modelo Spalart-Allmaras

O modelo Spalart-Allmaras é um modelo de turbulência que utiliza apenas uma única equação para resolver a equação de transporte modelada para a viscosidade cinemática turbulenta. É um modelo utilizado para baixos números de Reynolds e que tem a capacidade de resolver todo o campo de escoamento até à parede. Este modelo foi originalmente desenvolvido para aplicações aerodinâmicas e uma das suas vantagens é a sua estabilidade e a sua boa convergência na resolução. Este também é um modelo bastante útil no estudo da camada viscosa onde o  $Y^+$ .

### 3.4.2 Modelo $k - \varepsilon$

O modelo de turbulência K-epsilon é dos modelos de turbulência mais usado em simulações computacionais em mecânica dos fluidos computacional, este é um modelo que se baseia em duas equações de transporte, a de equação de transporte de quantidade de

movimento da energia cinética turbulenta,  $k$ , e da dissipação da energia cinética de turbulência,  $\varepsilon$ , e que fornece uma descrição generalizada da turbulência. Neste modelo o valor do  $Y^+$  deverá ser superior a 30 e inferior a 300, logo não é muito útil para o estudo da camada viscosa. É maioritariamente utilizado para números de Reynolds elevados e o mesmo possui robustez, economia e boa precisão para um vasto leque de escoamentos turbulentos.

### 3.4.3 Modelo $k - \omega$

Este modelo, que se encontra implementado no *Ansys Fluent*, baseia-se na resolução também de duas equações de transporte sendo elas a equação de transporte de quantidade de movimento da energia cinética turbulenta,  $k$ , e da dissipação específica,  $\omega$ , onde o mesmo integra modificações para números de Reynolds baixos. O modelo em causa é bastante aplicado em situações que a camada limite se encontra junto à parede e também é bastante útil em escoamentos com gradiente de pressão adversa, é amplamente utilizado na indústria das turbomáquinas e da na indústria aeronáutica.

## 3.5 Modelo de turbulência utilizado neste projeto

Neste projeto, o modelo de turbulência que será utilizado será o modelo  $k - \omega$  *SST*, pois neste projeto o escoamento tratar-se-á de um escoamento aerodinâmico externo, onde existirá elevados gradientes de pressão adversa e que o essencial do estudo será analisar os valores de pressão dinâmica dentro da linha de pressão estática e a bolha de recirculação criada à volta da tomada de pressão estática, devido à separação do escoamento aquando do confronto do mesmo com a tomada de pressão estática, e analisando todas estas condições o modelo de turbulência adequado será o  $k - \omega$  *SST*. Abaixo encontra-se uma descrição acerca deste modelo de turbulência que será utilizado amplamente durante a elaboração deste projeto.

### Modelo $k - \omega$ *SST*

Este modelo surge em 1993 por Menter [13], como um aprimoramento ou evolução do seu antigo modelo de turbulência  $k - \omega$  *standard*. Na prática este modelo foi concebido para misturar a robustez e precisão do modelo  $k - \omega$  na região próxima da parede com a independência do fluxo livre do modelo  $k - \varepsilon$  na zona mais distante da parede.

O modelo em causa, no entanto difere-se ligeiramente do seu modelo antecessor ( $k - \omega$  *standard*), na medida em que este modelo contém um termo de difusão transversal amortecida na equação de dissipação específica ( $\omega$ ) e o parâmetro da viscosidade turbulenta foi

modificado de forma que fosse levado em consideração o transporte a tensão de corte turbulenta na parede, características estas que outrora não existiam no seu modelo antecessor,  $k - \omega$  *standard*. Claramente que com a inclusão de novas modificações e melhoramentos ao seu modelo de turbulência antecessor, o modelo  $k - \omega$  *SST* tornou-se num modelo bastante mais versátil para um vasto leque de escoamentos, contrariamente ao modelo  $k - \omega$  *standard*.

Com isto as novas equações de transporte (3.11 e 3.12) deste modelo para a energia cinética turbulenta,  $k$ , e para a dissipação específica,  $\omega$ , serão:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \quad (3.12)$$

Em que, a variável  $G_k$  exprime a geração de energia cinética turbulenta,  $Y_k$  e  $Y_\omega$  representam respetivamente a dissipação de  $k$  e  $\omega$  devido à turbulência,  $\Gamma_k$  e  $\Gamma_\omega$  dizem respeito à difusividade efetiva  $S_\omega$ ,  $D_\omega$  exprime o termo da difusão cruzada sendo esta a variável responsável pela junção dos dois modelos de turbulência,  $k - \omega$  e  $k - \varepsilon$ , por fim as variáveis  $S_k$  e  $S_\omega$  representam termos definidos pelo utilizador.

No caso da viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , que toma um papel bastante importante aquando do cálculo das difusividades efetivas  $k$  e  $\omega$ , pois representa uma resistência adicional do escoamento devido à ocorrência de turbulência é representada abaixo pela equação 3.13:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left[ \frac{1}{\alpha^*}; \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega} \right]} \quad (3.13)$$

No qual  $\alpha^*$  é um coeficiente de correção que serve para amortecer a viscosidade turbulenta para números de Reynolds diminutos,  $S$  diz respeito à magnitude da taxa de deformação e por fim  $F_2$  é uma função que aliada a  $F_1$  dão origem a uma variante do modelo  $k - \omega$  na zona viscosa da parede e do modelo  $k - \varepsilon$  na região do escoamento longe da parede ou no

escoamento livre. Como será expectável todas as variáveis mencionadas acima terão de ser definidas quando se trabalha com mecânica dos fluidos computacional, sendo estas então definidas em *Ansys Fluent*.

### 3.6 Malha

De forma que se consiga progredir para assim resolver um problema em mecânica dos fluidos computacional é essencial que se exista uma malha adequada e satisfatória consoante o projeto a ser desenvolvido.

A malha por definição é uma rede constituída por células e pontos e que por sua vez constitui o domínio físico do projeto, de forma que assim as equações diferenciais do modelo em causa, referidas e mencionadas anteriormente consigam ser solucionadas, em cada célula e de forma singular, numericamente para que se consiga avaliar então o desempenho do escoamento.

Tal como referido no primeiro parágrafo deste subcapítulo, é fundamental que a malha seja adequada e satisfatória para o sucesso de um projeto em mecânica dos fluidos computacional, devido a que a qualidade de uma malha está diretamente relacionada com os resultados obtidos, ou seja, se a malha for de baixa qualidade os resultados obtidos serão pouco precisos e seguramente não serão os mais exatos para o projeto em causa, em oposição quando a malha criada é uma malha com alta qualidade os resultados que dela serão obtidos serão resultados seguramente bastante satisfatórios e precisos, para isso é necessário que a malha cumpra algumas características sendo elas: a convergência, a estabilidade e a consistência.

A convergência diz respeito a que à medida que as equações vão sendo resolvidas em cada iteração, é imprescindível que as soluções resolvidas nessas iterações converjam para um limite, ou seja, que a solução obtida ao fim de algumas iterações se aproxime sempre do mesmo valor.

Em relação à estabilidade, esta característica é bastante importante pois aquando de uma simulação é fundamental que os erros obtidos em cada iteração não afetem as iterações seguintes, pois caso contrário irão ser criados erros cumulativos que afetarão de certeza os resultados obtidos.

Por fim a consistência, isto significa que todo o fluxo de fluido que entra numa face deverá ser igual ao fluxo que irá sair na face vizinha, de forma não ocorrerem perdas de fluido o que iria provocar, com certeza, erros na solução obtida.

Obviamente que inúmeras vezes nem sempre é possível obter uma convergência perfeita logo de início, daí ser indispensável conhecer os parâmetros mais importantes na concepção de uma malha, para assim se obter resultados satisfatórios com uma convergência também ela aceitável.

### 3.6.1 Tipos de Malha

Como referido anteriormente, a malha constitui o domínio físico do projeto sendo ela própria a discretização de todo o redor do escoamento em elementos ou células finitas, as mesmas podem apresentar formas diversas consoante a malha seja bidimensional ou tridimensional, usualmente quando se tratam de malhas bidimensionais as formas mais comuns de cada elemento finito costumam ser triângulos ou quadriláteros porém no caso tridimensional são mais usados volumes com 4 faces como pirâmides ou então volumes com 6 faces como paralelepípedos, entre outros. A figura 16 demonstra alguns tipos de forma que os elementos finitos podem tomar.

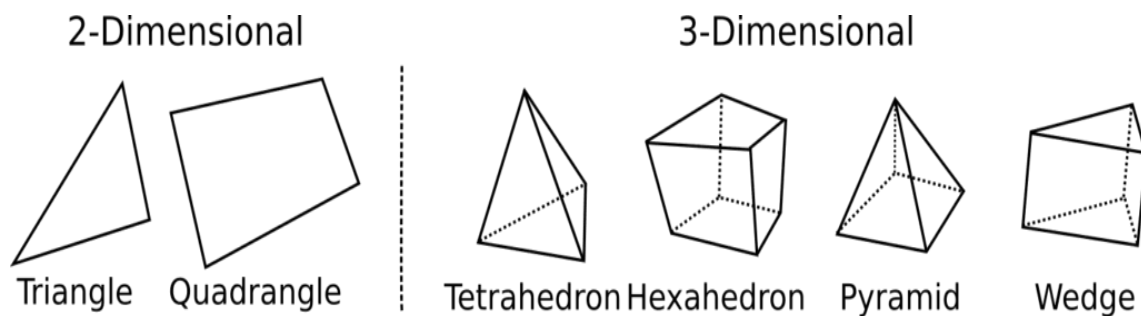


Figura 16- Tipos de formas dos elementos numa malha [14]

De acordo com a forma escolhida para cada elemento da malha e com o número de modificações a que malha está sujeita, a mesma pode tornar-se uma malha estruturada, híbrida ou então não-estruturada o que fará com que os resultados obtidos neste último tipo de malha referido, resultados pouco satisfatórios.

Em oposição no caso da obtenção de uma malha estruturada, a mesma produzirá resultados bastante precisos e satisfatórios. Uma malha estruturada apresenta elementos bastante estruturados sem haver elementos com formas diferentes dos elementos vizinhos, no caso deste projeto e visto que será um projeto tridimensional uma malha estruturada apresentará um padrão constante de volumes hexaédricos ou de 6 faces, todavia no caso bidimensional uma malha estruturada costuma ser composto por superfícies com 4 lados. De seguida

são apresentadas a figura 17 e a figura 18 representativas de malhas estruturadas quer bidimensionalmente como tridimensionalmente.

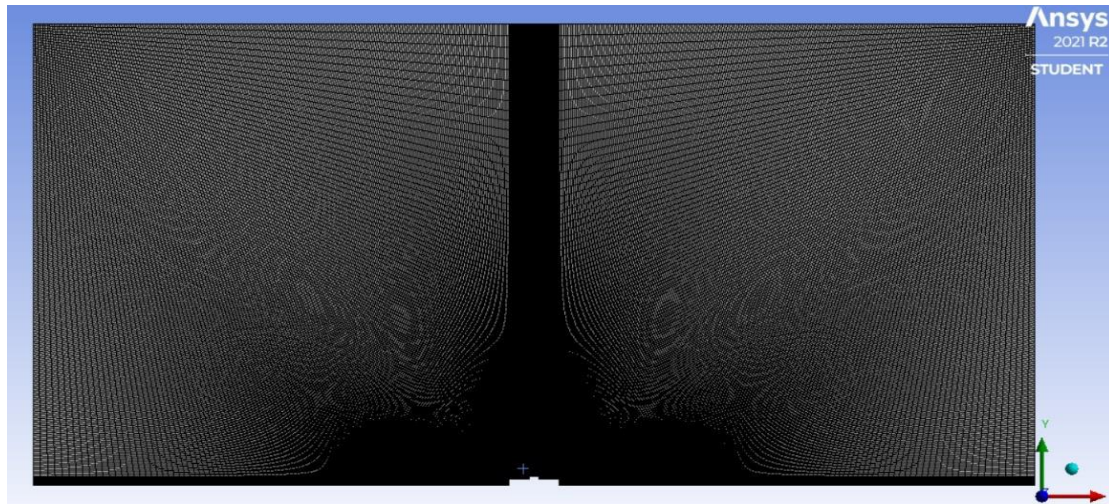


Figura 17- Malha bidimensional estruturada

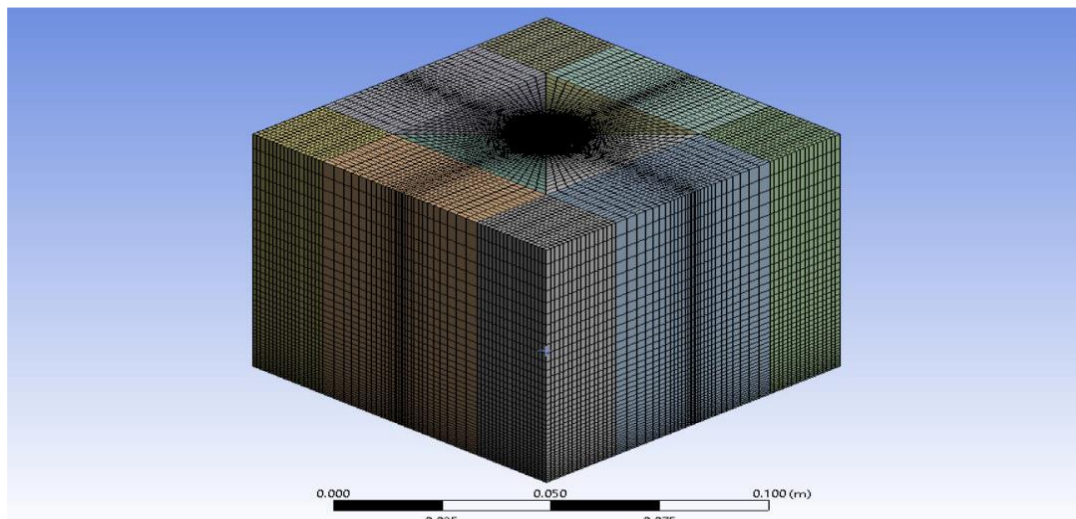


Figura 18- Malha tridimensional estruturada

Como se verifica pelas figuras acima, quer a nível bidimensional quer a nível tridimensional, existem cada vez mais elementos e de menor dimensão junto à zona do domínio que se pretende ser estudada, sendo esta uma das vantagens das malhas com volumes hexaédricos pois permite ter um grande poder de manipulação do utilizador na malha. Todavia existe uma desvantagem, pois para geometrias complexas este tipo de malha torna-se bastante complicado de tornar-se estruturada devido à dificuldade de dividir o domínio em volumes cujo cada face terá de conter 4 arestas, daí esta metodologia de malha não ser propriamente aplicável em qualquer tipo de geometria a ser estudada.

Normalmente os elementos ou células da malha encontram-se alinhados com o sentido do escoamento o que favorece bastante a resolução das equações de transporte em cada elemento da malha e aumenta a precisão do *solver*, sendo os mesmos responsáveis para tornar as simulações numéricas mais eficientes através da transformação das leis físicas. Em *Ansys Fluent* existem dois tipos de *solvers* como: o *density-based* que apenas é valido para fluidos compressíveis onde a massa volúmica do mesmo varia, e existe também o *pressure-based* que é indicado para fluidos incompressíveis, sendo este o solver a ser usado no decorrer deste projeto.

Por outro lado, a malha não-estruturada é gerada de forma totalmente contrária à vontade do utilizador, ou seja, a disposição de cada elemento da malha é definida automaticamente através do programa de mecânica dos fluidos computacional que se está a utilizar no momento. Normalmente em malhas bidimensionais o programa gera malhas com elementos com 3 lados, em forma de triângulo, ou nos casos tridimensionais as malhas geradas pelo programa contêm elementos tetraédricos. Obviamente que a principal vantagem deste tipo de malhas é que o utilizador não tem de estar a refinar a malha de forma a que ela fique estruturada, porém tem uma grande desvantagem pois o utilizador não possui qualquer tipo de controlo na malha apenas controla as propriedades em que a simulação será feita, por sua vez os resultados que normalmente são obtidos através deste tipo de malha são resultados pouco precisos e pouco satisfatórios na sua generalidade, para além que a malha não apresentará convergência.

Por fim existe as malhas híbridas, que são na prática uma mistura das duas malhas, ou seja, estas tiram partido das vantagens quer das malhas-estruturadas como das malhas não-estruturadas. Por essa razão, neste tipo de malhas existirão elementos não-estruturados em zonas do domínio que não são muito relevantes para o estudo a fazer, porém nas zonas fulcrais para o estudo existirão elementos bastante estruturados. As figuras 19 e 20 representam exemplos de uma malha não-estruturada e uma malha híbrida, respetivamente.

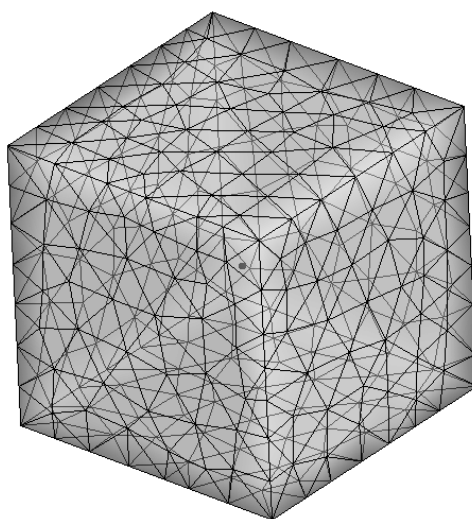


Figura 19- Malha não-estruturada [15]

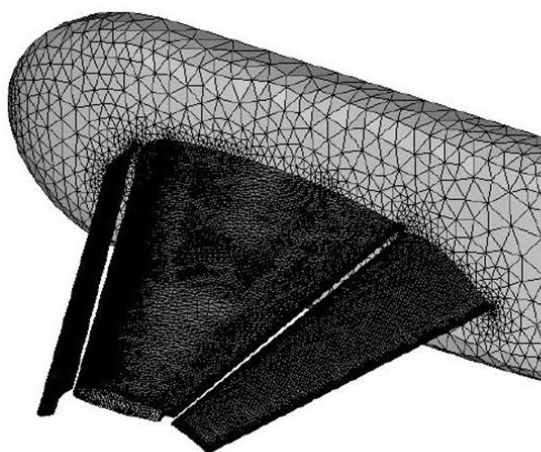


Figura 20- Malha híbrida [16]

### 3.6.2 Qualidade da malha

O alcance de resultados precisos e satisfatórios está altamente relacionado com a qualidade de uma malha, ou seja, quanto maior for a discretização da malha melhor será a sua qualidade e, por conseguinte, melhor será a sua convergência e estabilidade o que levará por sua vez a uma maior rapidez das iterações aquando da execução de uma simulação. Devido a esse motivo, é bastante importante avaliar a qualidade de uma malha, e essa avaliação passa por analisar alguns parâmetros sendo eles: a ortogonalidade, o alongamento e por fim a assimetria.

Começando pela ortogonalidade, a mesma diz respeito ao desvio existente do ângulo entre o vetor que liga o centro dos volumes finitos vizinhos com o vetor normal à face ou superfície dos mesmos, sendo este um parâmetro adimensional (a figura 21 ilustra a afirmação

anterior). Os valores da ortogonalidade variam entre 0 e 1, sendo 0 um valor medíocre e 1 um valor perfeito, no entanto, considera-se que valores acima de 0,2 de ortogonalidade são valores de ortogonalidade bons e que irão conduzir a bons resultados após as simulações.

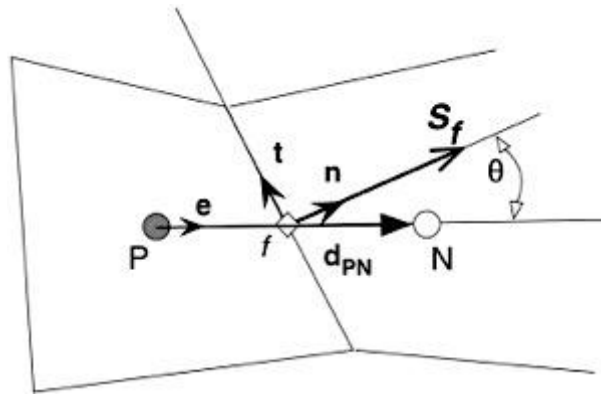


Figura 21- Exemplo ilustrativo do conceito de ortogonalidade [17]

Em relação ao alongamento, ou *aspect ratio*, esta diz respeito a uma relação definida entre a distância máxima do centróide do elemento e o centro das faces do elemento, com a distância mínima entre nós da célula. O valor perfeito do alongamento seria 1, por essa razão valores muito elevados de alongamento poderão levar a erros nas simulações, no entanto para escoamentos unidimensionais e completamente desenvolvidos o alongamento pode ser bastante elevado para malhas hexaédricas. A figura 22 representa uma imagem exemplificativa de um elemento (lado esquerdo) com um rácio de crescimento adequado comparado com outro elemento (lado direito) com um rácio de crescimento elevado.



Figura 22- Exemplo ilustrativo do conceito de alongamento [18]

Por fim a assimetria também conhecido por *Skewness*, esta exprime o desvio presente no vetor que liga o centro dos volumes finitos adjacentes com o centro da superfície do volume finito, tal como a figura 23 ilustra. Este atributo, tal como a ortogonalidade, trata-se de um valor adimensional sendo os valores de referência do mesmo entre 0 que seria o valor perfeito e 1 que representaria a pior situação.

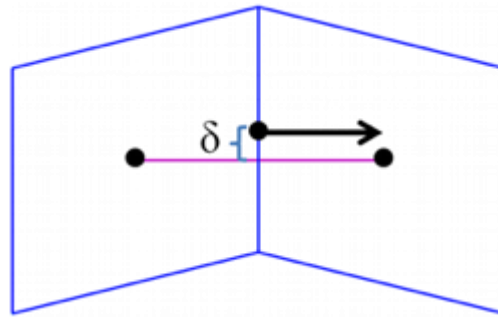


Figura 23- Exemplo ilustrativo do conceito de assimetria [17]

### 3.7 Influência da parede no tratamento da malha em escoamento turbulento

A presença de paredes afeta consideravelmente um escoamento turbulento, derivado que junto às paredes as forças viscosas exercem uma forte predominância e também porque na direção perpendicular à parede a turbulência intensifica-se rapidamente pois existem elevados gradientes de velocidade média que produzem energia cinética turbulenta.

Pelo facto de as paredes afetarem tanto um escoamento turbulento, as simulações numéricas em CFD junto à parede terão um impacto bastante significativo quanto aos resultados obtidos, pois as paredes são as principais responsáveis pela formação de turbulência e vórtices num escoamento, justamente porque é nas paredes que existem elevados gradientes e momentos que influenciam os campos das variáveis. Por essa razão, o domínio computacional tem de estar adequadamente refinado junto à parede de forma a ser obtidos resultados satisfatórios, todavia quanto mais refinada uma malha se encontra maior será a exigência de poder computacional e devido a esse motivo foram criadas as funções de parede para aliviar a sobrecarga computacional.

Portanto, um escoamento turbulento sobre uma placa plana horizontal pode ser dividido em quatro zonas sendo elas: a subcamada viscosa (*viscous sublayer*), a camada tampão (*buffer layer*), a camada de transição (*transition layer ou overlap layer*) e por fim a camada externa (*turbulent layer*).

A subcamada viscosa é a primeira camada junto à parede, onde tal como o nome indica, predominam os efeitos viscosos e por essa razão o perfil de velocidades é quase linear. Acima da subcamada viscosa encontramos a *buffer layer* onde a turbulência começa a tornar-se significativa, porém a camada na sua grande maioria ainda é dominada pelos efeitos viscosos. A camada de transição que é a terceira camada, a contar da parede, é uma camada intermédia

onde a turbulência já é dominante. Por fim encontra-se a camada externa ou *turbulent layer*, em que a turbulência é dominante sobre os efeitos viscosos e a distância à parede torna-se irrelevante. A figura 24 ilustra as quatro zonas de um escoamento turbulento.

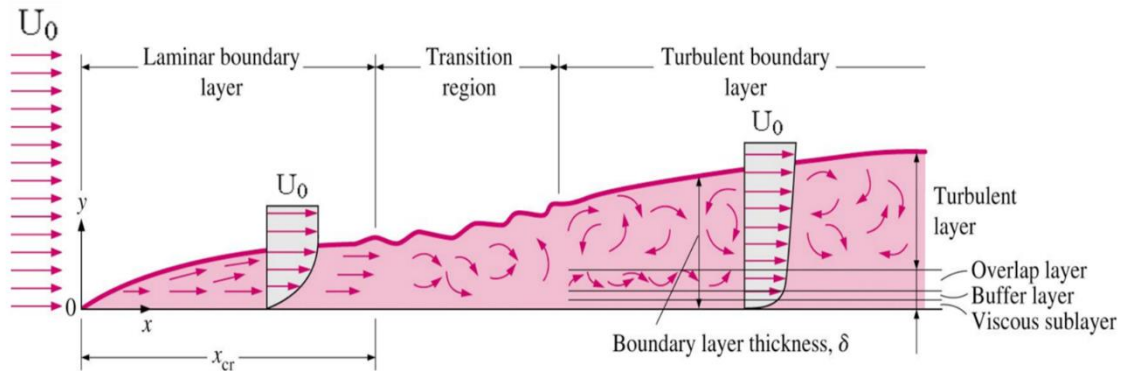


Figura 24- Evolução de um escoamento turbulento sobre uma placa plana horizontal [19]

As leis de parede, ou em inglês *wall functions*, são utilizadas para ligar a região viscosa à região turbulenta. Estas funções eliminam o facto de ter de modificar os modelos de turbulência para assim dar conta da presença da parede, o que faz que tal como referido anteriormente o poder computacional seja poupado pois já não é necessário que as zonas da região viscosa que são bastante afetadas pela parede necessitem de ser resolvidas. A lei da parede reitera que a velocidade média de um escoamento turbulento a partir de uma região designada, *log layer*, é proporcional ao logaritmo da distância de ponto até à parede, no entanto antes dessa região o comportamento de um escoamento é estabelecido através de outra função que é uma lei de parede. A figura 25 relaciona a velocidade adimensional com a distância à parede também adimensional, juntamente com as suas funções de parede.

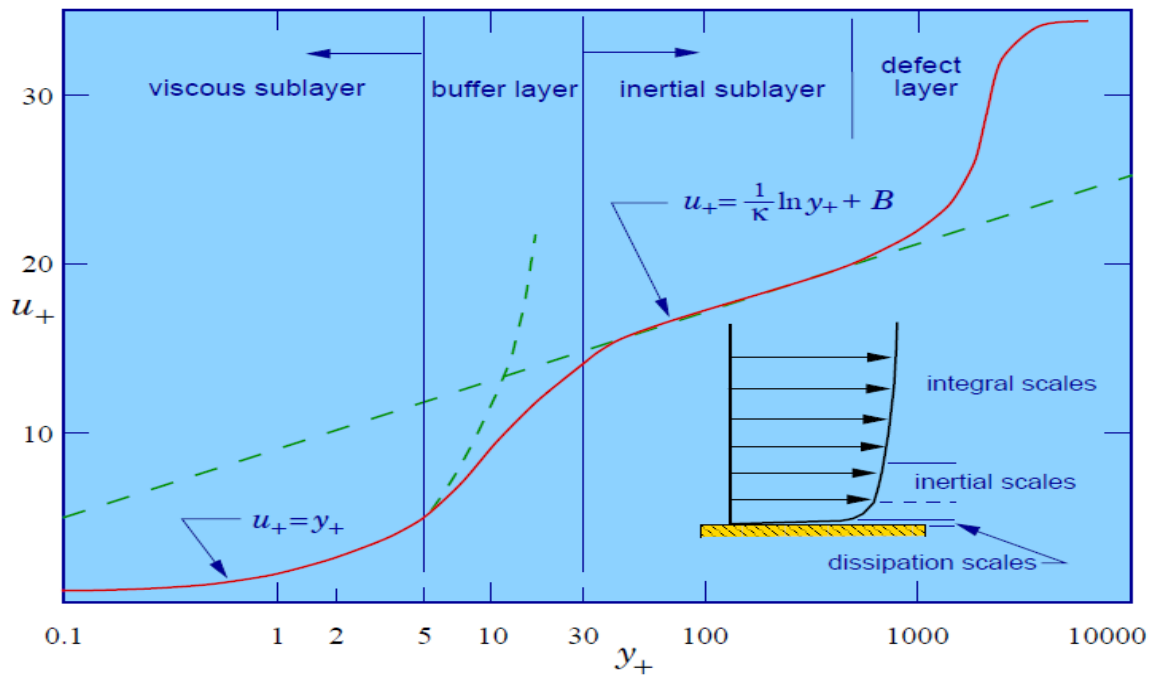


Figura 25-Perfil da velocidade média em camada limite turbulenta [19]

Através do gráfico acima, verifica-se que a lei da parede é expressa através do sistema de equações abaixo 3.14:

$$\begin{aligned}
 & y^+ & , y^+ < 5 & & (3.14) \\
 & \frac{1}{K} \ln(y^+) + B & , 30 < y^+ < 500 & & 
 \end{aligned}$$

Onde B é uma constante empírica e K a constante de Von Karman.

Por uma questão de conveniência, nas camadas limite as distâncias e as velocidades são parâmetros adimensionais definidos por  $y^+$  e  $u^+$ , respetivamente. Estes parâmetros são expressos pelas equações 3.15 e 3.16:

$$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu} \quad (3.15)$$

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (3.16)$$

Em que  $y$  é a distância à parede,  $\nu$  diz respeito à viscosidade cinemática do fluido e por fim  $u_\tau$  a velocidade de fricção ou de atrito.

Assim sendo a propriedade adimensional da distância à parede ou  $y^+$ , irá desempenhar um papel fulcral na construção da malha pois indicará a altura que a primeira célula ou elemento da malha terá de ter junto à parede. Este parâmetro irá variar consoante o trabalho ou projeto em causa, pois para cada projeto a célula poderá ter de estar na *viscous layer* ou então na *log layer*. Por exemplo, se num estudo é necessário estudar a turbulência junto até a parede (*viscous layer*), o parâmetro  $y^+$  deverá ser menor que 5, o que significa que a malha tem de estar imensamente refinada o que fará com que ocorra sobrecarga sobre o poder computacional. Por outro lado, é possível utilizar as funções de parede ou *wall functions* que modelam o comportamento do escoamento junto à parede, e sendo assim nesse caso o  $y^+$  deverá estar entre 30 e 300, ou seja, na *log layer*. Abaixo encontra-se dois tipos de abordagens de resolução da parede na malha (figura 26 e 27).

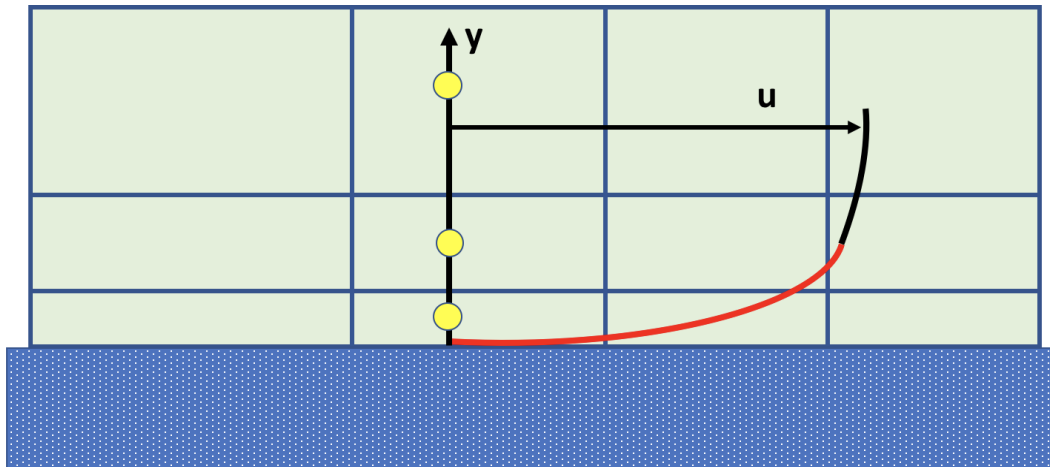


Figura 26- Abordagem para resolver a parede através de wall functions [20]

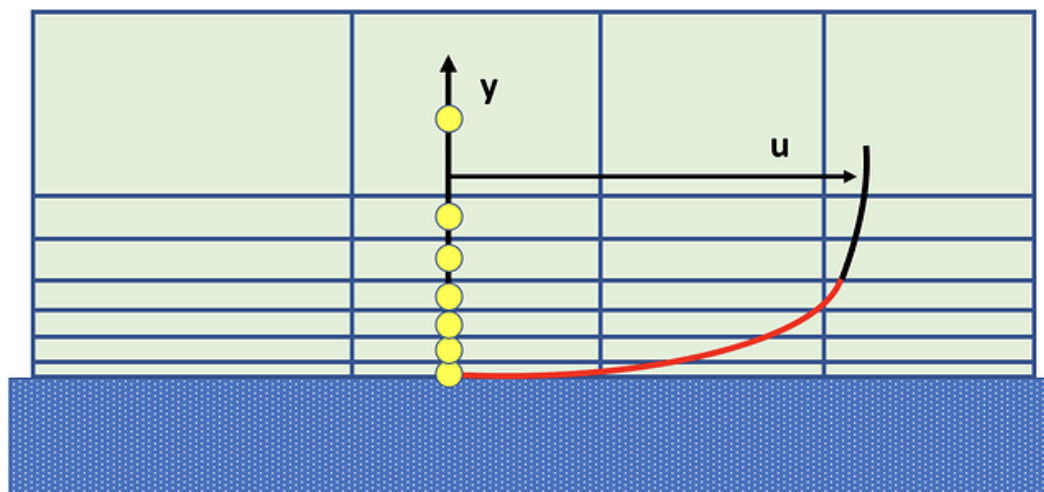


Figura 27- Abordagem para resolver a parede sem recurso a wall functions [20]

Obviamente que os valores do parâmetro adimensional,  $y^+$ , poderão tomar valores diferentes consoante o modelo de turbulência, pois no modelo  $k - \omega$  *standard* o  $y^+$  terá de ser menor que 5 enquanto no modelo  $k - \varepsilon$  terá de estar entre 30 e 300, todavia e visto que o modelo  $k - \omega$  *SST* é um modelo híbrido este tolera os mesmos valores dos seus modelos vizinhos.

Neste projeto, como se verá a frente estamos perante um contexto de um escoamento com elevado número de Reynolds e por essa razão a altura das duas primeiras zonas do escoamento turbulento serão pequenas. Por conseguinte, será necessário um poder computacional adequado pois a malha irá requerer muitos elementos e terá de ser abundantemente refinada. Ainda assim e como mencionado o modelo de turbulência que será usado é o  $k - \omega$  *SST*.



## CASO DE ESTUDO

No decorrer deste capítulo será demonstrado e exemplificado todo o procedimento realizado para a conceção desta dissertação. A metodologia utilizada assim como os parâmetros a ser analisados neste projeto, serão os mesmos que anteriormente foram explicitados no capítulo anterior acerca da modelação numérica. Sendo assim, efetuou-se duas modelações tridimensionais de duas tomadas de pressão estática diferentes, presentes no Tecnam P2008, que no caso serão essas tomadas a ser estudadas pertencentes a esta aeronave.

### 4.1 Escolha das tomadas em estudo

Tal como referido anteriormente, o avião que será estudado nesta dissertação será o Tecnam P2008, que se encontra na gama das aeronaves de aviação ligeira com um peso aproximado de 354 kilogramas O avião em causa encontra-se representado pela figura 28.



Figura 28- Aeronave Tecnam P2008 [21]

Todavia apenas serão estudadas as tomadas de pressão estática desta aeronave, cujo a função é o impedimento de entrada de pressão dinâmica dentro da linha de pressão estática para assim não ocorrerem erros de leitura nos instrumentos. No caso o avião consoante o modelo, possui dois tipos de tomadas de pressão estática diferentes, cada uma com o seu design, e estas encontram-se localizadas nas partes laterais do bico da aeronave. As figuras 29 e 30 ilustram os dois modelos de tomadas a ser estudadas.



Figura 29- Design nº1 da tomada de pressão estática do Tecnam P2008 (tomada nº1)



Figura 30- Design nº2 da tomada de pressão estática do Tecnam P2008 (tomada nº2)

## 4.2 Parâmetros das tomadas de pressão estática

Após ter sido efetuada uma pesquisa acerca do funcionamento das tomadas de pressão estática e da sua aplicabilidade na indústria aeronáutica, através da revisão de referências bibliográficas, concluiu-se que os parâmetros mais importantes numa tomada de pressão estática são: a sua localização na fuselagem do avião e a sua forma geométrica.

Por conseguinte, o estudo desenvolvido desta dissertação irá fixar-se em analisar o comportamento de cada tomada de pressão estática, quando sujeitas a um escoamento exterior de diversas velocidades que irá simular condições de voo em cruzeiro, de modo que os dois designs das duas tomadas de pressão estática sejam comparados em relação aos valores de pressão dinâmica que cada um obteve na sua linha de pressão estática.

Em cada simulação irá ser variada a velocidade do escoamento externo, de modo a analisar-se o aumento da velocidade de escoamento com a pressão dinâmica obtida.

Portanto, através deste tipo de abordagem de estudo, irá se conseguir concluir qual design das tomadas de pressão estática da aeronave Tecnam P2008 é o mais eficaz e eficiente na minimização ou prevenção da entrada de pressão dinâmica.

Contudo irão ser criadas diversas malhas para cada modelo, de modo a analisar a veracidade dos resultados, para assim aumentar a precisão dos resultados obtidos aquando da execução das simulações numéricas em *Ansys Fluent*.

## 4.3 Geometria das tomadas de pressão estática

Tal como referido anteriormente, nesta dissertação serão estudadas duas tomadas de pressão estática da aeronave Tecnam P2008 cada uma com um design diferente. Abaixo será apresentado a geometria de cada uma tomada, bem como as suas medidas e a forma como as mesmas foram modeladas.

### 4.3.1 Tomada de pressão estática nº1

A primeira tomada de pressão estática a ser apresentada será a que está representada na figura 29, cujo as medidas da mesma são:

- **Diâmetro maior**- 22 milímetros
- **Diâmetro menor**- 3 milímetros
- **Altura da tomada**- 2 milímetros

A figura 31 retrata a representação da tomada de pressão estática nº1 com as vistas do alçado principal e da planta, com as respetivas cotas.

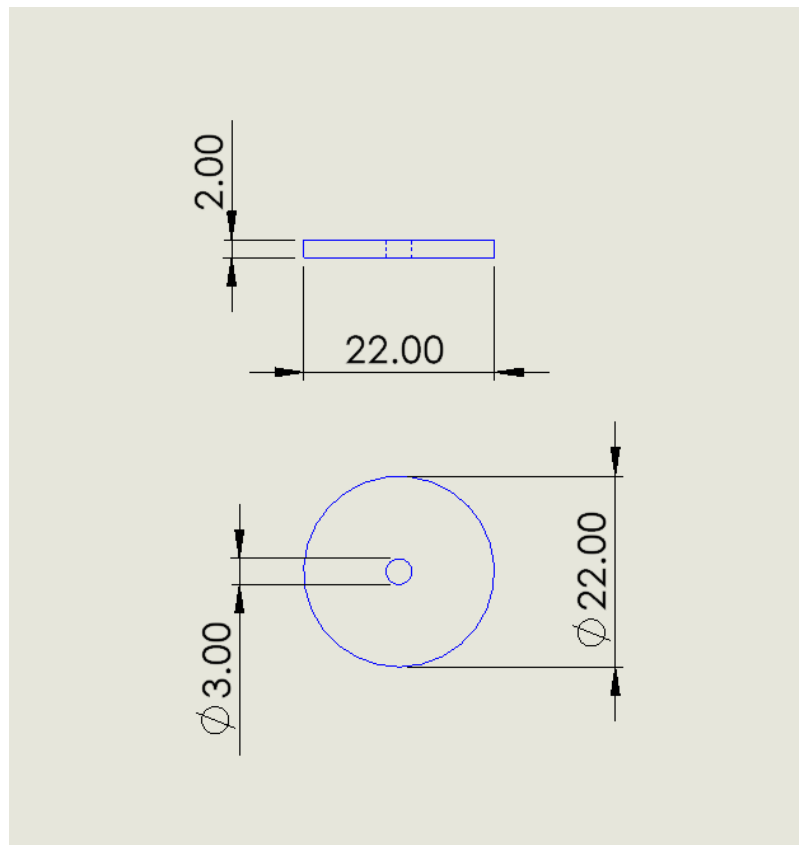


Figura 31- Representação bidimensional da tomada de pressão estática nº1

Posteriormente, sabendo as medidas geométricas da tomada modelou-se tridimensionalmente esta tomada de pressão estática através da ferramenta *Design Modeler* que se encontra incorporada no programa que foi utilizado para a realização desta dissertação, sendo o programa em causa o *Ansys Fluent*.

Por fim, a figura 32 ilustra a modelação tridimensional obtida através do *Design Modeler* da tomada de pressão estática nº1.

### 4.3.2 Tomada de pressão estática nº2

A segunda e última tomada a ser apresentada, encontra-se representada na figura 30 e as medidas da mesma são:

- **Diâmetro maior**- 30 milímetros
- **Diâmetro menor**- 3 milímetros
- **Altura do arco**- 3 milímetros
- **Altura da tomada na totalidade**- 5 milímetros

A figura 33 reproduz a representação da tomada de pressão estática nº2 com as vistas do alçado principal e da planta, com as respectivas cotas.

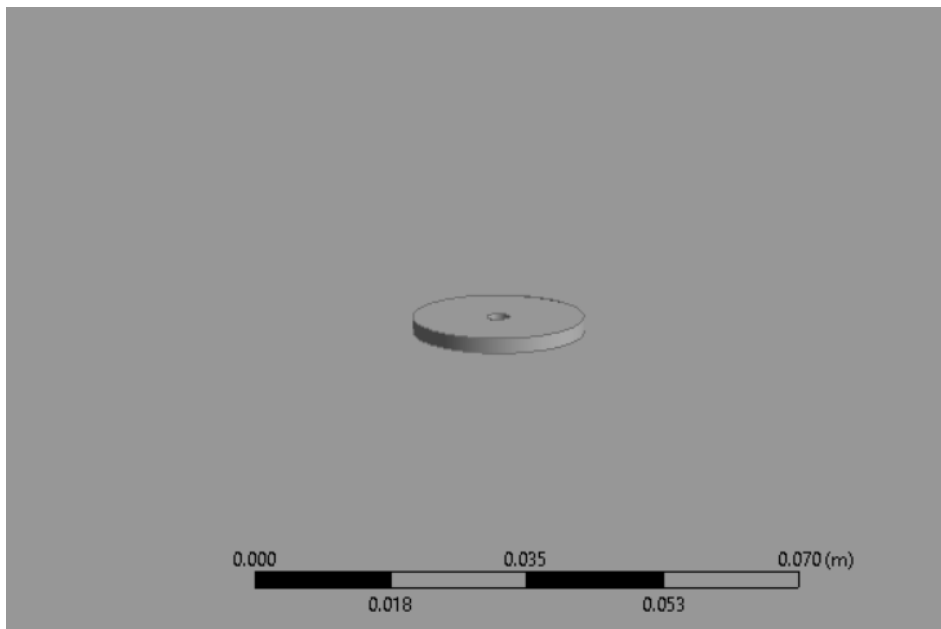


Figura 32- Ilustração tridimensional da tomada de pressão estática nº1

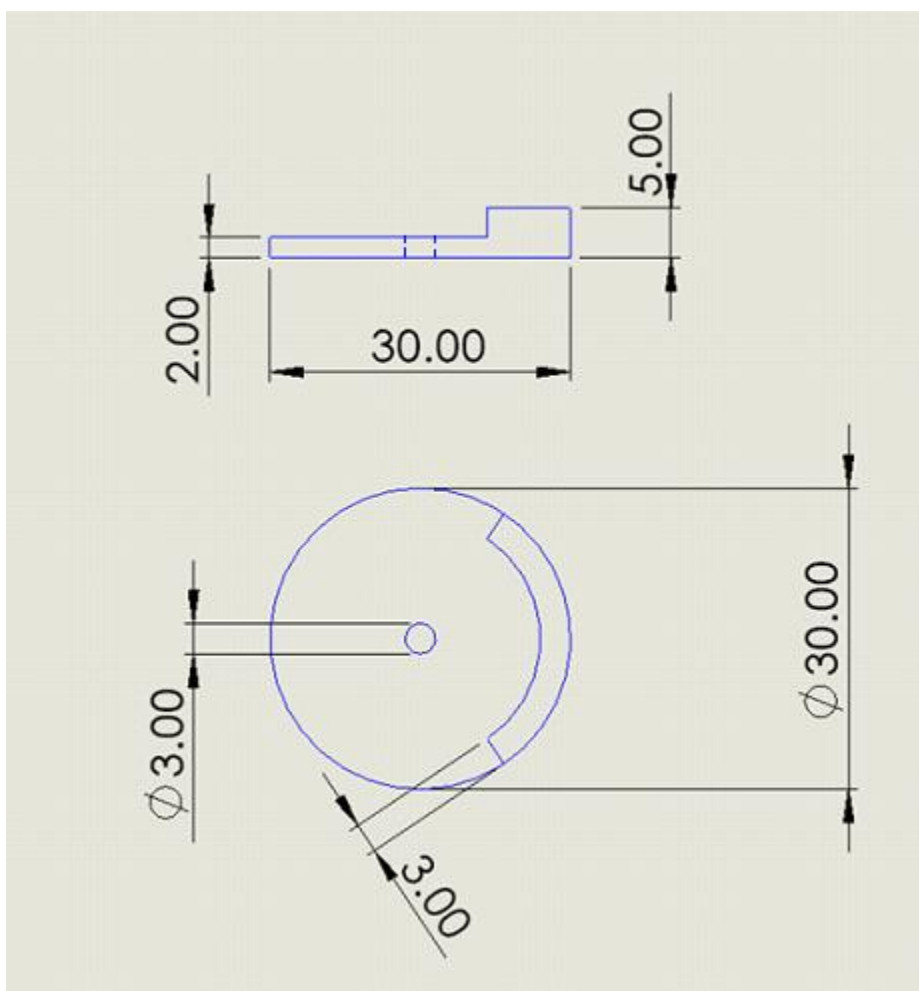


Figura 33- Representação bidimensional da tomada de pressão estática nº2

Posteriormente e de forma semelhante à tomada nº1, sabendo as medidas geométricas modelou-se tridimensionalmente a tomada de pressão estática nº2 através da ferramenta *Design Modeler* que se encontra incorporada no programa que foi utilizado para a realização desta dissertação.

Por fim, na figura 34 encontra-se a representação tridimensional obtida através do *Design Modeler* da tomada de pressão estática nº2.

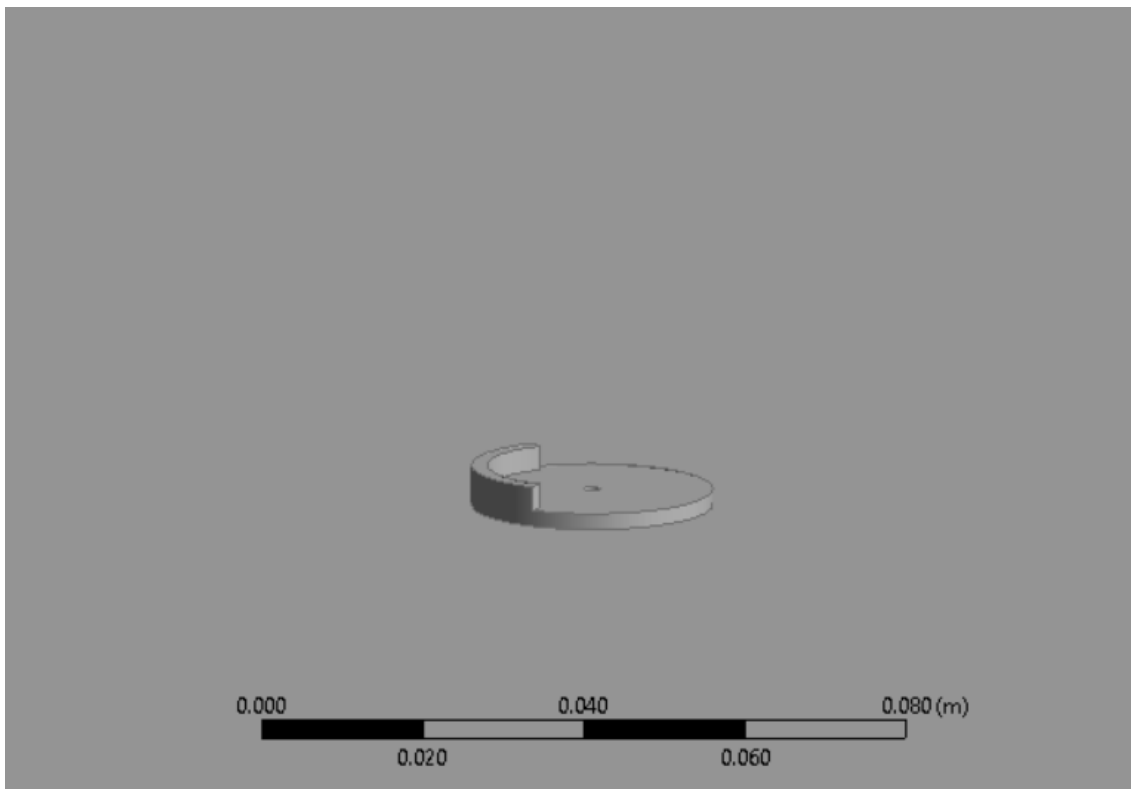


Figura 34- Ilustração tridimensional da tomada de pressão estática nº2

## 4.4 Domínio Computacional

De modo que um escoamento exterior de ar em redor de uma geometria construída possa ser estudado ou investigado, é necessário um domínio que envolva a geometria construída. Por esse motivo, é imprescindível que todas as paredes do domínio computacional estejam suficientemente distantes da tomada de pressão estática, para que assim não seja afetado o comportamento natural de um escoamento externo livre do ar ao redor de uma tomada de pressão estática.

À vista disso, optou-se por considerar uma distância de 20 vezes o comprimento do diâmetro para cada um dos lados da tomada. Estas dimensões são ideais pois assim o comportamento do escoamento natural do ar não é seguramente perturbado, todavia optou-se por um domínio computacional tão extenso visto que o computador em uso neste estudo permite suportar este poder computacional. No entanto, para computadores que não suportem tanto poder computacional apenas terá de ser cumprido a condição mínima para este tipo de estudos, que no caso será 5 vezes o comprimento do diâmetro, porém ainda assim é aconselhável, se possível, estender o domínio computacional. [22]

Portanto, o domínio computacional tem a forma de um prisma retangular com as medidas, no caso da tomada de pressão estática nº1, de 880 milímetros de comprimento, 880 milímetros de largura e por fim 440 milímetros de altura. Por outro lado, no caso da tomada de pressão estática nº2 as medidas são 1200 milímetros de comprimento, 1200 milímetros de largura e por fim 600 milímetros de altura no caso. Optou-se por diminuir em metade a altura para não sobrecarregar o poder computacional, pois em termos de altura do domínio computacional não faria diferença se fosse superior. Apenas estaria a sobrecarregar o computador sem que nenhum efeito proveitoso pudesse ser retirado. Os domínios computacionais da tomada de pressão estática nº1 e nº2 encontram-se representados na figura 35 e 36, respectivamente

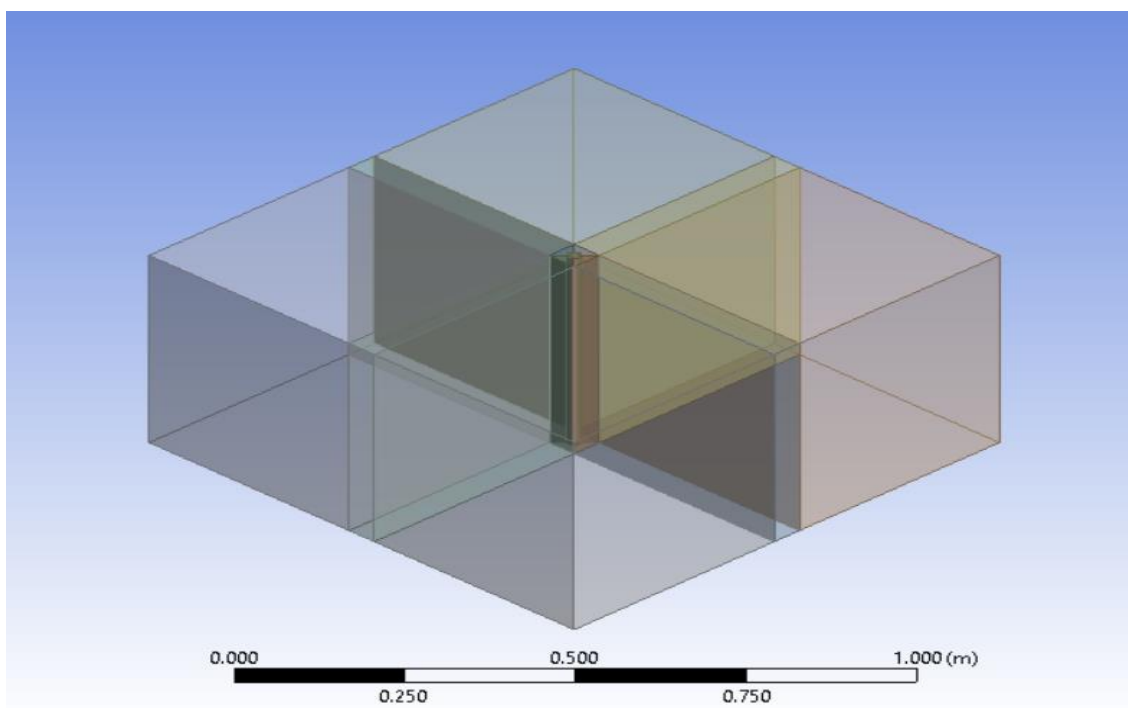


Figura 35- Domínio Computacional da tomada de pressão estática nº1

## 4.5 Divisão do domínio computacional

Com o intuito de obter uma malha suficientemente discretizada e de qualidade, e sabendo que neste projeto a malha pretendida será composta apenas por elementos hexaédricos (volumes com 6 faces), é fundamental dividir o domínio computacional em volumes cujo cada face dos mesmos contenha sempre quatro arestas, pois só garantindo a condição anterior é que se obtém uma malha estruturada usando o método dos volumes hexaédricos.

Obviamente que podia optar-se por não se dividir o domínio computacional, no entanto a malha obtida seria de menor qualidade e com elementos tetraédricos o que iria produzir resultados menos precisos e exatos.

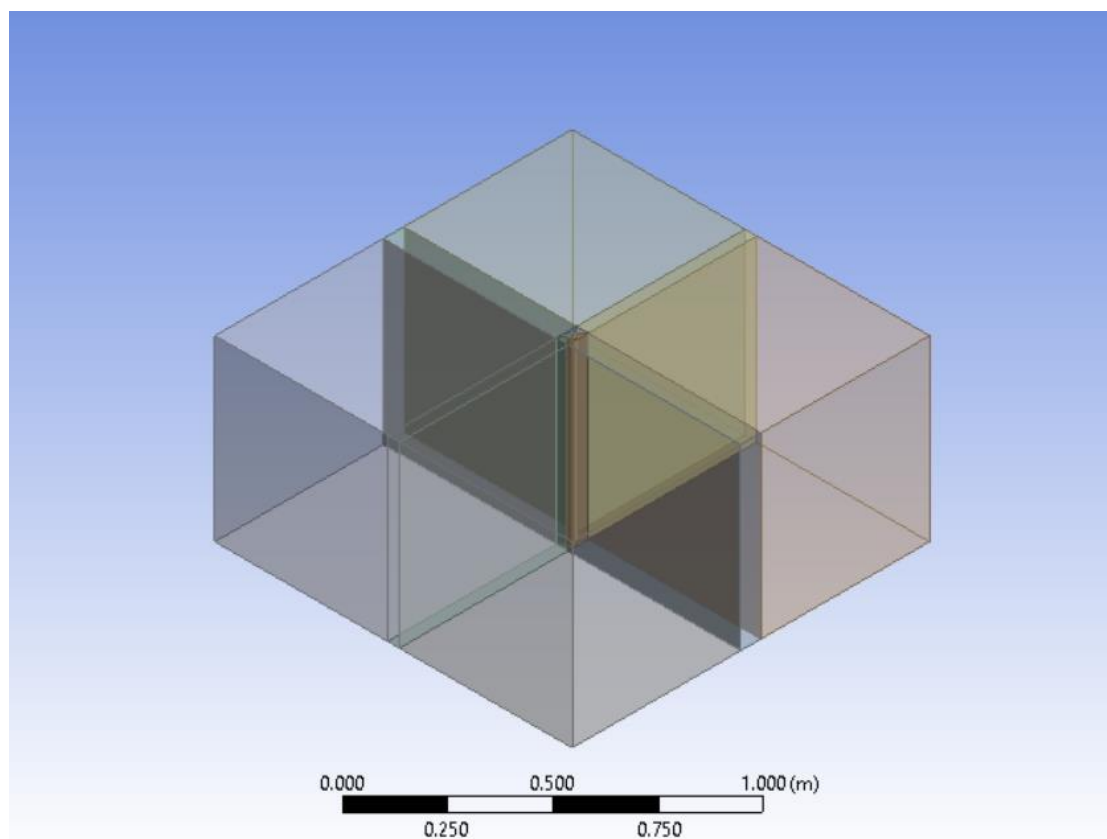


Figura 36- Domínio Computacional da tomada de pressão estática nº2

Todavia, este método de construção da malha com volumes hexaédricos, apesar de produzir resultados bastante mais satisfatórios também é um método profundamente mais complexo na conceção da malha, pois por vezes nem sempre é de forma imediata que se consegue dividir o domínio computacional em volumes cujo cada face contenha sempre 4 arestas. No entanto, este método de elaboração da malha requer um poder computacional bastante superior quando comparado com os elementos tetraédricos, porém os resultados produzidos aquando da execução das simulações são bastante mais satisfatórios.

Sendo assim, a tomada de pressão estática com o design nº1, foi dividida em 25 volumes ou *bodies*, onde cada face destes contém sempre 4 arestas para assim ser obtida uma malha estruturada e sempre com volumes hexaédricos, tal como será explicado e representado no subcapítulo seguinte. A divisão do domínio computacional da tomada com o design nº1

encontra-se ilustrada nas figuras 37 e 38, onde se denota que na zona onde é pretendida ser estudada a tomada, o domínio computacional encontra-se por sua vez mais dividido para assim essa zona poder ser mais discretizada. No caso da tomada de pressão estática com o design nº2, esta foi dividida em 29 volumes ou *bodies*, onde cada face destes contém também sempre 4 arestas, tal como a divisão anterior da tomada de pressão estática com o design nº1. À semelhança da tomada anterior, abaixo encontram-se as figuras 39 e 40 que retratam a divisão do domínio computacional, sendo a primeira uma imagem que demonstra a divisão do domínio de uma forma menos aproximada e a segunda como uma imagem onde se verifica que na zona importante para este estudo, a tomada de pressão estática, o domínio nessa zona está muito mais dividido pela razão supramencionada acima em relação à tomada com o design nº1.

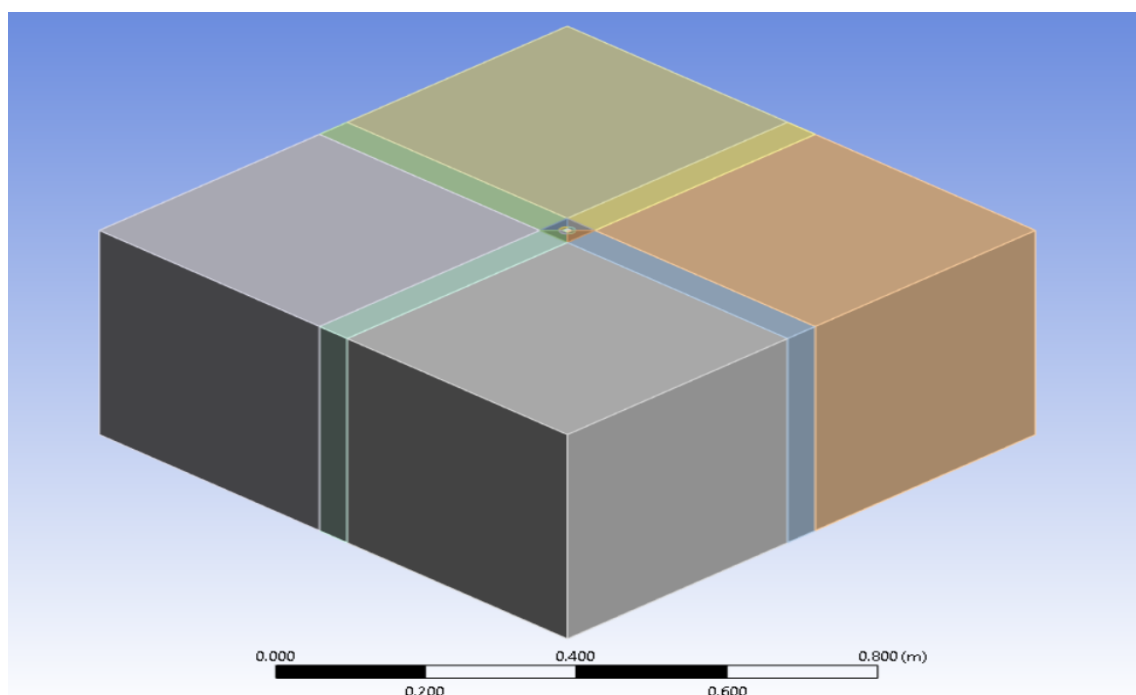


Figura 37- Divisão do domínio computacional da tomada nº1

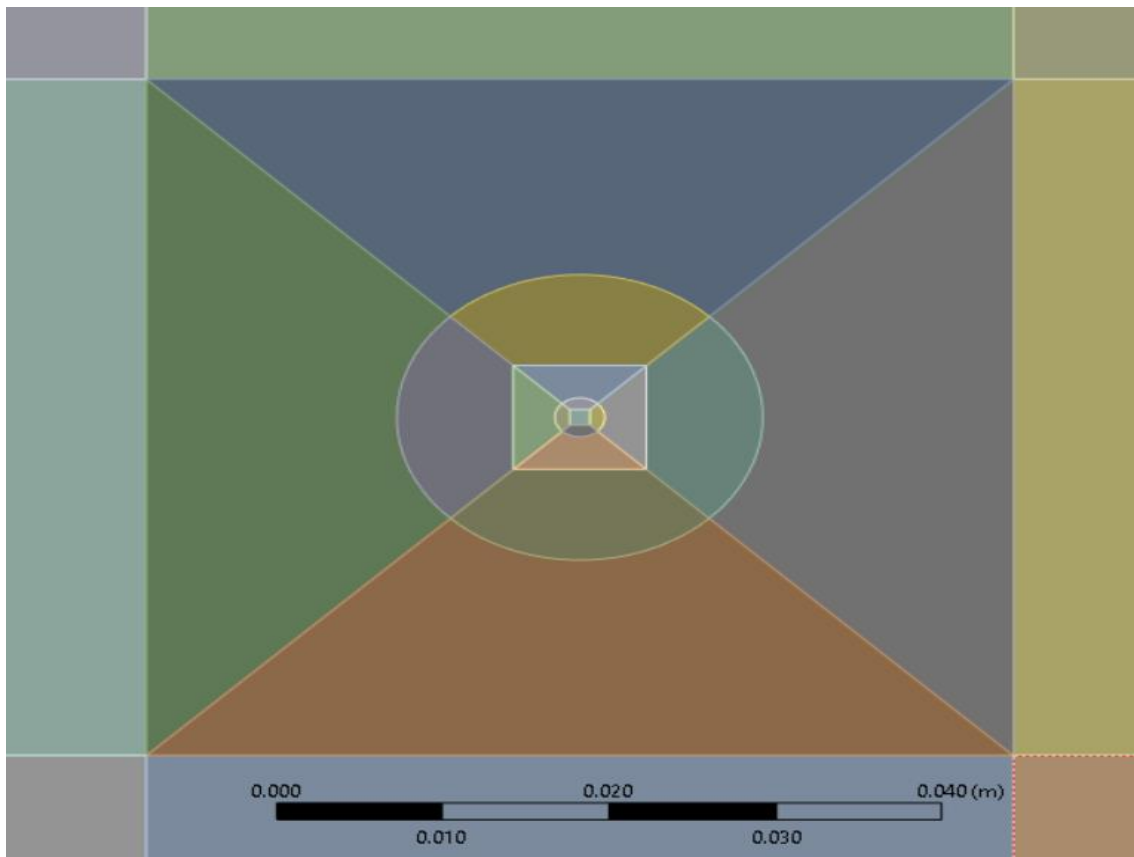


Figura 38- Divisão do domínio computacional da tomada n°1 mais aproximado da zona pretendida para este estudo

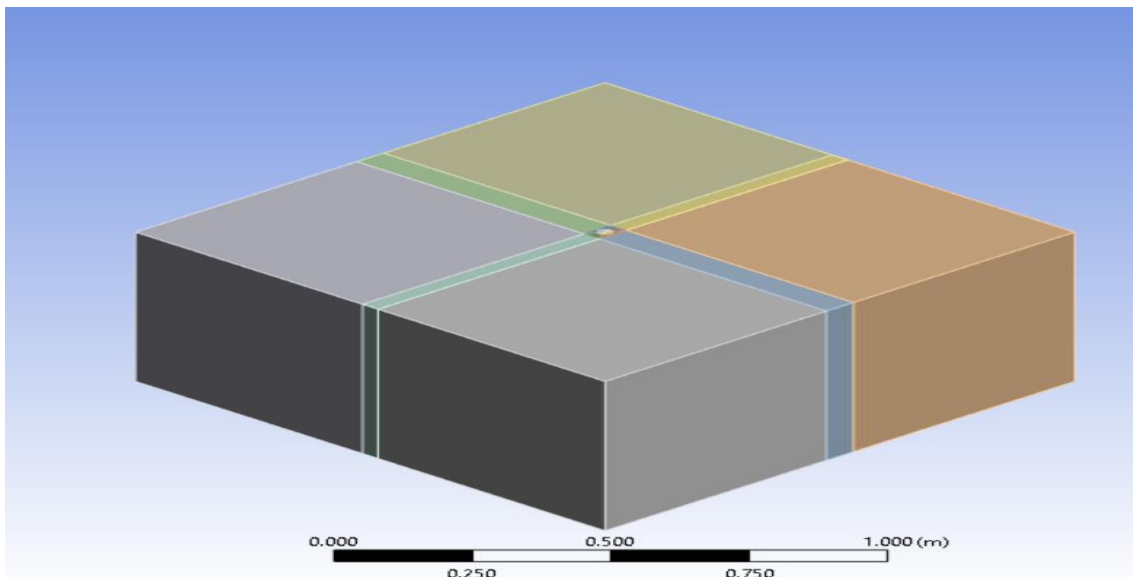


Figura 39- Divisão do domínio computacional da tomada n°2

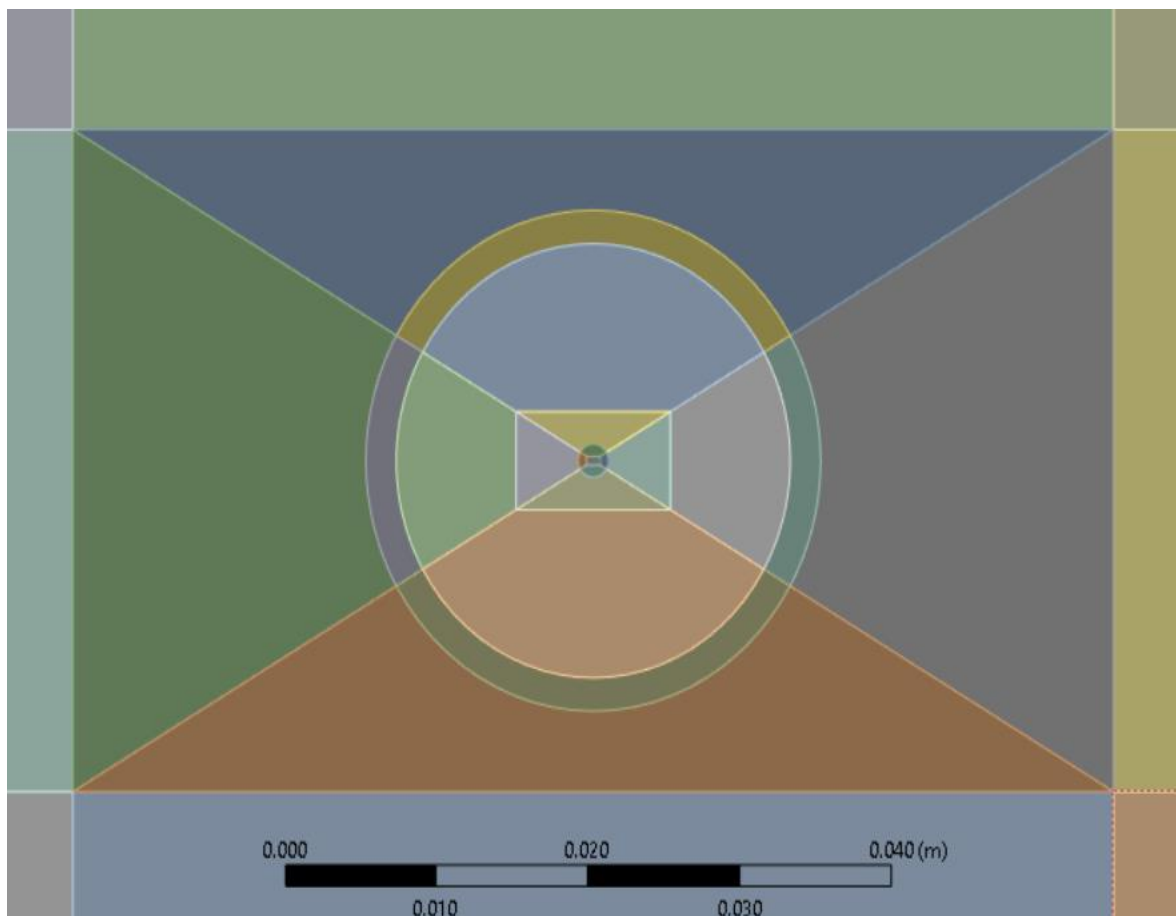


Figura 40- Divisão do domínio computacional da tomada n°2 mais aproximado da zona pretendida para este estudo

## 4.6 Análise da independência da malha

Como já anteriormente referido nesta dissertação, num estudo em mecânica dos fluidos computacional, quanto mais refinada a malha produzida for, mais precisos e exatos serão os resultados gerados pela malha, porém e como inúmeras vezes referido, uma malha bastante refinada provoca um incremento considerável no poder computacional.

À vista disso, é bastante importante e imprescindível fazer uma análise na malha de modo a ser criado um equilíbrio entre resultados precisos e um poder computacional praticável.

Para se atingir esse equilíbrio, importa primeiro criar uma malha com um número de elementos admissíveis e posteriormente averiguar os resultados obtidos nessa simulação. De seguida, cria-se outra malha exatamente igual, no entanto esta nova malha será mais densa

em elementos que a primeira malha e volta-se a averiguar os resultados. Por fim, irá aumentar-se a densidade da malha até que os resultados obtidos comecem a convergir para o mesmo valor, e através deste equilíbrio consegue-se concluir qual será a malha com o menor número de elementos, que por sua vez irá acarretar menos poder computacional e que irá produzir os mesmos resultados que as malhas mais densas e mais exigentes a nível de poder computacional.

Nesta dissertação e visto que existem duas tomadas de pressão estáticas cada uma com o seu design, efetuou-se o estudo da independência da malha para as duas geometrias, considerando o parâmetro em estudo a pressão dinâmica que entra em cada linha de pressão estática de cada uma das tomadas. Visto que nesta dissertação serão efetuadas simulações com várias velocidades, apenas será feito o estudo da independência de cada malha para uma determinada velocidade de escoamento exterior de ar. Uma vez garantida a independência das duas malhas para uma determinada velocidade, a independência da malha para outras velocidades estará implícita também.

Consequentemente, as malhas das duas tomadas de pressão estática foram criadas da seguinte forma:

- As arestas de cada volume do domínio computacional foram definidas através da ferramenta do *meshing* denominada *edge sizing*, cujo a mesma manipula o número de divisões que cada aresta irá ter, e também a diferença de tamanho que cada elemento terá na mesma aresta. Este comando torna-se bastante útil quando é necessário refinar uma zona importante no estudo em CFD
- Todas as faces dos volumes da malha foram definidas com um *face meshing*, de modo a garantir que não ocorriam grandes diferenças de tamanhos de elementos entre faces.

Tal como referido anteriormente, foi repetido este processo inúmeras vezes até se obter uma convergência nos resultados que por sua vez faria com que fosse atingida a independência da malha. Os gráficos que comprovam a independência das malhas para cada uma das tomadas encontram-se representados pelas figuras 41 e 42.

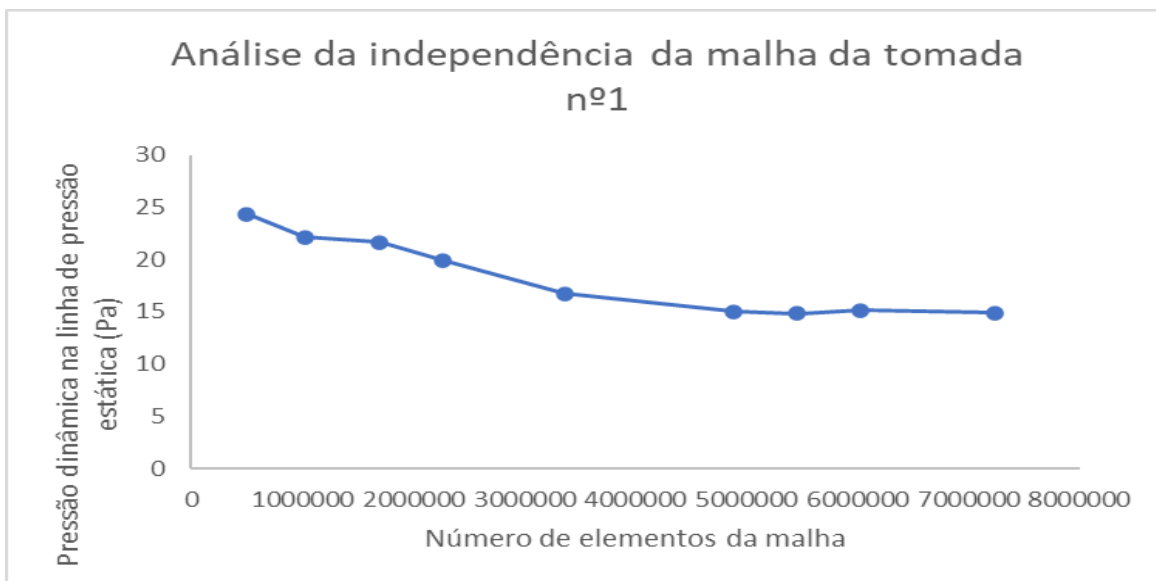


Figura 41- Análise da independência da malha da tomada de pressão estática n°1

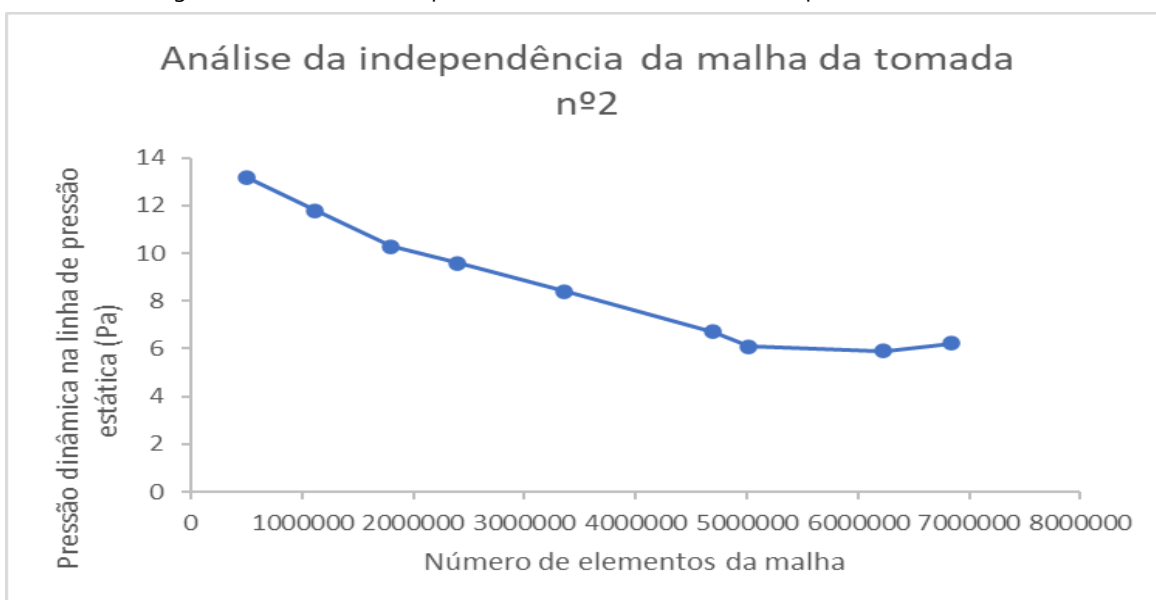


Figura 42- Análise da independência da malha da tomada de pressão estática n°2

Verifica-se então através dos gráficos acima que para a tomada de pressão estática n°1, o número ideal de elementos será cerca 4,5 milhões enquanto para a tomada de pressão estática n°2 o número ideal de elementos será aproximadamente 5 milhões, devido a que a partir desse número de elementos tornar a malha mais densa só iria requerer maior poder computacional enquanto os resultados seriam praticamente os mesmos. Por fim, com os gráficos representados acima verifica-se que a malha que será posteriormente apresentada encontra-se independente.

## 4.7 Malha

Após o estudo da independência da malha, concluiu-se então que o número de elementos da malha da tomada de pressão estática nº1 será de cerca 4.5 milhões de elementos enquanto a tomada de pressão estática nº2 terá cerca de 5 milhões de elementos, tal como referido no subcapítulo anterior. Abaixo encontra-se a apresentação das características de cada malha gerada para cada tomada de pressão estática.

### 4.7.1 Malha da tomada de pressão estática nº1

- Número de elementos- 4886700
- Qualidade mínima de ortogonalidade- 0,48  
Verifica-se que se encontra nos valores de referência de ortogonalidade entre 0 (mau) e 1 (perfeito)
- Qualidade máxima da assimetria- 0,62  
Verifica-se que se encontra nos valores de referência de assimetria entre 0 (perfeito) e 1 (mau)

As figuras 43, 44, 45, 46 e 47 que serão exibidas de seguida ilustram o aspeto exterior da malha, bem como algumas vistas mais detalhadas da mesma em zonas fulcrais do estudo. Encontram-se também exibidas figuras que representam tanto a ortogonalidade e assimetria em zonas complexas da geometria da tomada de pressão estática nº1.

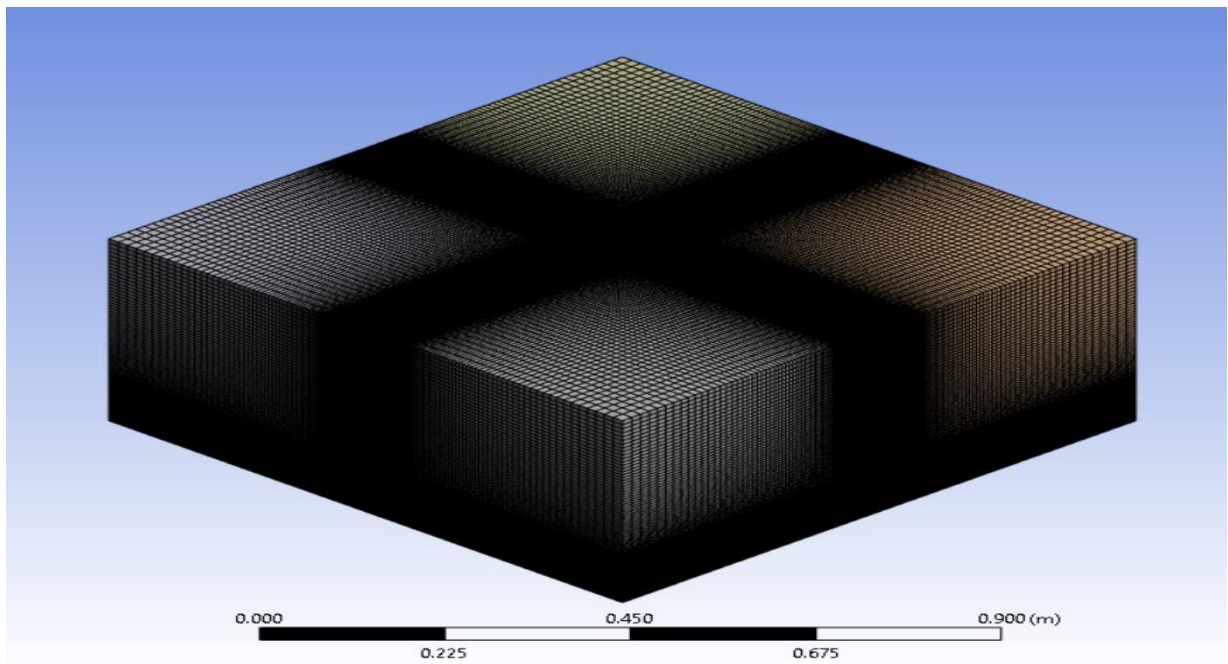


Figura 43- Perspetiva da malha gerada da tomada de pressão estática nº1

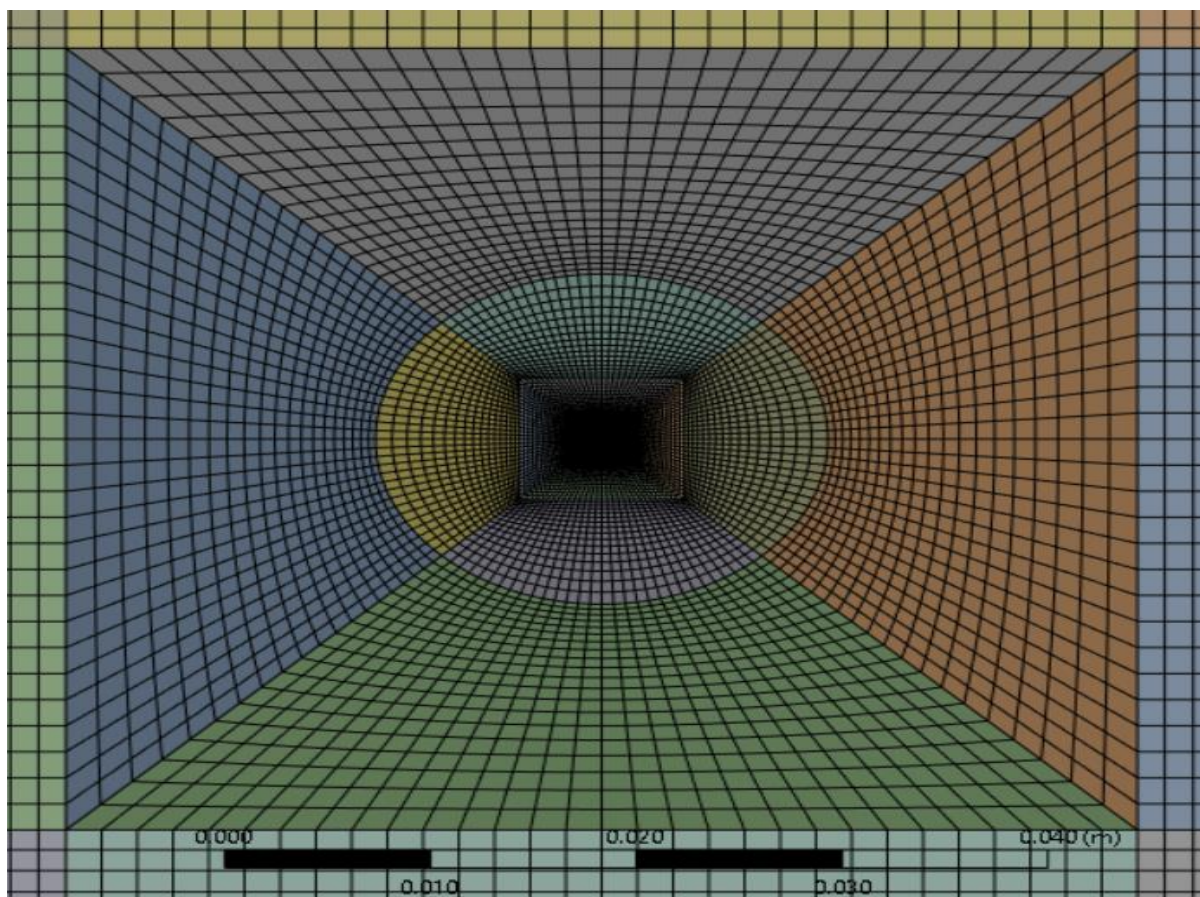


Figura 44- Vista aproximada da zona da tomada de pressão estática nº1 da malha gerada

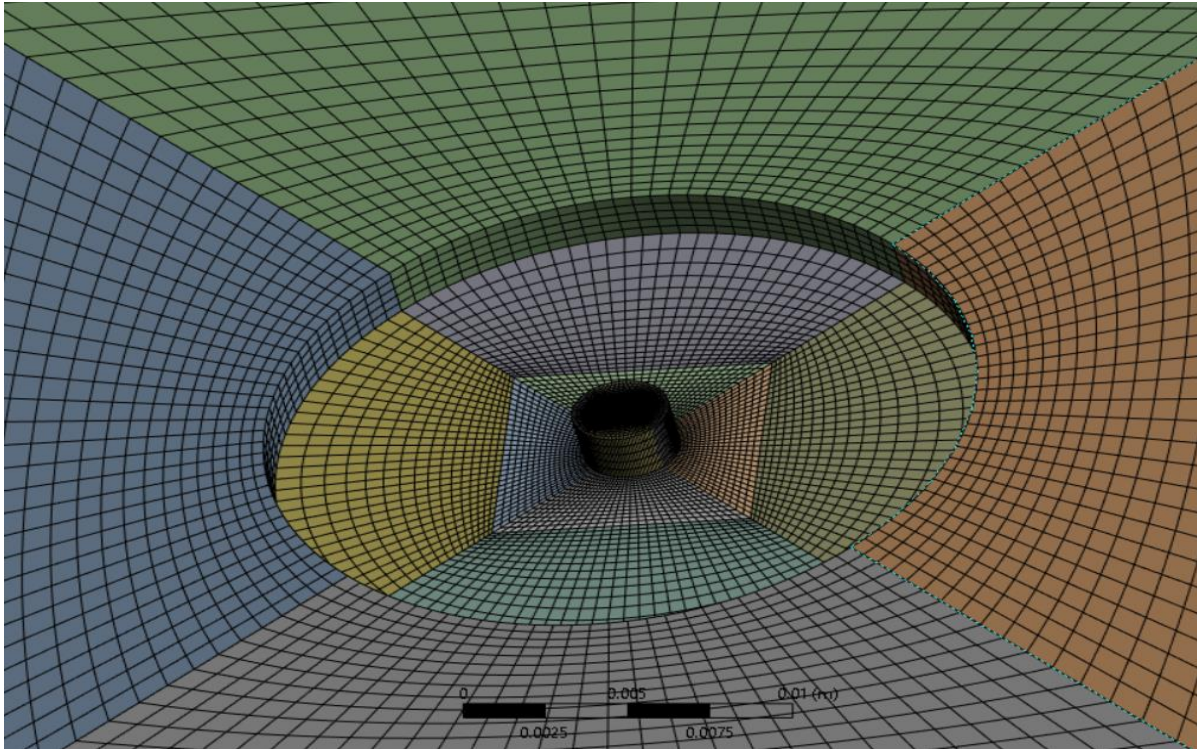


Figura 45- Pormenor interior da tomada de pressão estática nº1 da malha gerada

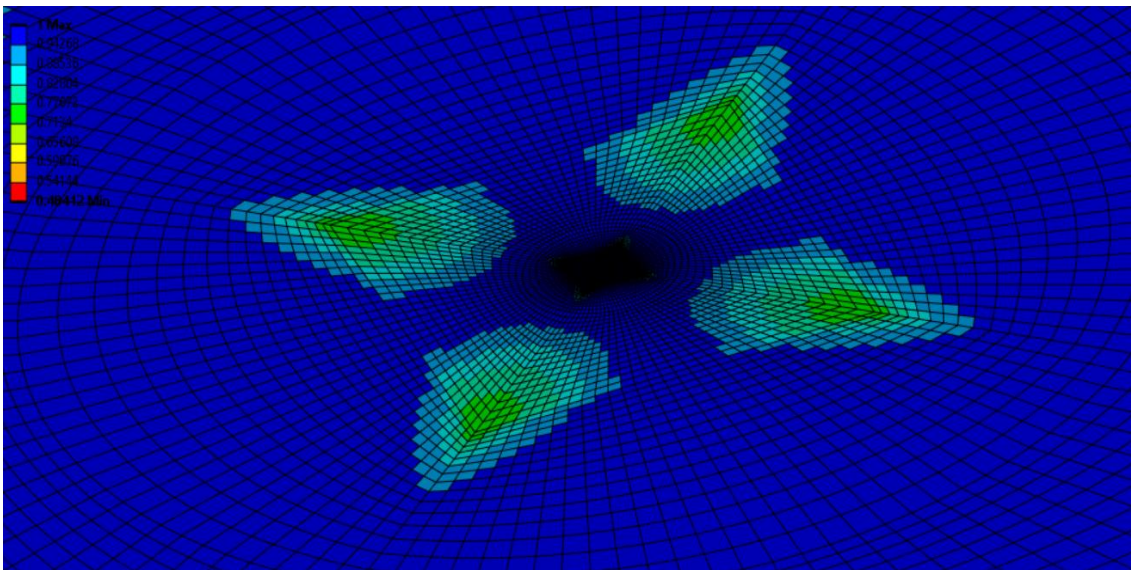


Figura 46- Ortogonalidade da malha da tomada de pressão estática nº1

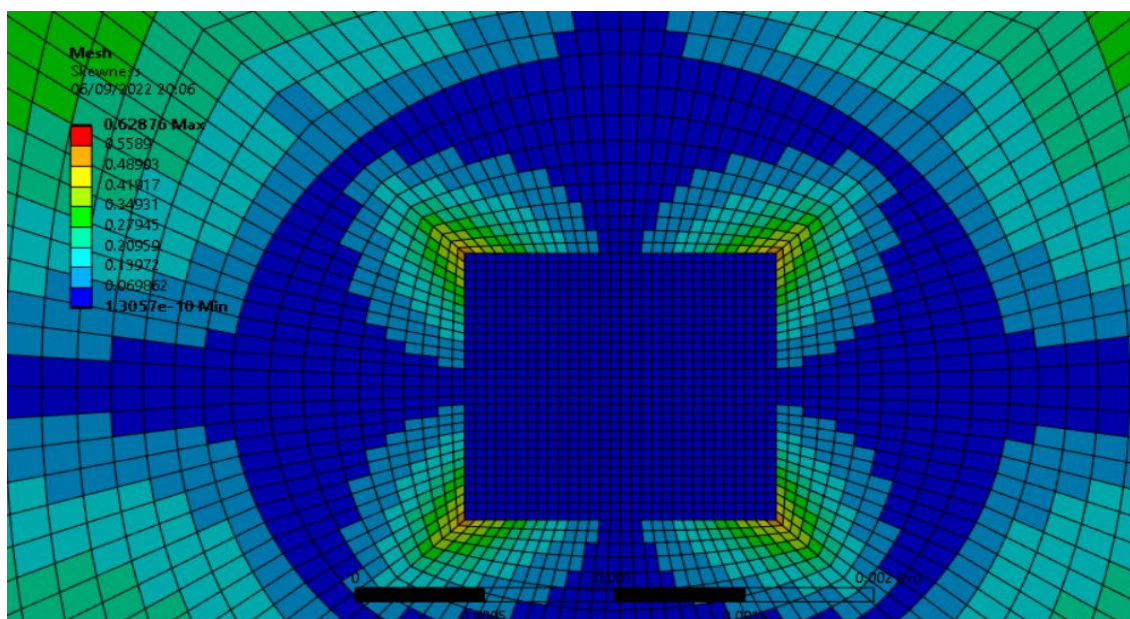


Figura 47- Assimetria da malha da tomada de pressão estática nº1

Como se verifica pelas imagens que representam a malha da tomada de pressão estática nº1, a mesma encontra-se estruturada na sua generalidade e na zona onde o estudo desta dissertação se irá focar, sendo então uma malha apta para simulações que irão produzir resultados precisos e exatos. Em relação aos parâmetros de qualidade, a ortogonalidade mínima encontra-se num valor satisfatório e a assimetria máxima ou *skewness* encontra-se também em valores aceitáveis. Todavia visto que a geometria em estudo é circular, é natural que existam elementos que sejam mais assimétricos que outros, ainda assim esses elementos não afetarão os resultados produzidos pelas simulações.

#### 4.7.2 Malha da tomada de pressão estática nº2

- Número de elementos- 5081288
- Qualidade mínima de ortogonalidade- 0,26  
Verifica-se que se encontra nos valores de referência de ortogonalidade entre 0 (mau) e 1 (perfeito)
- Qualidade máxima da assimetria- 0,79  
Verifica-se que se encontra nos valores de referência de assimetria entre 0 (perfeito) e 1 (mau)

As figuras 48, 49, 50, 51 e 52, à semelhança da tomada de pressão estática nº1, irão ilustrar o aspeto exterior da malha visto sem qualquer tipo de aproximação, bem como algumas vistas pormenorizadas da mesma em zonas essenciais para este estudo. Encontram-se também

exibidas figuras que representam tanto a ortogonalidade e assimetria em zonas complexas da geometria da tomada de pressão estática nº2.

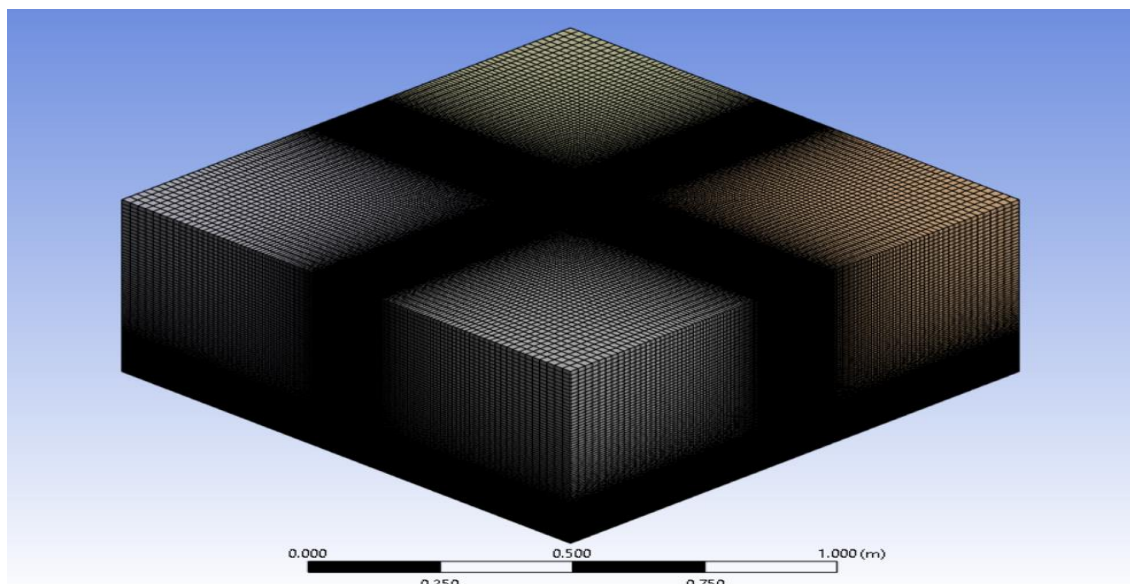


Figura 48- Perspectiva da malha gerada da tomada de pressão estática nº2

Analisando as figuras acima acerca da malha gerada para a tomada de pressão estática nº2, verifica-se que os valores de assimetria máxima são ligeiramente superiores aos valores obtidos na malha da tomada de pressão estática nº1, isto deve-se devido à complexidade que esta geometria impôs na divisão do domínio computacional, o que provocou com que existisse inúmeros quadriláteros com arestas arredadas, o que obviamente irá conduzir a elementos ligeiramente assimétricos junto a essas arestas. Ainda assim, tanto os valores da assimetria máxima como os valores da ortogonalidade mínima são bastante satisfatórios e encontram-se dentro dos intervalos de valores adequados para a execução de simulações que produzam resultados precisos e exatos. Todavia, a malha gerada para este tipo de tomada de pressão estática é uma malha que na sua totalidade está estruturada, ou seja, não existem elementos que não sejam hexaedros cada um com 4 arestas nas suas faces, e que também na zona principal para este estudo a malha encontra-se bastante refinada o que será essencial para a produção de bons resultados aquando da execução das simulações numéricas.

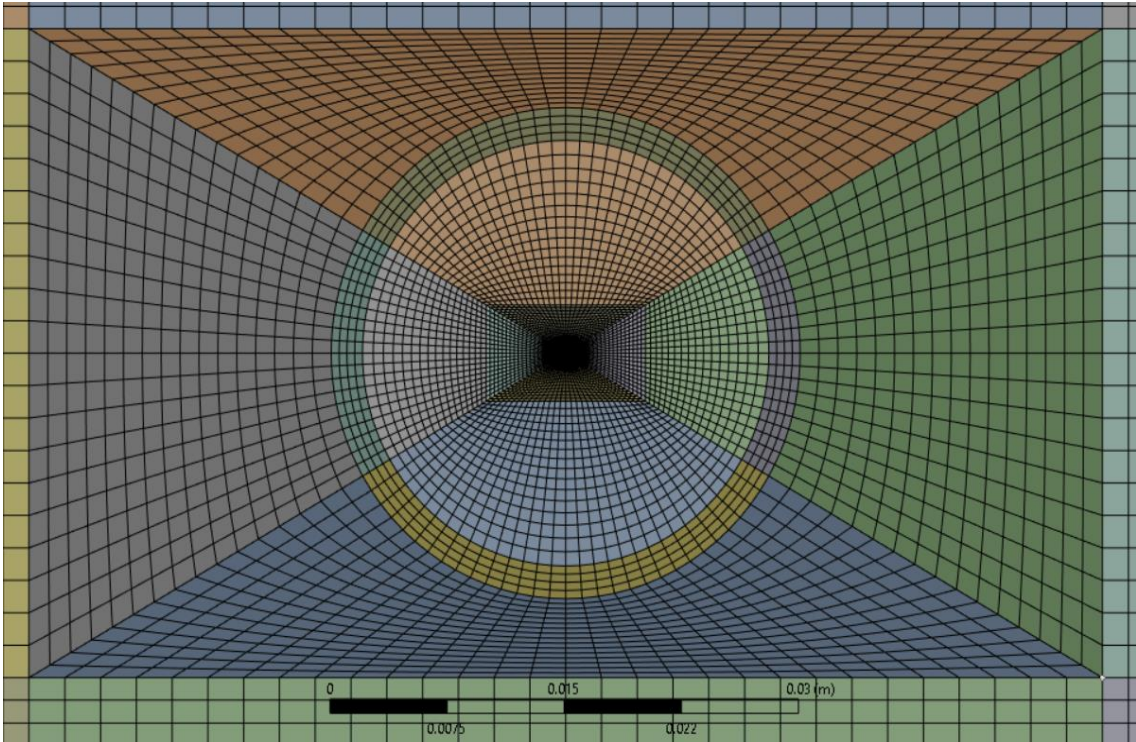


Figura 49- Vista aproximada da zona da tomada de pressão estática nº2 da malha gerada

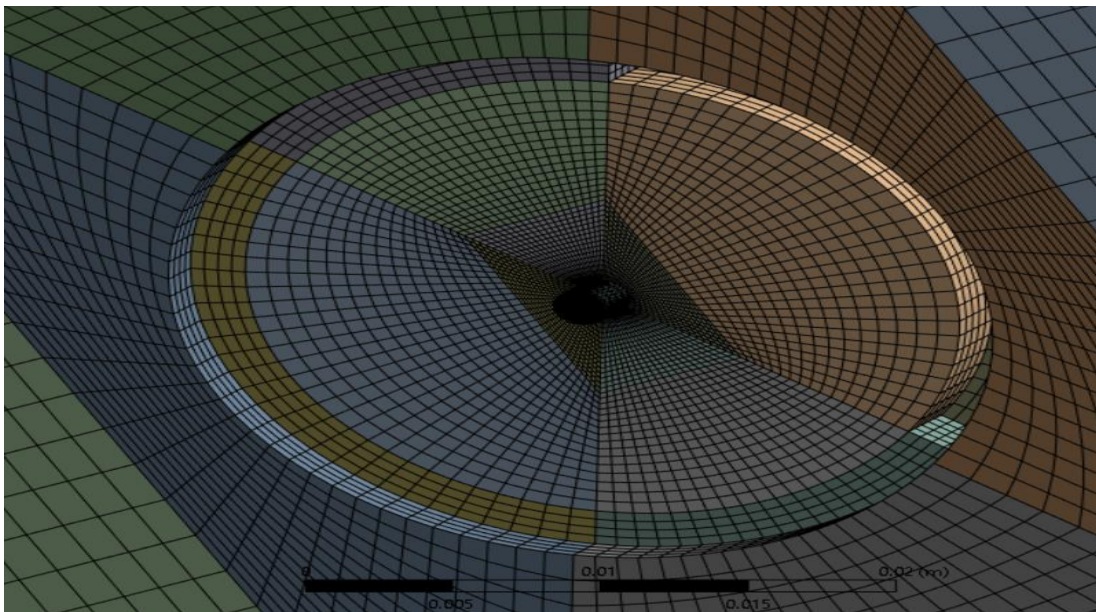


Figura 50- Pormenor interior da tomada de pressão estática nº2 da malha gerada

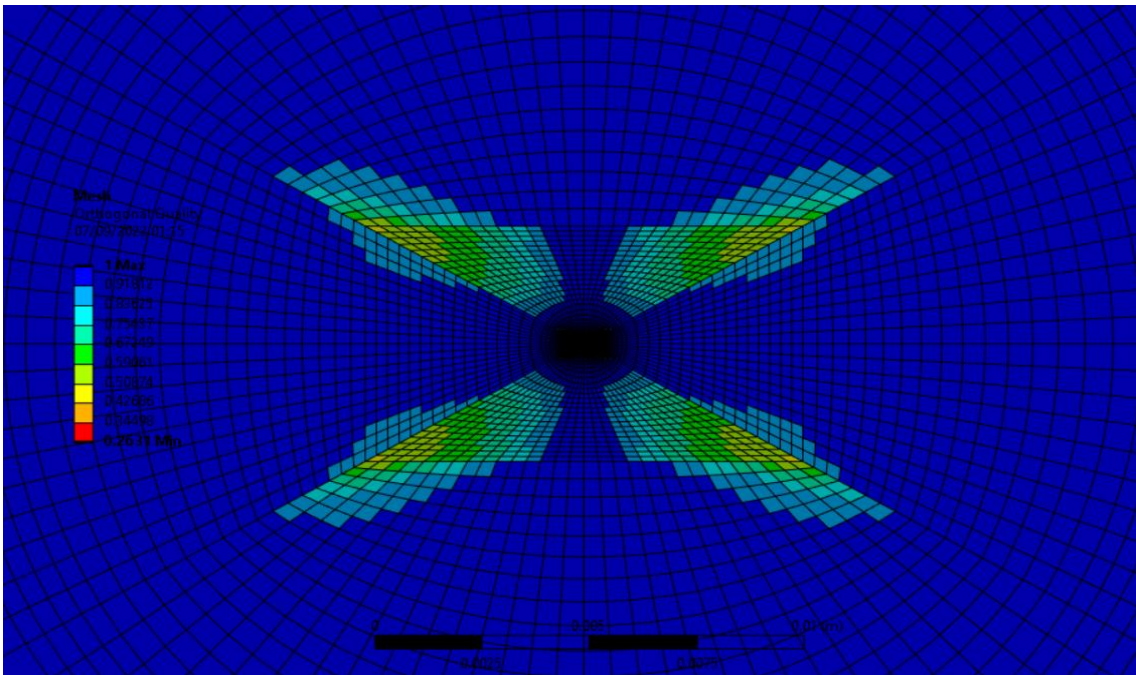


Figura 51- Ortogonalidade da malha da tomada de pressão nº2

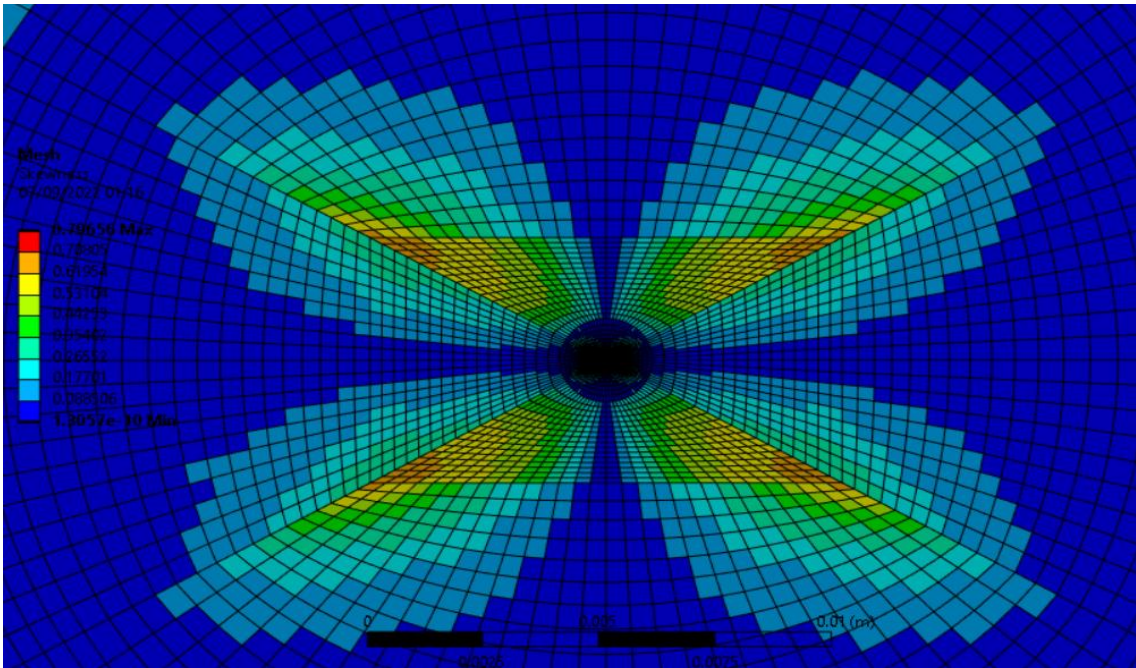


Figura 52- Assimetria da malha da tomada de pressão nº2

Na produção de ambas as malhas, o processo para as conceber de forma estruturada foi bastante semelhante, nomeadamente começou-se por dividir o seu domínio computacional que é condição essencial para obter uma malha composta por hexaedros. Através dessa

divisão efetuou-se o refinamento de cada aresta de cada face do volume hexaédrico, dando maior ênfase às zonas fulcrais em estudo sendo as mesmas o centro da tomada de pressão estática que é a zona onde será focada esta dissertação. Ao redor do centro das tomadas de pressão estática não foi necessário refinar tanto pois são zonas que não serão significativas para este estudo, sendo essa razão pela qual os elementos ao redor do centro serem de dimensão bastante superior.

O maior refinamento no centro das tomadas de pressão estática deve-se a que quanto maior for o número de elementos que existam na zona fulcral para este estudo maior será a precisão e exatidão dos resultados, pois haverá mais células que irão resolver as equações de transporte para o modelo de turbulência escolhido, fazendo com que ocorra menos diferenças de resultados na execução das simulações.

## 4.8 Condições de simulação e condições de fronteira

Com o propósito de iniciar uma simulação é fundamental que a globalidade das variáveis envolvidas nessa simulação seja devidamente definida.

Com isto, optou-se por eleger as condições que mais se assemelham a uma situação de voo cruzeiro do Tecnam P2008, isto é, com asas niveladas e sem ângulo de ataque e também com o nariz paralelo ao horizonte. Portanto numa situação de cruzeiro tal como referida na frase anterior, serão consideradas quatro velocidades sendo estas 50 m/s (97 kts), 60 m/s (116 kts), 70 m/s (136 kts) e 80 m/s (155 kts); a viscosidade dinâmica do ar que considerada será  $1,764 \times 10^{-5}$  kg/ms; e a massa volúmica do escoamento livre do ar será de  $1.14 \text{ kg/m}^3$ . Optou-se por simular o escoamento com vários tipos de velocidade para verificar o comportamento de cada tomada de pressão estática com o incremento sucessivo da velocidade.

Para se efetuar uma simulação em CFD, além de ter de se definir todas as variáveis que envolvam a simulação é também necessário, e imprescindível instituir condições de fronteira em todo o seu domínio computacional. Nestas simulações todas as condições de fronteira são fixas e tomam um papel fundamental no desenrolar de cada simulação.

Visto que nesta dissertação existem duas malhas devido ao facto de existirem dois designs de tomadas de pressão estática diferentes, serão então apresentadas as condições de fronteira em cada uma das malhas.

Começando pela malha respectiva à tomada de pressão estática nº1, está irá conter fronteiras denominadas por *inlet*, *outlet*, *wall* e *tomada*, que se encontram representadas pelas figuras 53, 54, 55 e 56.

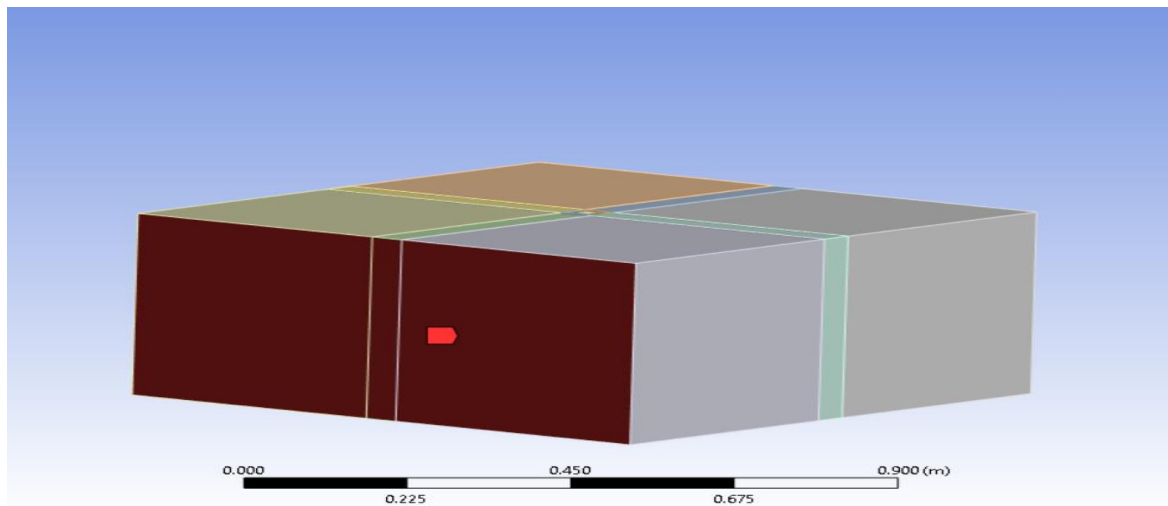


Figura 53- Vista da condição de fronteira do inlet da tomada de pressão estática nº1

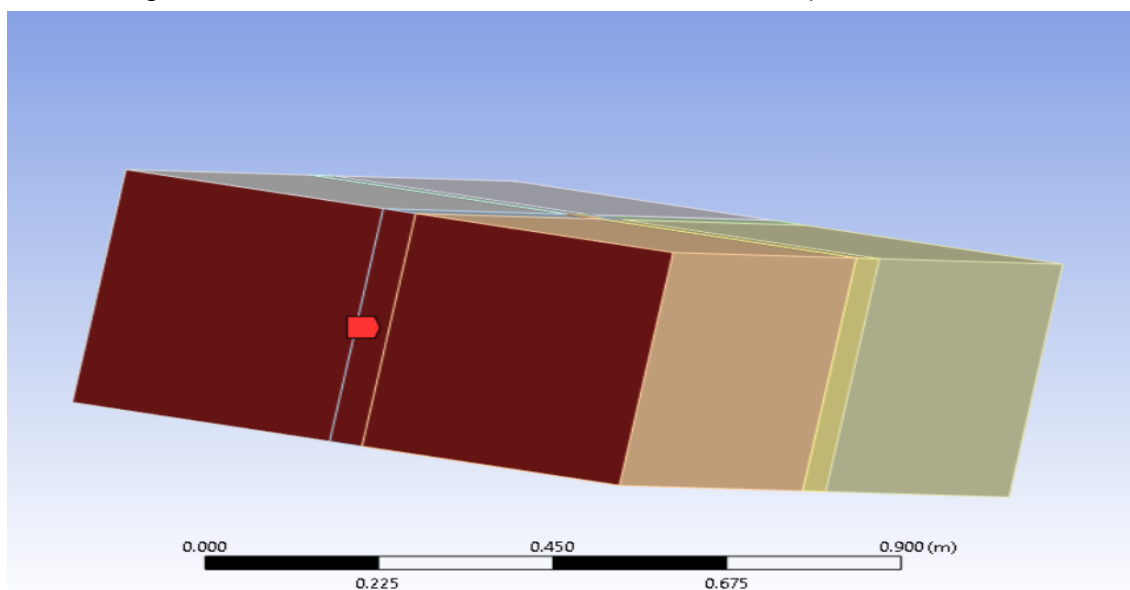


Figura 54- Vista da condição de fronteira outlet da tomada de pressão estática nº1

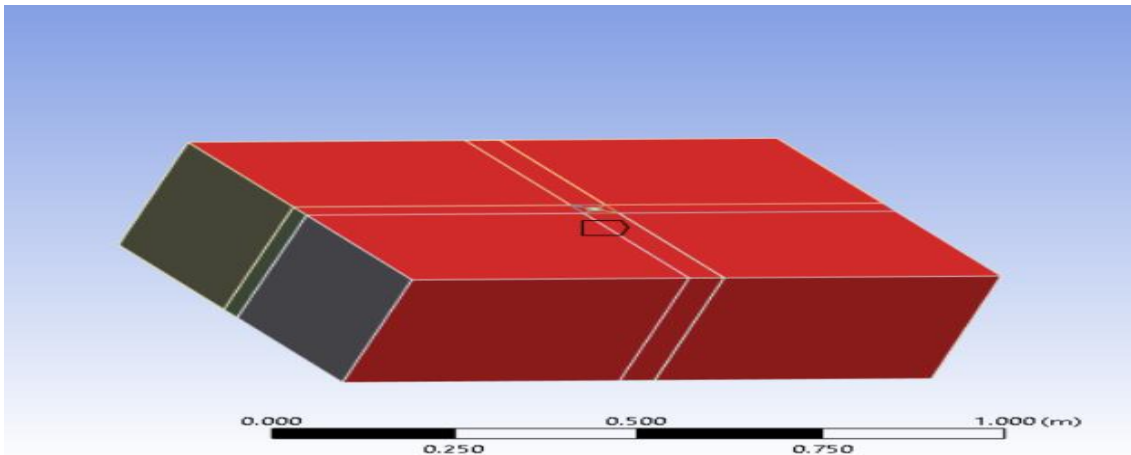


Figura 55- Vista da condição de fronteira wall da tomada de pressão estática nº1

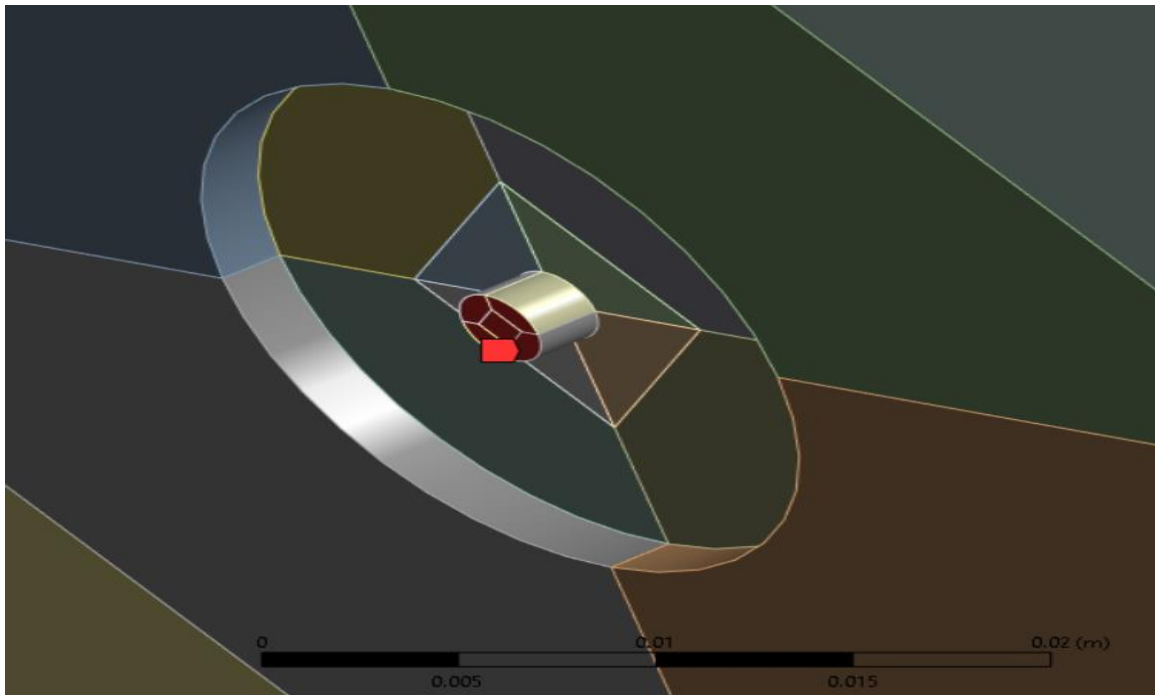


Figura 56- Vista da condição de fronteira "tomada" da tomada de pressão estática nº1

Em relação à tomada de pressão estática nº2, esta terá condições de fronteira com as mesmas denominações da tomada anterior, porém algumas fronteiras não serão exatamente iguais. Tal como anteriormente, as figuras 57, 58, 59 e 60 representam as condições de fronteira neste estudo para a tomada de pressão estática nº2.

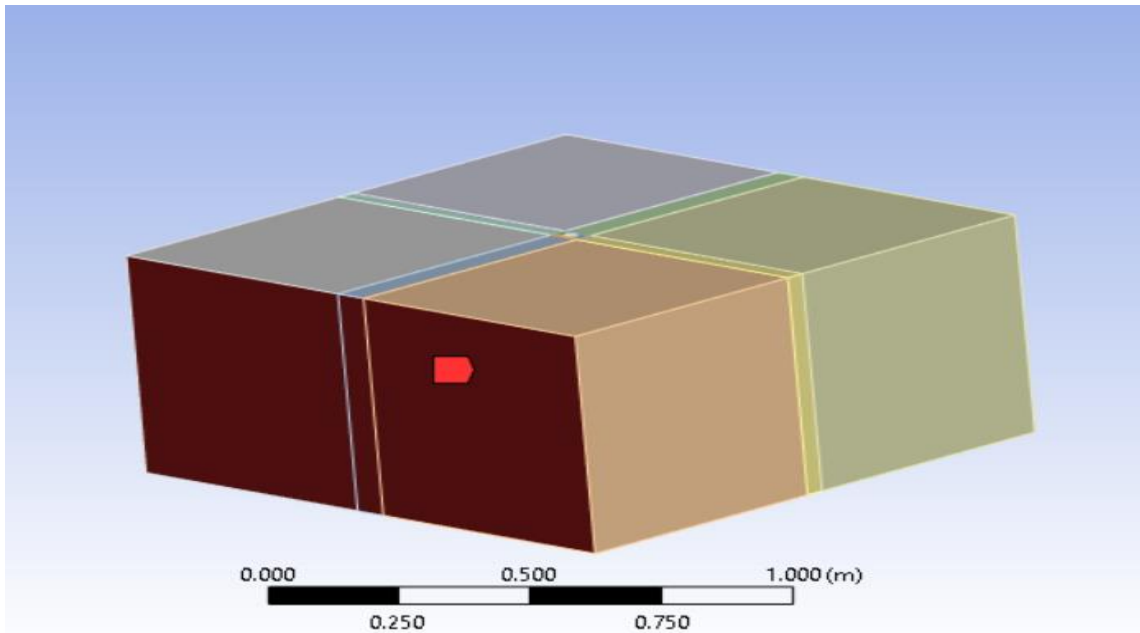


Figura 57- Vista da condição de fronteira inlet da tomada de pressão estática n°2

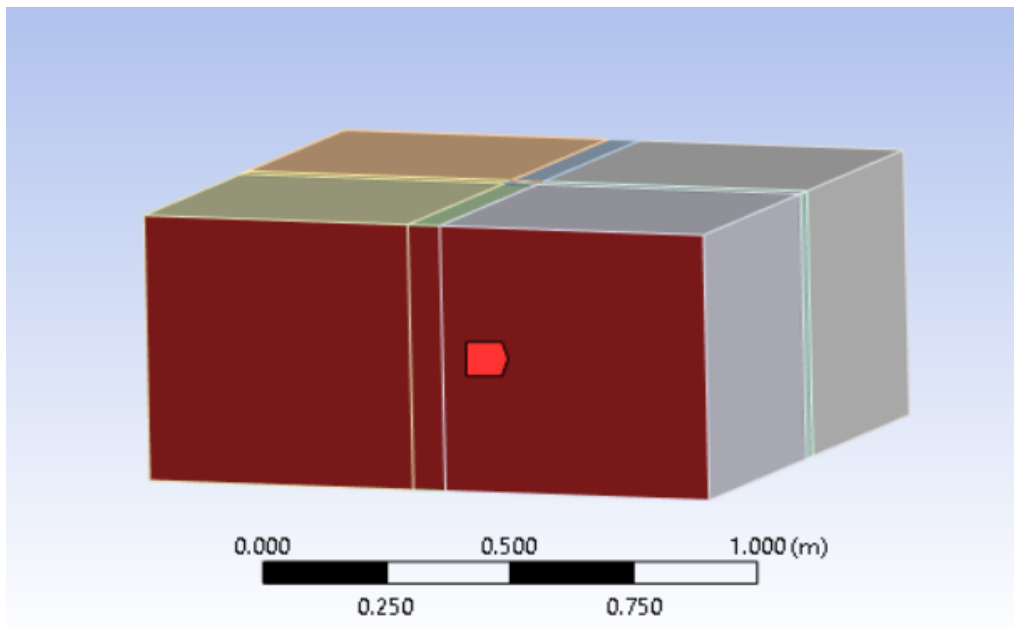


Figura 58- Vista da condição de fronteira outlet da tomada de pressão estática n°2

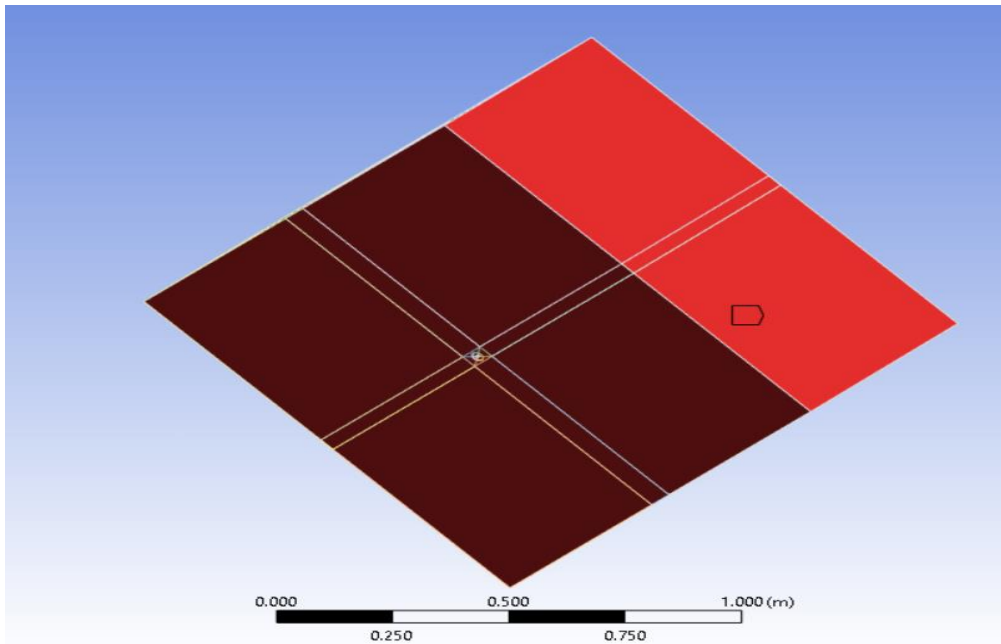


Figura 59- Vista da condição de fronteira wall da tomada de pressão estática nº2

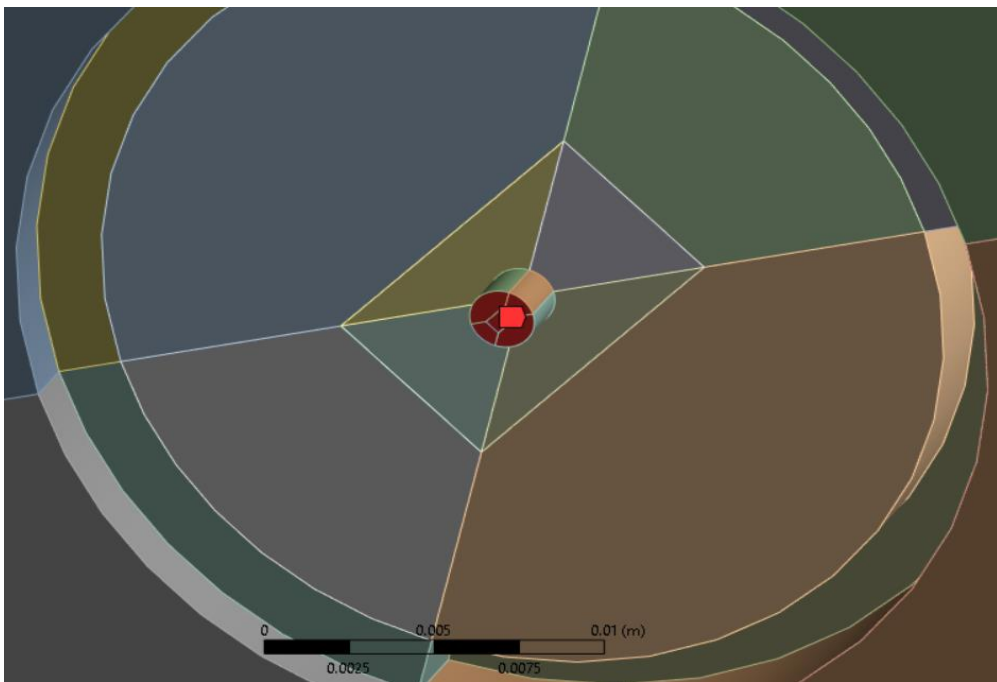


Figura 60- Vista da condição de fronteira "tomada" da tomada de pressão estática nº2

Portanto visto que este estudo irá servir para comparar a eficácia de cada tomada de pressão estática na prevenção da entrada de pressão dinâmica, faz sentido que as condições de fronteira com o mesmo nome em ambas as tomadas de pressão estática, possuam a mesma função.

Por esse motivo, a condição de fronteira denominada *inlet* será definida como um *velocity-inlet* com um módulo de 50 m/s, 60 m/s, 70 m/s e 80 m/s e com direção normal à face que define o *inlet*, de forma a reproduzir as condições de cruzeiro do Tecnam P2008. A fronteira *outlet* servirá apenas como um *pressure-outlet* de 0 pascal. Já a fronteira *wall* serve para definir o limite de circulação do escoamento. Por fim, a fronteira "tomada" serve para retirar os valores de pressão dinâmica naquela região que é justamente a região principal neste estudo, onde se encontra a linha de pressão estática, e que servirá para comparar os valores obtidos entre tomadas, e para assim se observar as diferenças também dos valores obtidos com os incrementos da velocidade do escoamento do ar.

Uma vez que este estudo vai ter como suporte principal simulações numéricas com base nas equações de RANS, o  $y^+$  deverá ser adequado para o estudo pretendido. Como será expectável quanto menor o  $y^+$  mais preciso será o estudo, sendo o valor perfeito de  $y^+$  de 1, porém esse valor torna-se bastante complicado de alcançar tendo em conta o poder computacional que é exigido para alcançar tal valor de  $y^+$ .

Por essa razão e visto que o objetivo deste estudo é obter os valores da pressão dinâmica junto à condição de fronteira "tomada", optou-se por um  $y^+$  que estivesse dentro da subcamada viscosa para se obter resultados precisamente junto à parede, ou seja junto à fronteira "tomada", daí em todas as malhas desta dissertação o  $y^+$  ser sempre inferior a 5, para assim ser cumprido o requisito de se conseguir obter resultados na subcamada viscosa. Logicamente que um  $y^+$  tão pequeno irá requerer não só um tempo de processamento bastante elevado assim como um adequado poder computacional, porém a condição do  $y^+$  encontrar-se dentro da subcamada viscosa é fulcral para o desenvolvimento desta dissertação.

Por fim, e visto que este caso de estudo envolve um escoamento incompressível e estacionário, optou-se pela utilização do *pressure-based solver*. Este tipo de *solver* tem a particularidade de utilizar um algoritmo que resolve as equações governativas de forma sequencial, pois as mesmas são equações não-lineares e acopladas por isso a solução obtida tem de ser iterativa de forma a se atingir uma convergência nas soluções. Neste tipo de algoritmo cada equação governativa é resolvida para uma determinada variável da equação em todos os seus elementos, seguidamente essa mesma equação é então resolvida para outra variável e assim sucessivamente até que todas as variáveis tenham sido resolvidas e obtidas, não obstante a equação da continuidade apenas será obtida através da resolução de uma equação para a correção da pressão. [23]

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

No presente capítulo serão abordados e discutidos todos os resultados obtidos de todas as simulações numéricas efetuadas, de forma a conseguir-se obter conclusões em relação à tomada de pressão estática mais eficaz na prevenção da entrada de pressão dinâmica na linha de pressão estática.

Assim sendo, irá se começar pela validação e verificação dos resultados numéricos obtidos através de referências bibliográficas, que foram abordadas no capítulo 2 que diz respeito à revisão bibliográfica.

De seguida serão analisados separadamente os resultados obtidos em cada tomada de pressão estática, onde será averiguada a influência que o incremento da velocidade do escoamento exterior livre do ar provoca nos parâmetros em estudo nesta dissertação, sendo eles a pressão dinâmica junto à linha de pressão estática e a magnitude de vorticidade a que o escoamento fica sujeito.

Posteriormente, será efetuada também uma comparação dos resultados obtidos entre os dois designs de tomada de pressão estática, de modo a averiguar-se qual a tomada de pressão estática que será mais eficaz na prevenção da entrada de pressão dinâmica na linha de pressão estática.

Através dessa comparação será possível concluir qual das tomadas será a mais indicada para ter no avião, de modo que assim ocorram menos erros de leitura de pressão estática nas tomadas de pressão estática.

### 5.1 Verificação de resultados

Como mencionado anteriormente, este capítulo será iniciado pela validação e verificação dos resultados pois só assim se consegue garantir que as simulações numéricas irão reproduzir resultados fiáveis. Para além disso, só após a verificação e validação dos resultados é que faz sentido realizar uma análise e comparação dos resultados obtidos nas simulações numéricas.

Portanto, visto que esta dissertação assenta num estudo de geometrias de tomadas de pressão estática, tentou-se encontrar este tipo de geometrias em referências bibliográficas, no entanto sem sucesso. Todavia encontrou-se inúmeros estudos de escoamentos turbulentos ao redor de cilindros, contudo o parâmetro adimensional que se encontrava nestes estudos, sendo este o quociente entre a altura do cilindro e o seu diâmetro, não era adequado com nenhuma das tomadas de pressão estática. Primeiramente, porque a tomada de pressão estática nº2 difere bastante na sua forma em relação a um cilindro, e também porque a tomada de pressão estática nº1 apesar de ter uma forma similar a um cilindro, o seu quociente entre a sua altura e o seu diâmetro é bastante diminuto, pois a mesma tem a forma de um disco achatado. Além disto, ambas as tomadas de pressão estática possuem um pequeno furo que diz respeito à linha de pressão estática, furo esse que não se encontra presente em nenhum dos cilindros dos estudos anteriormente mencionados. Paralelamente a este facto, visto que esta dissertação irá conter simulações com diversas velocidades, e por sua vez com diversos números de Reynolds, também não foi possível encontrar estudos com a singularidade destes inúmeros números de Reynolds.

Portanto desta forma, de modo a colmatar a falta da existência de uma referência bibliográfica quantitativa que pudesse validar os resultados obtidos, devido à especificidade das geometrias em estudo, e também à singularidade dos inúmeros números de Reynolds, optou-se por validar e verificar os mesmos de maneira qualitativa.

Isto é, nos resultados que no próximo subcapítulo serão apresentados, os parâmetros em estudo serão a pressão dinâmica e a magnitude de vorticidade e como se irá observar tanto a pressão dinâmica como a magnitude de vorticidade irão se relacionar diretamente com um subcapítulo da revisão bibliográfica, sendo este a geração e desprendimento dos vórtices. Esta relação acontece, pois como se irá verificar tanto a pressão dinâmica como a magnitude de vorticidade aumentam com o incremento da velocidade, e que a geração e o desprendimento dos vórtices acontecerão justamente na zona descrita anteriormente na revisão bibliográfica, sendo essa zona a jusante do cilindro no caso da tomada de pressão estática nº1, e nas pontas aguçadas no caso da tomada de pressão estática nº2.

Ainda assim, e tal como várias vezes mencionado no decorrer desta dissertação, de forma a serem obtidos resultados exatos e precisos é fundamental que exista uma malha que se encontre devidamente discretizada e de qualidade, e a forma de verificar-se o facto anterior reside em analisar a convergência da malha aquando da execução da simulação. Neste estudo, verificou-se que para cada simulação existia uma convergência absolutamente definida o que corrobora que os resultados obtidos para cada uma das simulações são resultados exatos e

precisos. As figuras 61 e 62 demonstram a convergência presente nas simulações da tomada de pressão estática nº1 e da tomada de pressão estática nº2, ambas as figuras ilustram simulações com o escoamento exterior livre do ar a deslocar-se a 50 m/s.

Como se observa nas escalas de resíduos, tanto os resíduos da equação da continuidade, como os resíduos de  $k$  e  $\omega$  apresentam uma convergência bastante definida.

Em suma, concluiu-se assim que o modelo numérico está corretamente discretizado, visto que tanto os parâmetros em estudo apresentam resultados coerentes com a bibliografia como a malha apresenta uma convergência bastante definida. Posto isto, o modelo numérico fica validado e verificado assim como os resultados obtidos que provêm do mesmo.

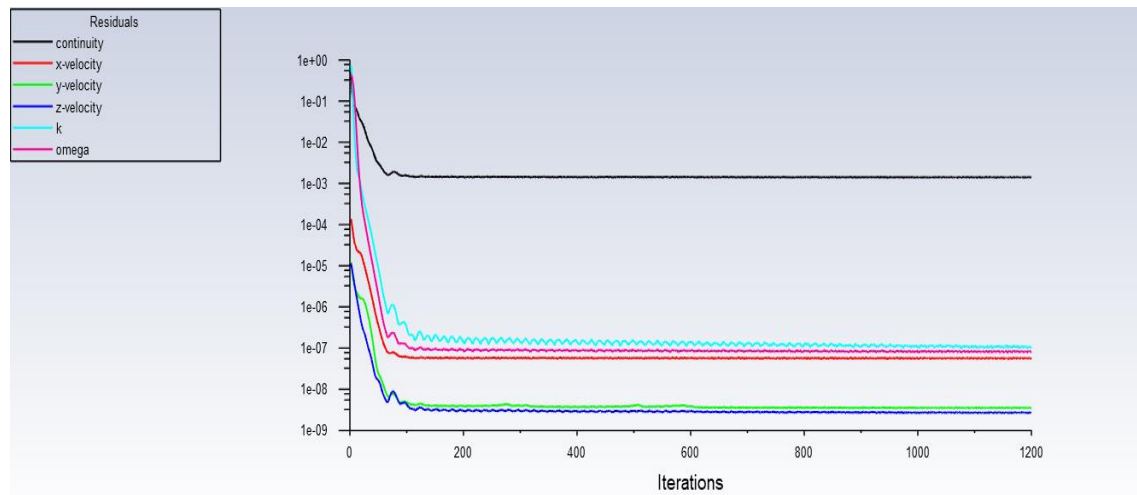


Figura 61- Escala de resíduos da tomada de pressão estática nº1 (50m/s)

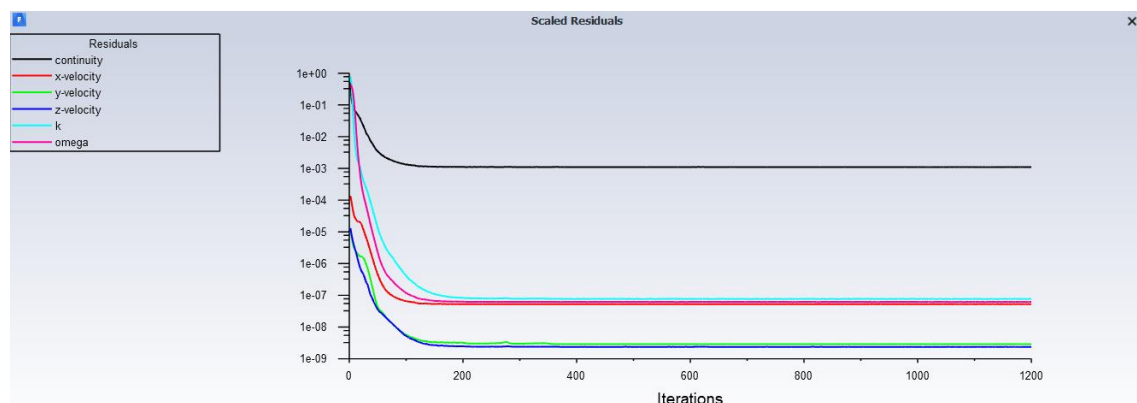


Figura 62- Escala de resíduos da tomada de pressão estática nº2 (50m/s)

## 5.2 Resultados da tomada de pressão estática nº1

De forma a entender a influência que o aumento da velocidade do escoamento exterior livre do ar terá na pressão dinâmica e na magnitude de vorticidade, efetuaram-se quatro simulações com 4 velocidades de escoamento distintas, sendo estas velocidades de 50 m/s, 60 m/s, 70 m/s e por fim 80 m/s. Cada simulação efetuada utilizou o modelo de turbulência  $k - \omega SST$ , foi sujeita a 1200 iterações e o escoamento exterior livre de ar provinha da direção X (longitudinal). No final da apresentação dos resultados obtidos para cada velocidade, serão efetuadas comparações sobre o efeito do incremento da velocidade do escoamento na tomada de pressão estática nº1.

Abaixo serão exibidos os resultados obtidos para cada velocidade, onde primeiramente será representado um corte paralelo ao eixo XY, que passe pelo centro da tomada de forma a observar-se a distribuição da pressão dinâmica ao longo da tomada (Figura 63, 72, 81, 90). De seguida um gráfico que represente os valores da pressão dinâmica junto à condição de fronteira "tomada" (Figura 64, 73, 82, 91), que corresponde à linha de pressão estática, e posteriormente serão apresentadas outras figuras (Figuras 65 a 71, figuras 74 a 78, figuras 83 a 89 e figuras 92 a 98), que representam perspectivas exteriores da tomada de pressão estática nº1, onde as mesmas irão representar a distribuição da pressão dinâmica e da magnitude de vorticidade porém de uma forma tridimensional. Os resultados serão exibidos de forma crescente, ou seja, serão apresentados primeiramente os resultados da simulação para a velocidade do escoamento de 50 m/s e assim sucessivamente até à simulação para a velocidade do escoamento de 80 m/s.

Importa realçar que todos os resultados que serão apresentados possuem todos a mesma escala quer de pressão dinâmica quer de magnitude de vorticidade.

### Simulação da tomada de pressão estática nº1 para velocidade do escoamento de 50 m/s



Figura 63- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s

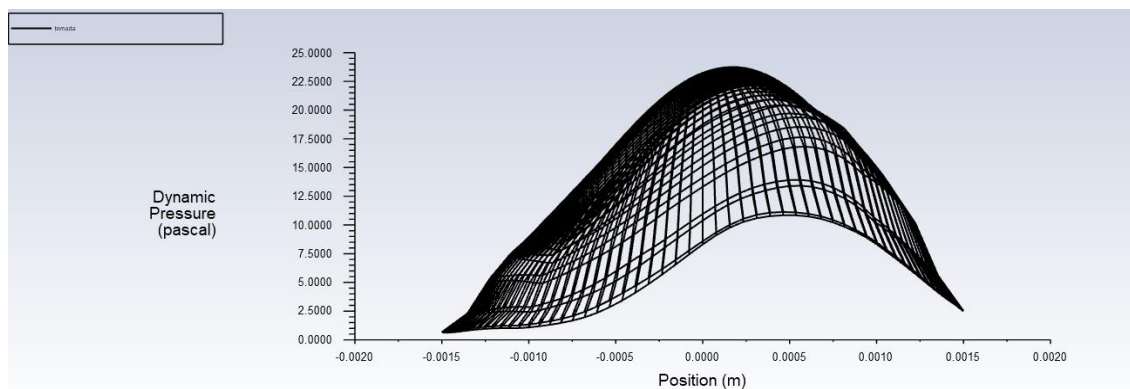


Figura 64- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s



Figura 65- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s

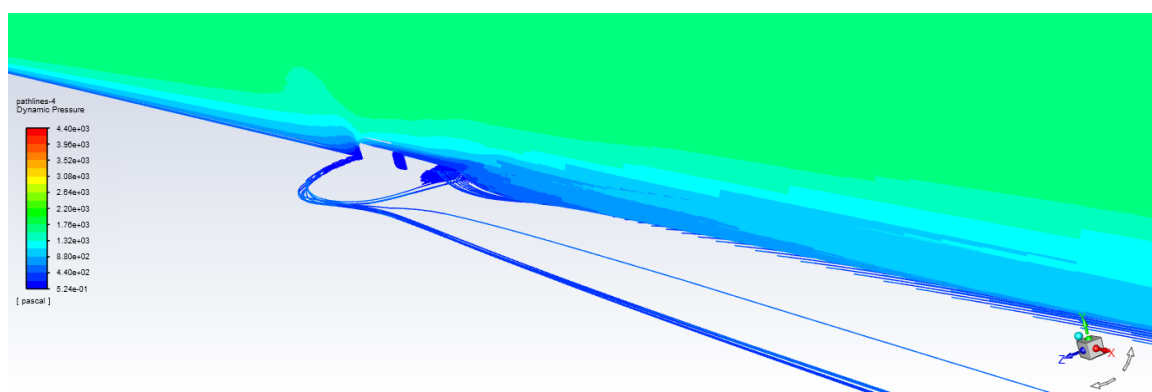


Figura 66- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s

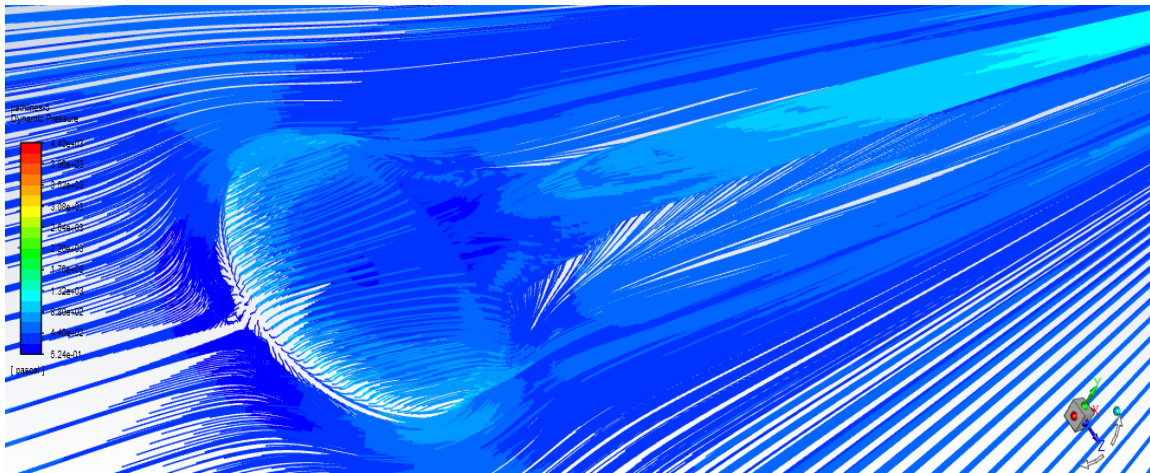


Figura 67- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s

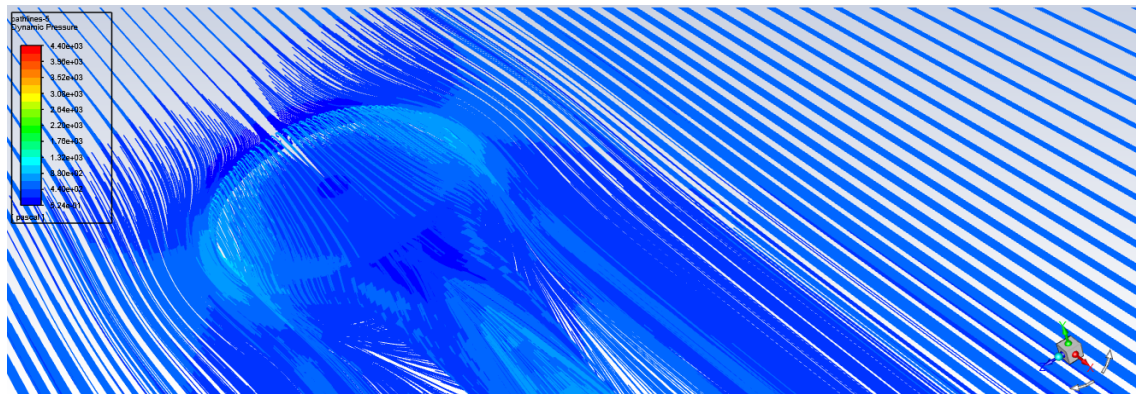


Figura 68- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s

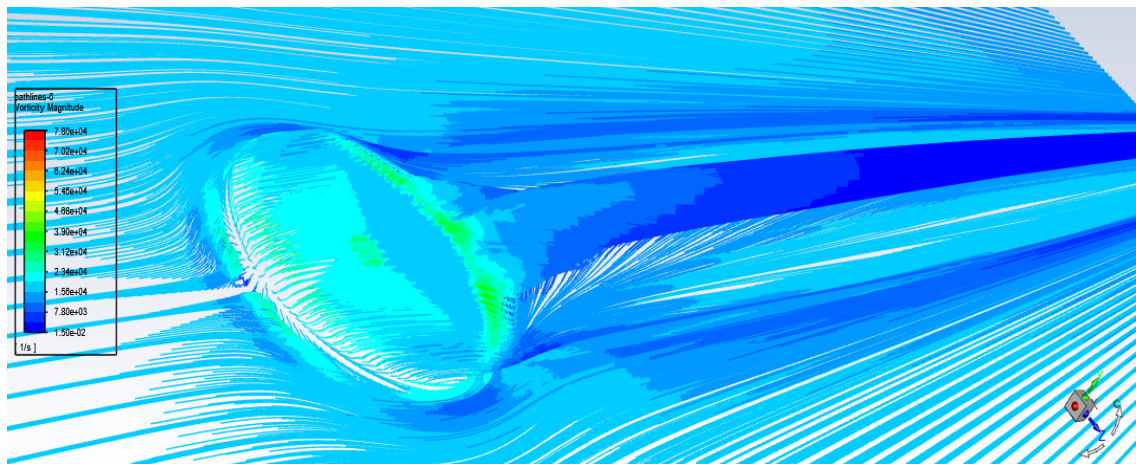


Figura 69- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s

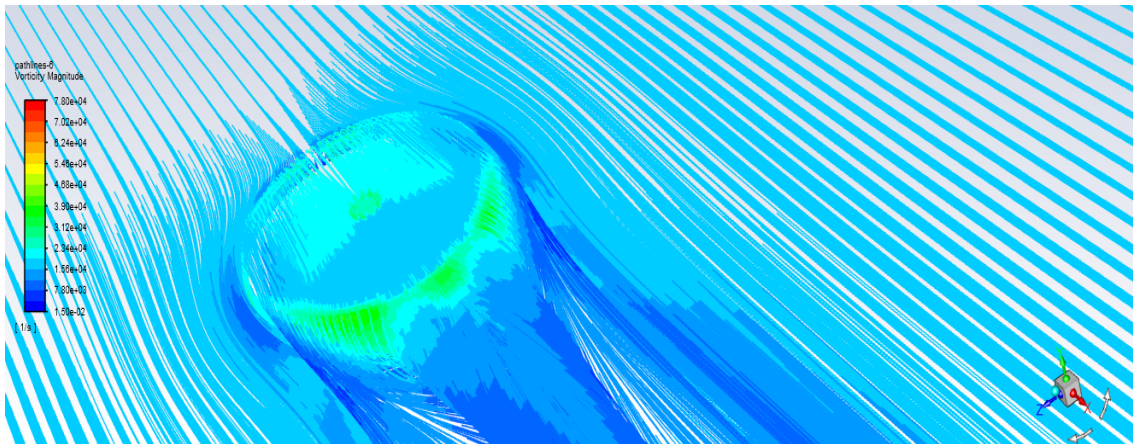


Figura 70- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s

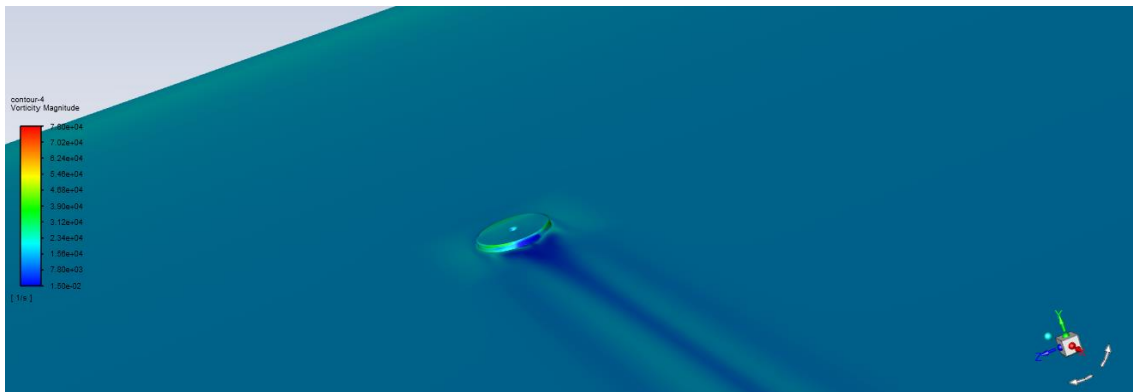


Figura 71- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 50 m/s

Ou seja, para a velocidade de escoamento de 50 m/s registaram-se os seguintes valores:

- **Pressão dinâmica média registada na condição de fronteira “tomada” - 15 Pascal**
- **Magnitude de vorticidade registada- 34000 1/s**

**Simulação da tomada de pressão estática nº1 para velocidade do escoamento de 60 m/s**

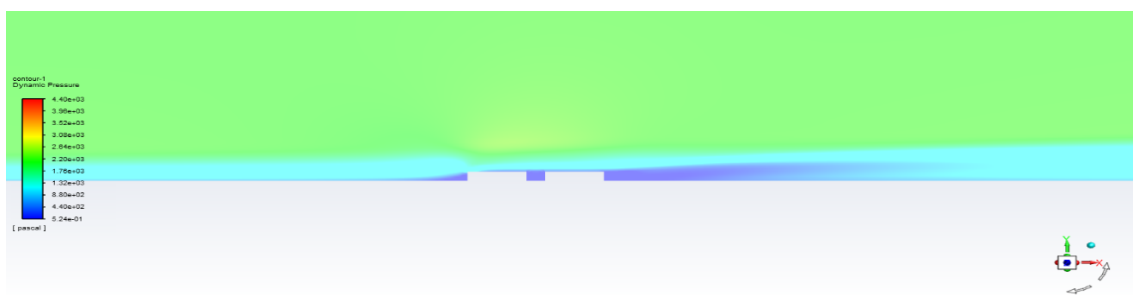


Figura 72- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s

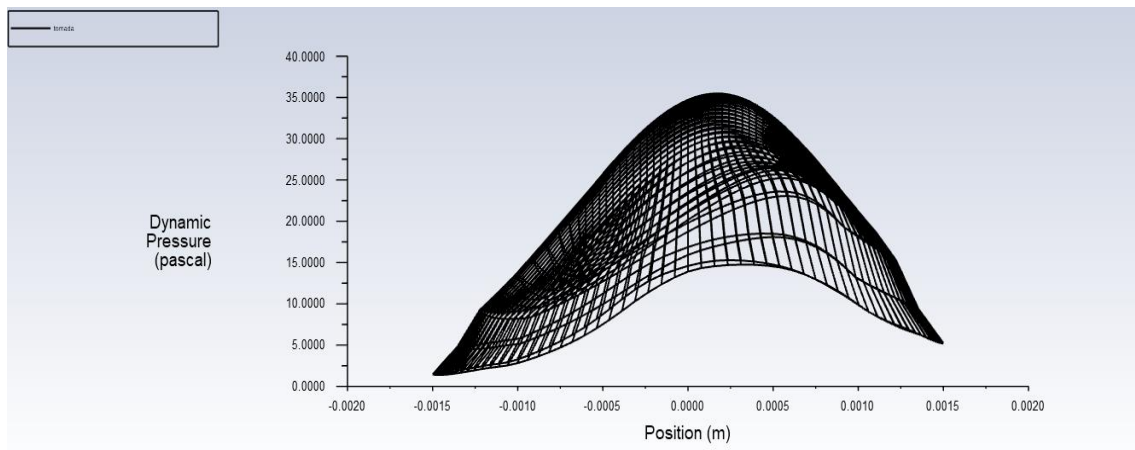


Figura 73- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s

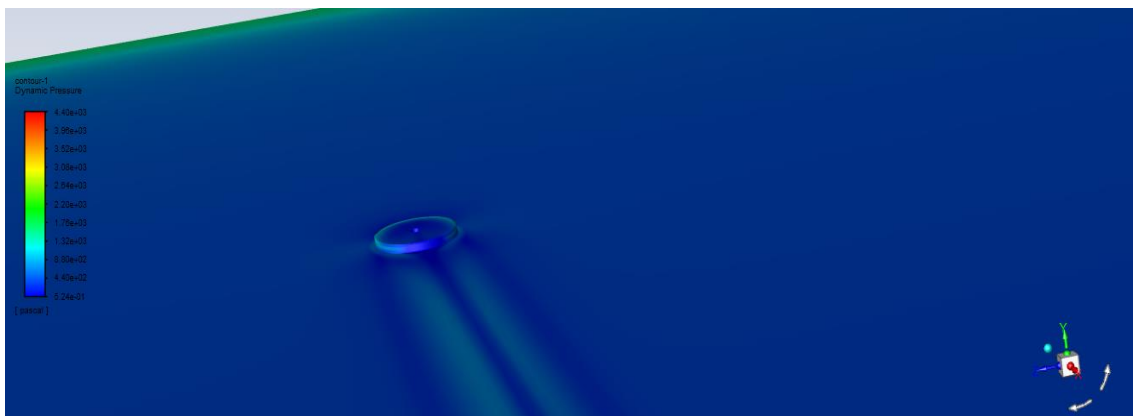


Figura 74- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s

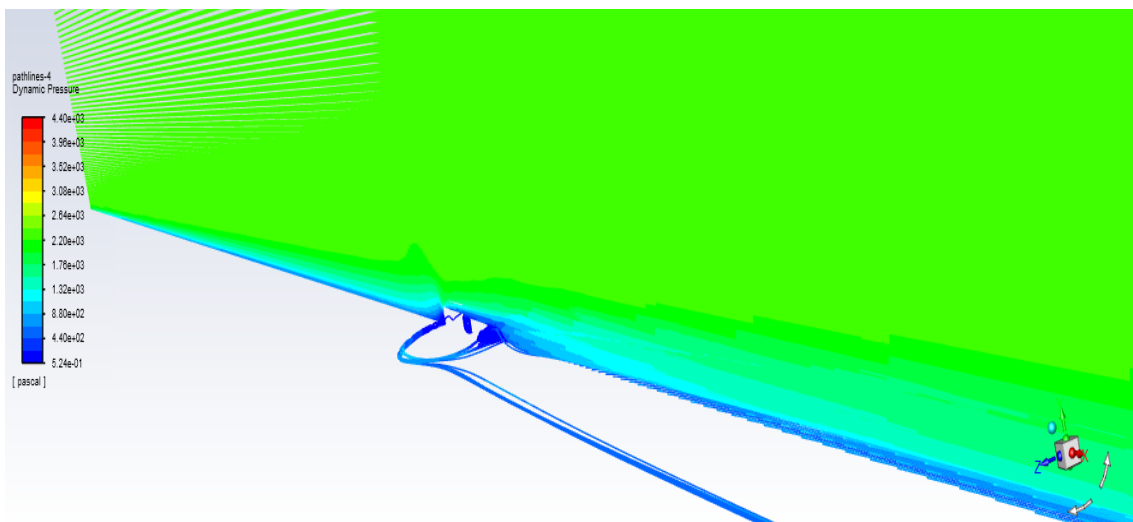


Figura 75- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s

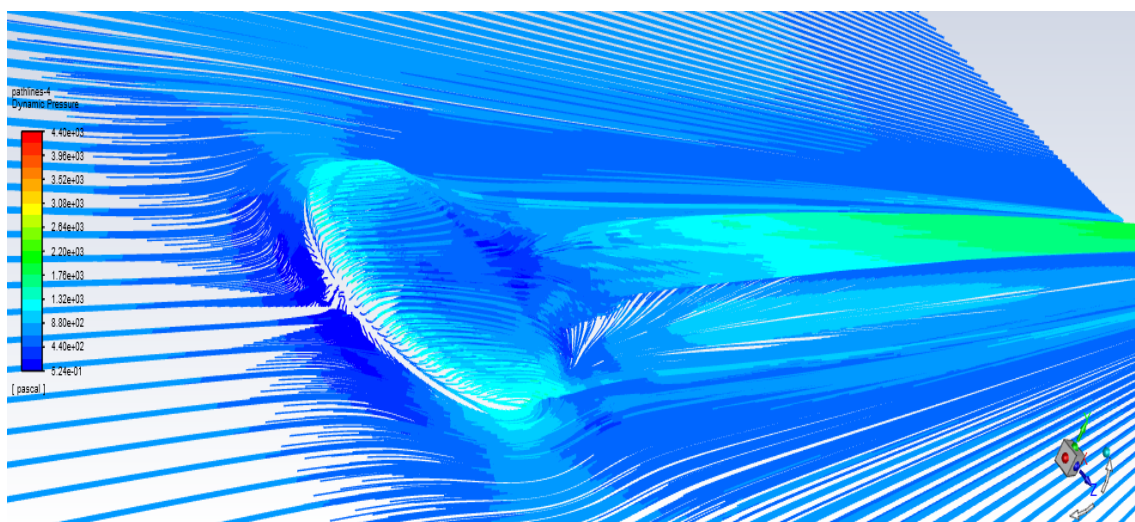


Figura 76- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s

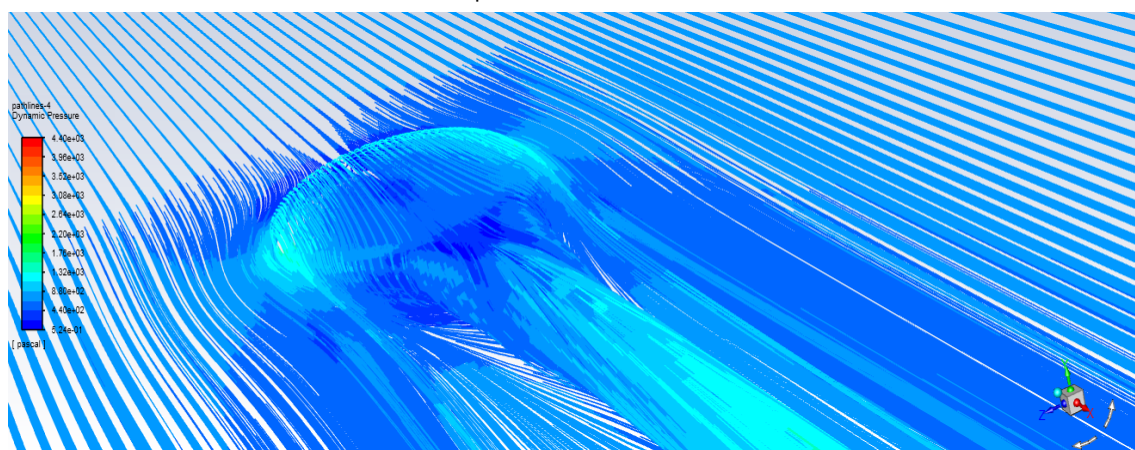


Figura 77- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s

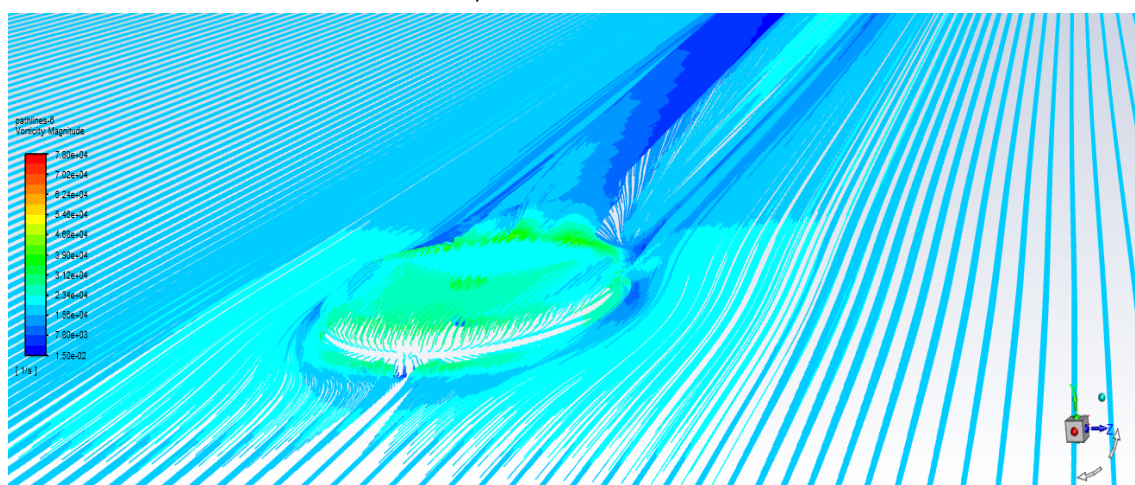


Figura 78- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s

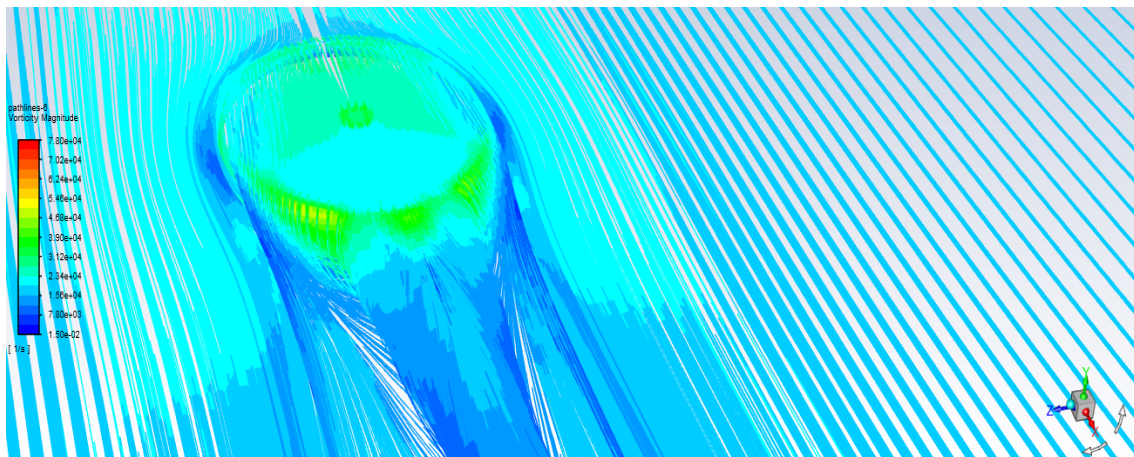


Figura 79- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s

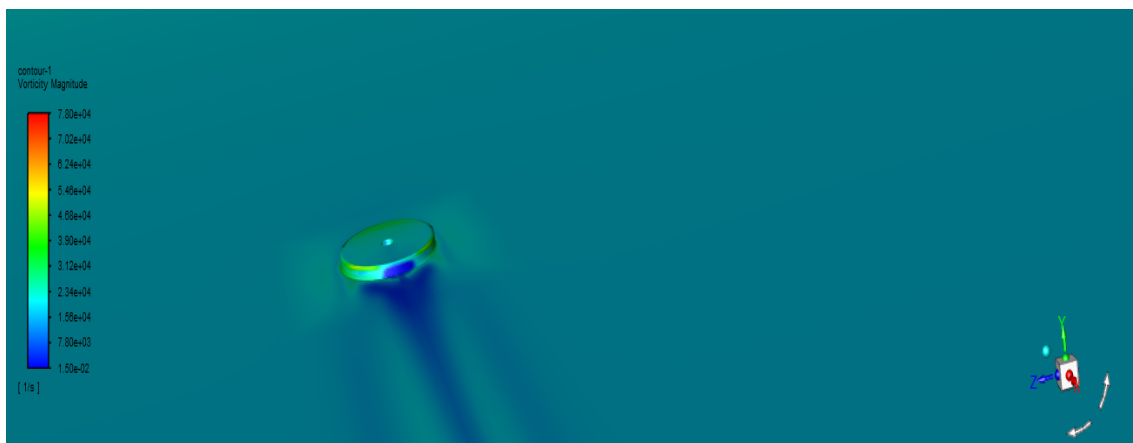


Figura 80- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 60 m/s

Ou seja, para a velocidade de escoamento de 60 m/s registaram-se os seguintes valores:

- **Pressão dinâmica média registada na condição de fronteira “tomada” - 25 Pascal**
- **Magnitude de vorticidade registada- 49000 1/s**

**Simulação da tomada de pressão estática nº1 para velocidade do escoamento de 70 m/s**



Figura 81- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s

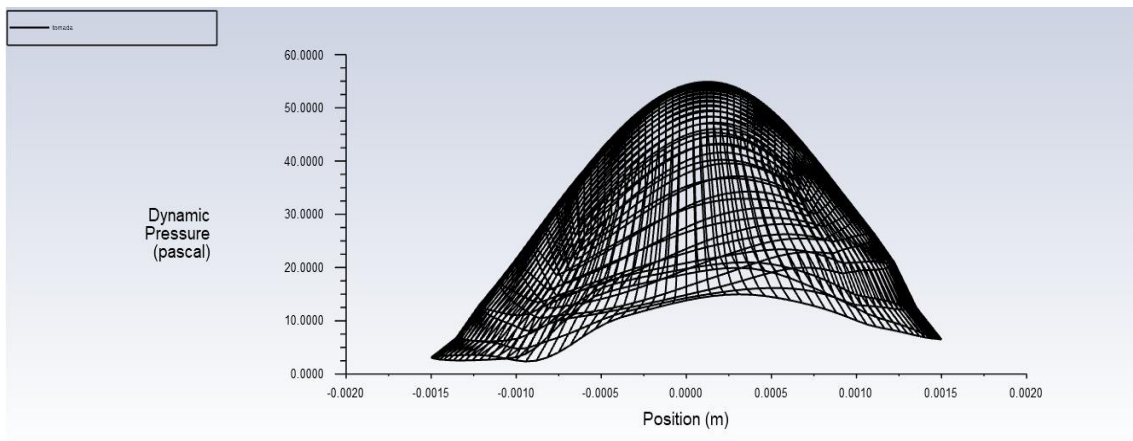


Figura 82- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s

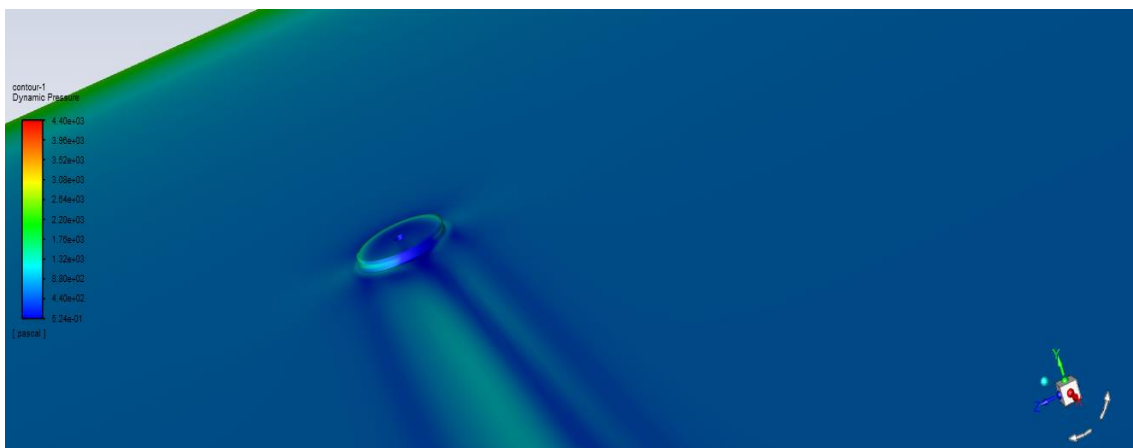


Figura 83- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s

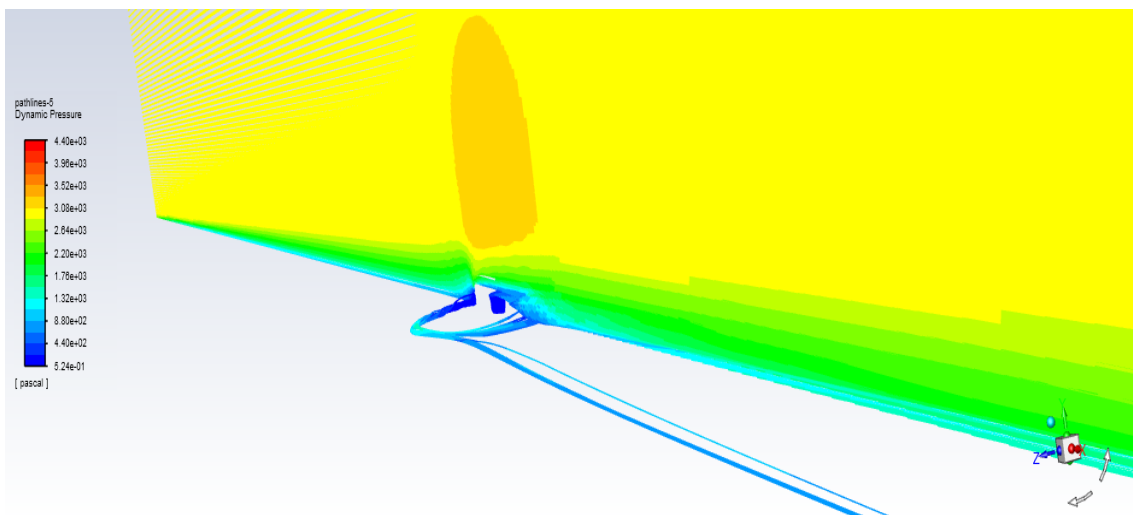


Figura 84- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s

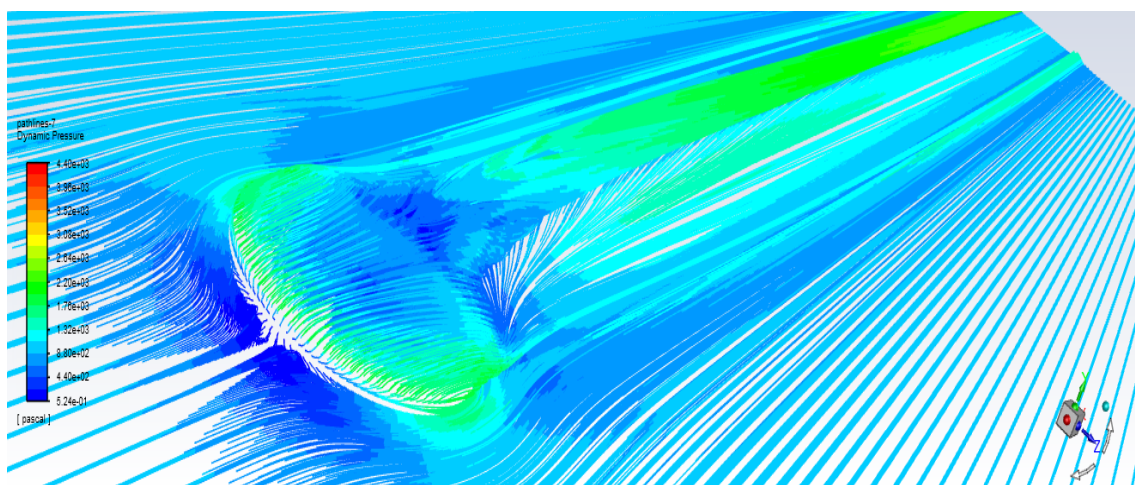


Figura 85- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s

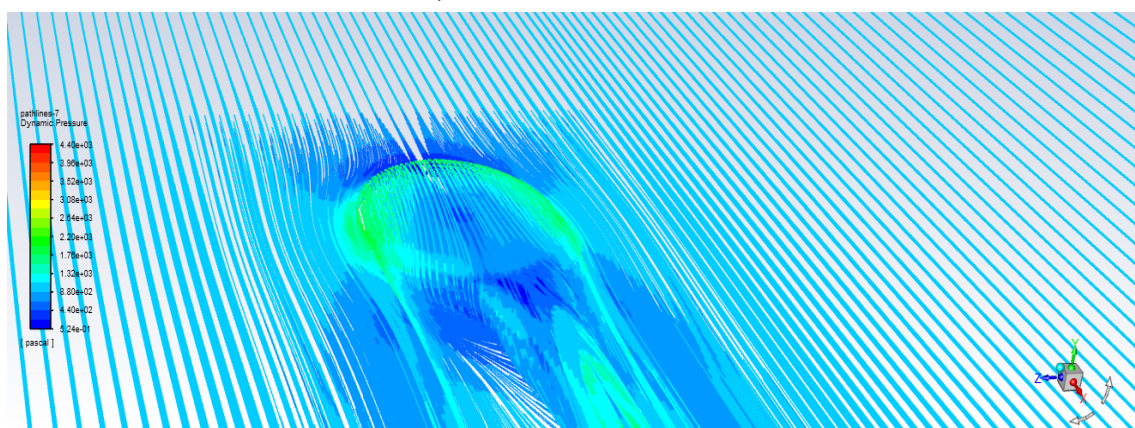


Figura 86- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s

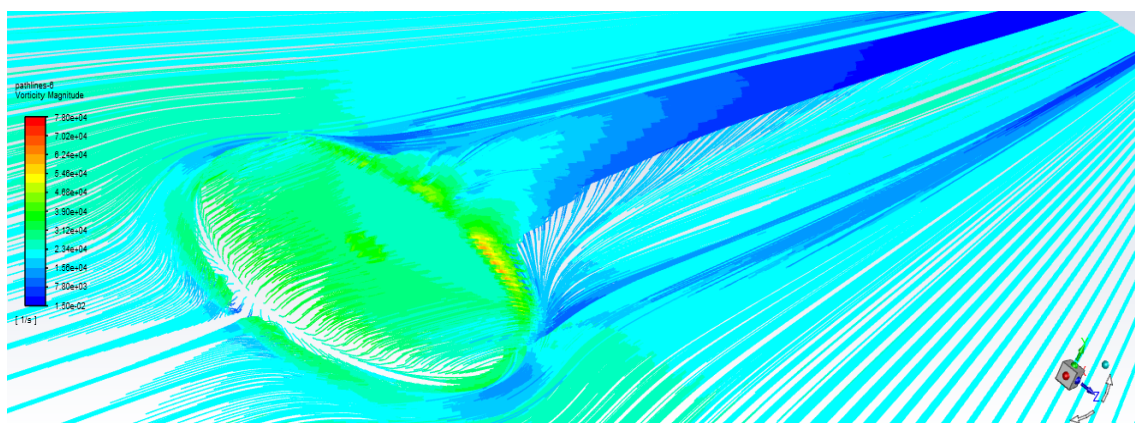


Figura 87- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s

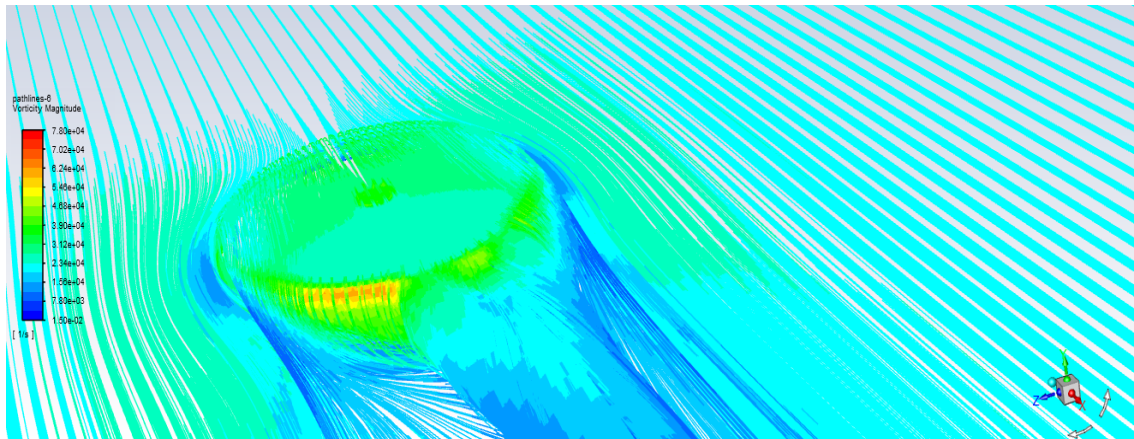


Figura 88- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s

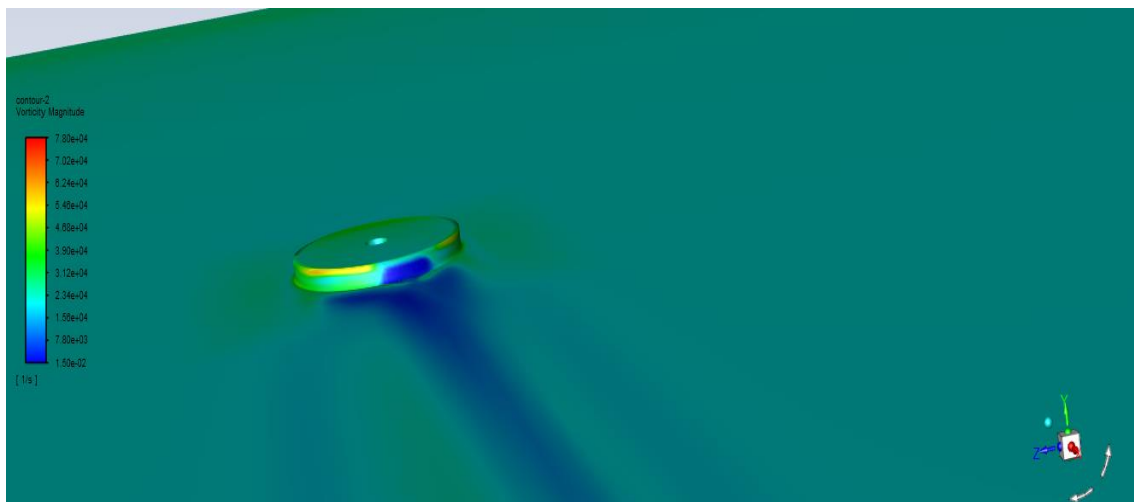


Figura 89- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 70 m/s

Ou seja, para a velocidade de escoamento de 70 m/s registaram-se os seguintes valores:

- **Pressão dinâmica média registada na condição de fronteira “tomada” - 37 Pascal**
- **Magnitude de vorticidade registada- 69000 1/s**

## Simulação da tomada de pressão estática nº1 para velocidade do escoamento de 80 m/s

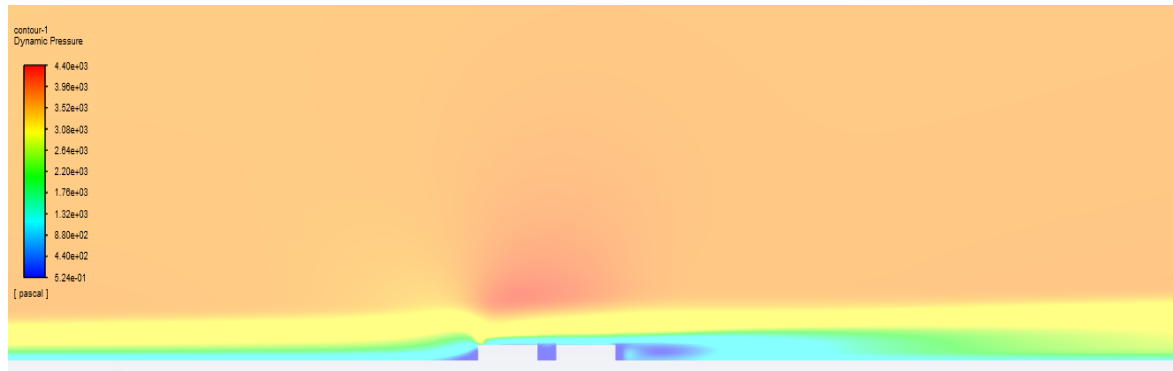


Figura 90- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s

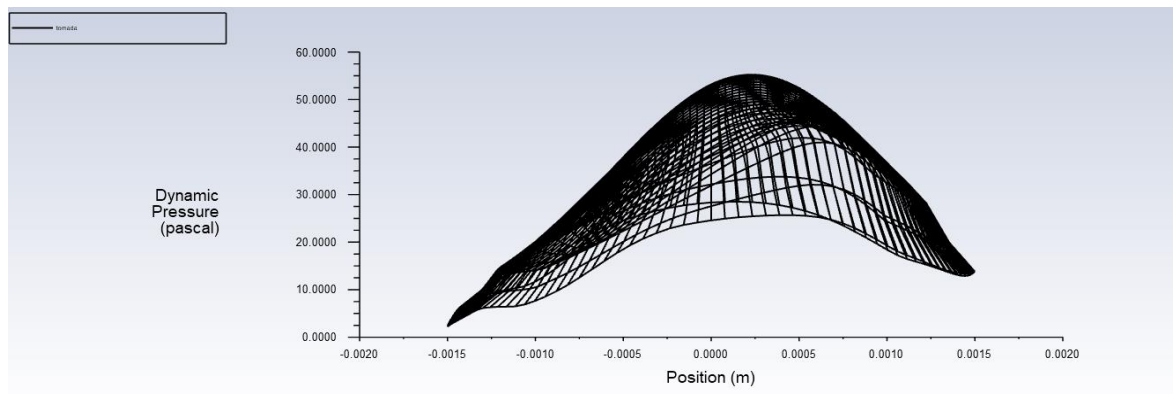


Figura 91- - Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s

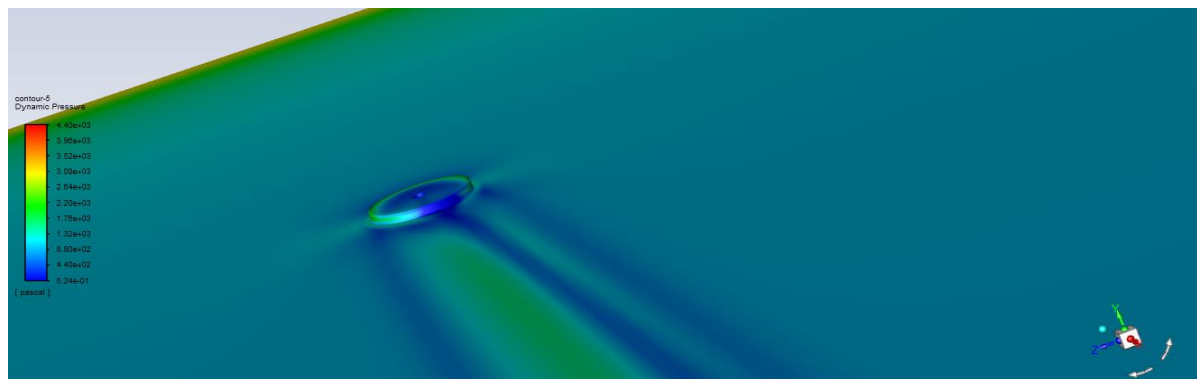


Figura 92- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s

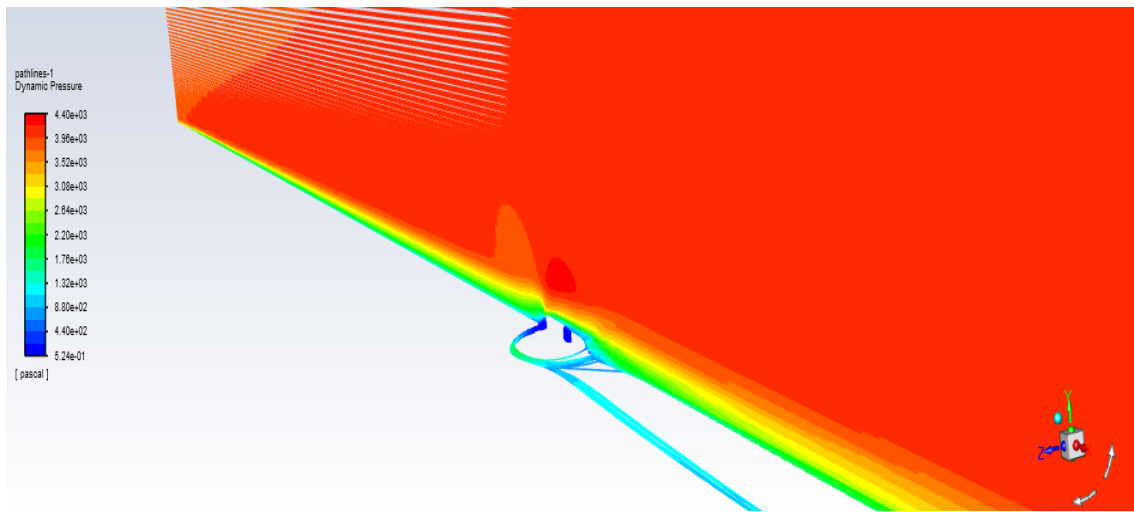


Figura 93- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s

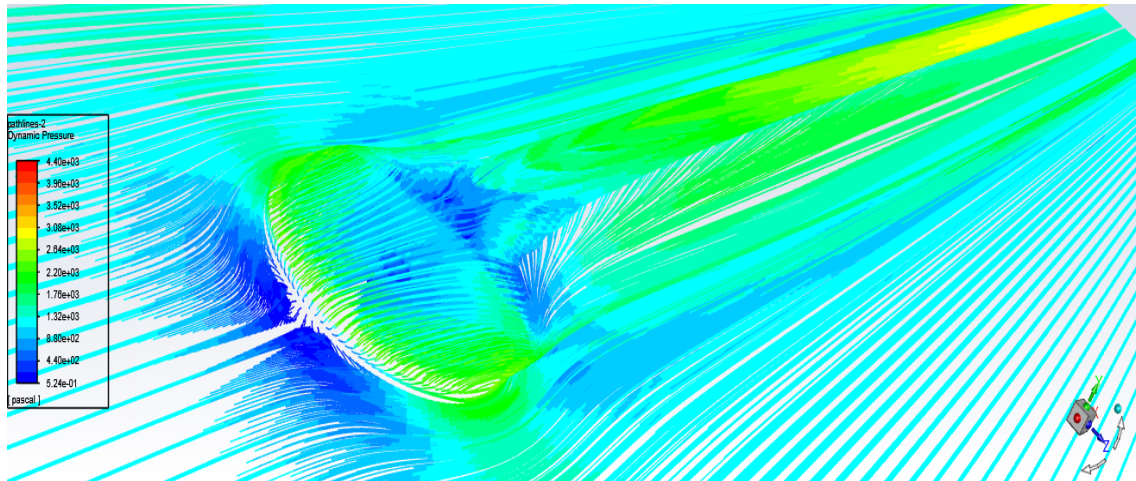


Figura 94- Perspectiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s

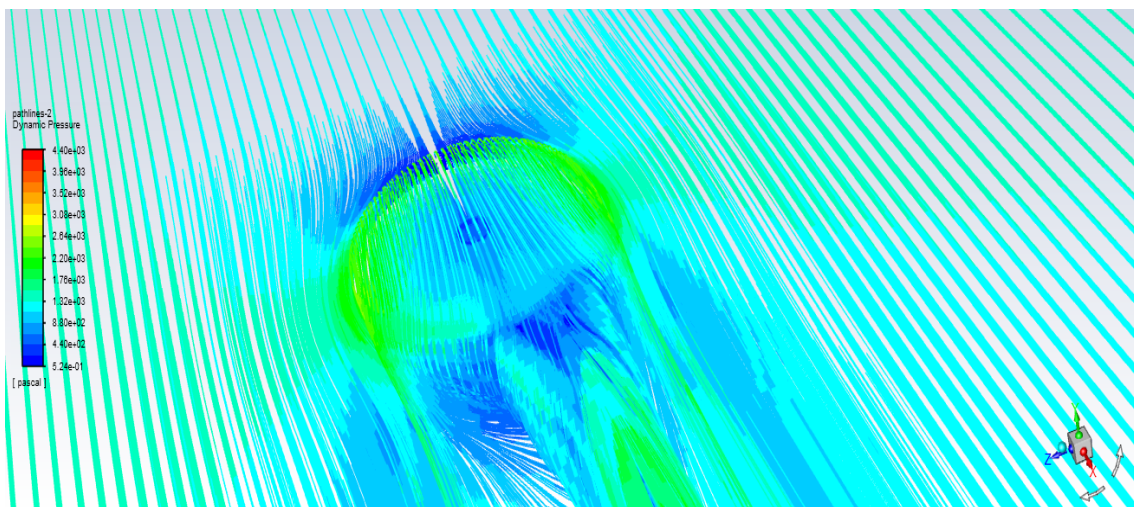


Figura 95- Perspectiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s

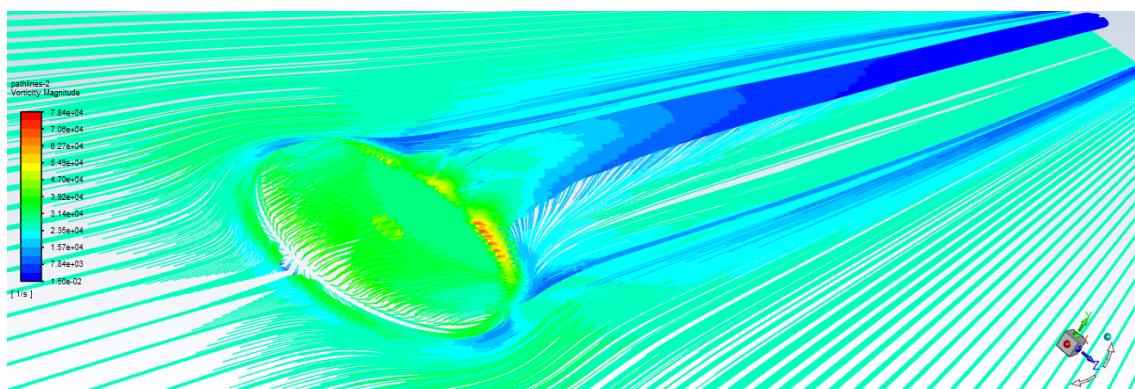


Figura 96- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s

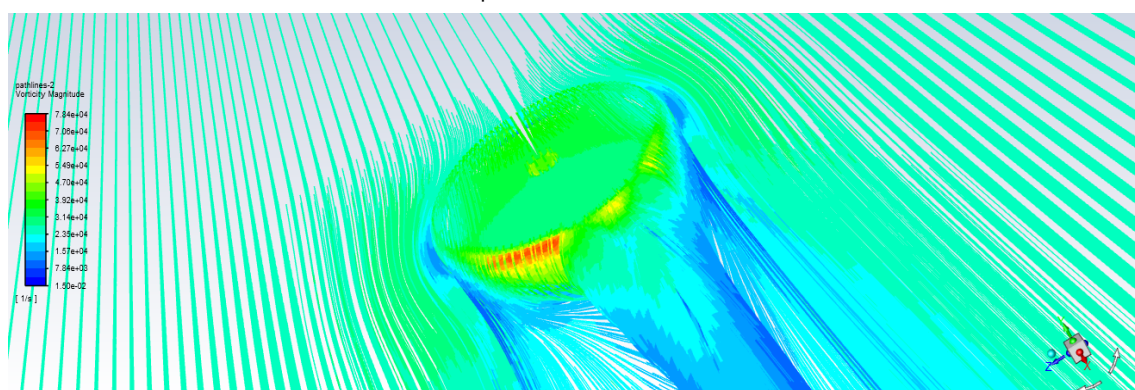


Figura 97- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s



Figura 98- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº1 a 80 m/s

Ou seja, para a velocidade de escoamento de 80 m/s registaram-se os seguintes valores:

- **Pressão dinâmica média registada na condição de fronteira “tomada” - 42 Pascal**
- **Magnitude de vorticidade registada- 77000 1/s**

Em síntese, a tabela1 compara os valores obtidos em cada simulação da tomada de pressão estática nº1 consoante as velocidades do escoamento exterior livre do ar.

Simulação	Pressão dinâmica (Pa)	Magnitude de vorticidade (1/s)
50 m/s	15	34000
60 m/s	25	49000
70 m/s	37	69000
80 m/s	42	77000

Tabela 1- Síntese comparativa dos resultados obtidos na tomada de pressão estática nº1 consoante a velocidade

Através da tabela 1 verifica-se com clareza que com o incremento da velocidade do escoamento exterior do ar tanto a pressão dinâmica como a magnitude de vorticidade aumentam, no entanto, o aumento entre a velocidade do escoamento de 70 m/s e 80 m/s já não tem uma influência tão significativa no aumento da pressão dinâmica, o que leva a acreditar que a pressão dinâmica medida na condição de fronteira “tomada” pode atingir um limite máximo.

Comparando a distribuição bidimensional da pressão dinâmica na primeira simulação de 50 m/s para a última simulação de 80 m/s, verifica-se que apesar de a pressão dinâmica junto à linha de pressão estática se manter em termos qualitativos quase constante. Porém, a pressão dinâmica envolvente à tomada de pressão estática no caso da simulação de 80 m/s, é bastante superior e denota-se também que o efeito do embate do escoamento na tomada de pressão estática produz consequências bastante mais significativas na distribuição da pressão dinâmica, como se verifica pela tonalidade de cores da figura 99 na simulação de 80 m/s, comparada com ausência de mudança de cor ao redor da tomada na simulação de 50 m/s.

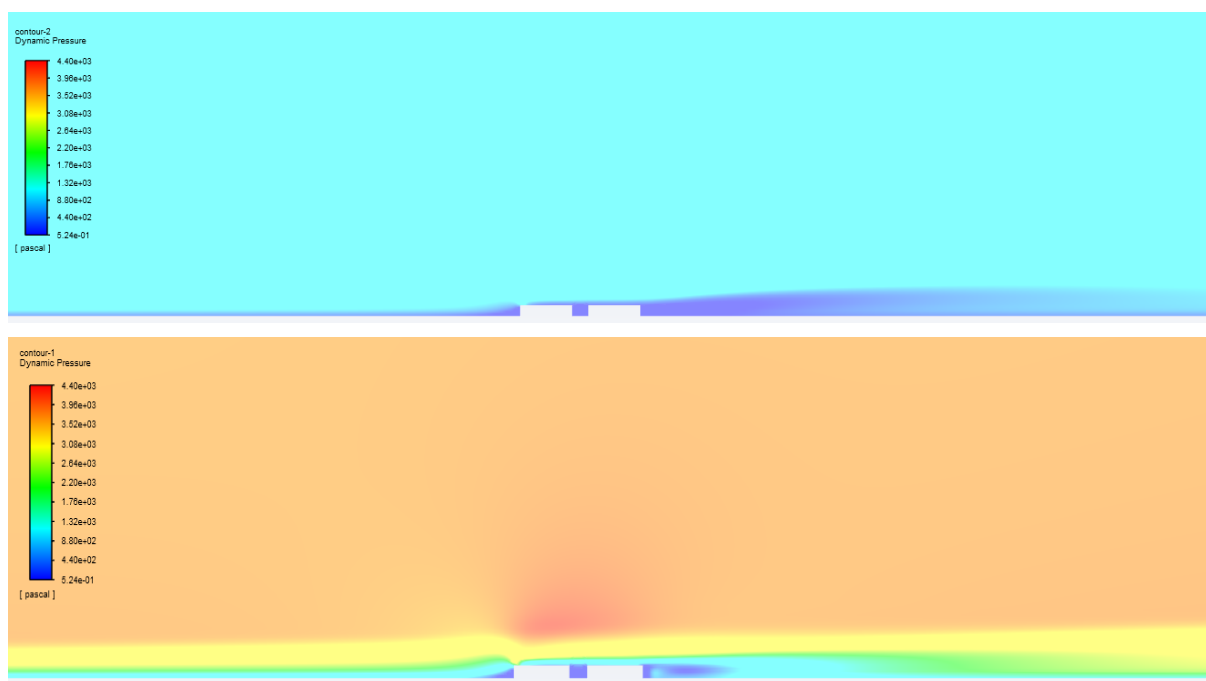


Figura 99- Comparação da distribuição da pressão dinâmica na tomada de pressão estática nº1 nas simulações de 50 m/s (esquerda) e 80 m/s (direita) para a tomada de pressão estática nº1

Em relação à bolha de recirculação, presente acima da tomada de pressão estática e provocada devido ao embate do escoamento exterior do ar com a tomada de pressão estática, verifica-se que a mesma vai crescendo em altura, mesmo que de forma bastante sutil, com o aumento da velocidade do escoamento exterior de ar. Com isto observa-se também, que conforme a bolha de recirculação aumenta de altura mais intensa e turbulenta irá ficar a esteira deixada pelo embate do escoamento com a tomada de pressão estática. Logicamente este efeito é devido ao incremento da velocidade do escoamento que por sua vez irá aumentar o número de Reynolds, e consoante este número fique maior, mais turbulento o escoamento irá ser. A figura 100 relaciona a comparação da bolha de recirculação e da esteira deixada na simulação de 50 m/s e 80 m/s.

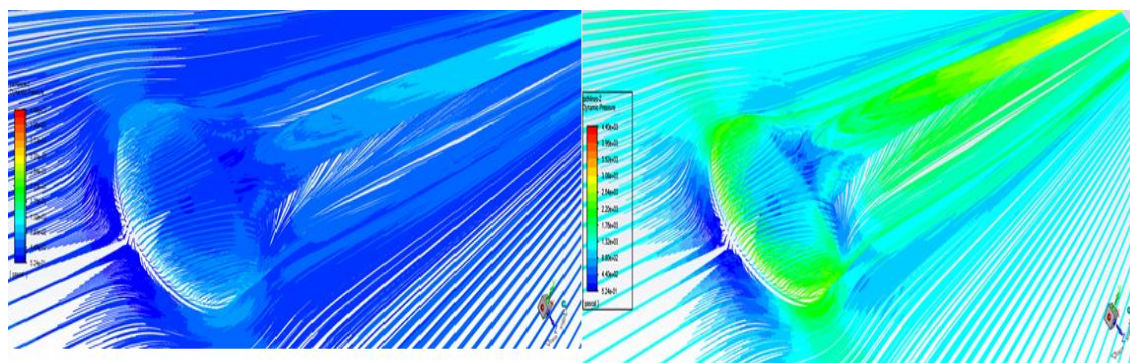


Figura 100- Comparação da bolha de recirculação e da esteira deixada na simulação de 50 m/s (esquerda) e 80 m/s (direita) para a tomada de pressão estática nº1

Por fim, a magnitude de vorticidade também se encontra diretamente ligada com o aumento ou diminuição da velocidade, pois comparando a primeira simulação de 50 m/s para a simulação de 80 m/s verifica-se um aumento de cerca de 2,25 vezes na magnitude de vorticidade. Denota-se também que a zona onde são formados os vórtices, (a zona encontra-se localizada na região com cor vermelha da figura abaixo), cada vez se encontra mais extensa, o que faz todo o sentido quando comparado com o capítulo da geração e desprendimentos dos vórtices presente na revisão bibliográfica, onde é relacionado o aumento do número de Reynolds (incremento de velocidade do escoamento) com o aumento e extensão da zona onde os vórtices são formados em superfícies cilíndricas. Esta comparação está representada na figura 101, onde se verifica o aumento da vorticidade e a extensão da zona onde se formam os vórtices.

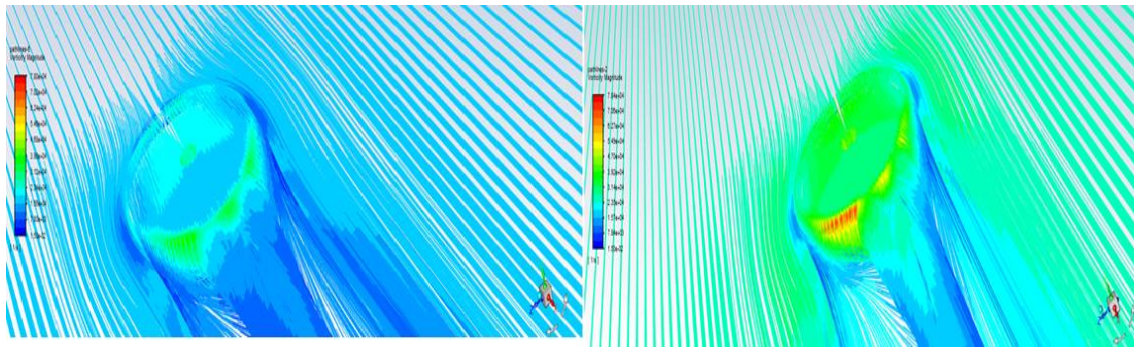


Figura 101- Comparação da vorticidade deixada na simulação de 50 m/s (esquerda) e 80 m/s (direita) para a tomada de pressão estática nº1

### 5.3 Resultados da tomada de pressão estática nº2

À semelhança da tomada de pressão estática nº1, os parâmetros a serem estudados serão os mesmos, a pressão dinâmica e a magnitude de vorticidade. Foram efetuadas quatro simulações cada uma com a sua velocidade, tal como no estudo da tomada de pressão estática nº1. Todas as simulações recorreram ao modelo de turbulência  $k - \omega SST$  e também foram utilizadas 1200 iterações no estudo da tomada de pressão estática nº2. Contrariamente às simulações da tomada de pressão estática nº1, neste caso o escoamento exterior livre de ar provém da direção oposta de X. Tal como anteriormente, serão efetuadas comparações acerca do aumento da velocidade do escoamento na tomada de pressão estática nº2.

Seguidamente, serão apresentados os resultados obtidos para cada velocidade de forma crescente, onde será apresentado primeiro um corte paralelo ao eixo XY que passe pelo centro da tomada (Figura 102, 111, 120, 129) e inúmeras perspetivas exteriores da tomada de pressão estática nº2 que relacionam a distribuição da pressão dinâmica e da magnitude de vorticidade ( Figuras 104 a 110, figuras 113 a 119, figuras 122 a 128 e figuras 131 a 137), tal como no estudo da tomada de pressão estática nº1. Serão apresentados também figuras com a distribuição da pressão dinâmica junto à linha de pressão estática da tomada nº2 (Figura 103,112, 121,130).

Da mesma forma, importa realçar que os resultados aqui apresentados contêm todos a mesma escala, de modo a facilitar comparações acerca do aumento da velocidade do escoamento exterior.

## Simulação da tomada de pressão estática nº2 para velocidade do escoamento de 50 m/s



Figura 102- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s

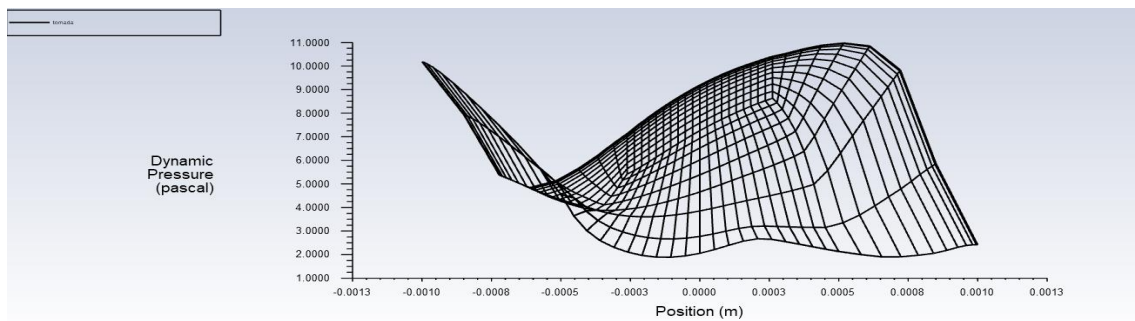


Figura 103- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s

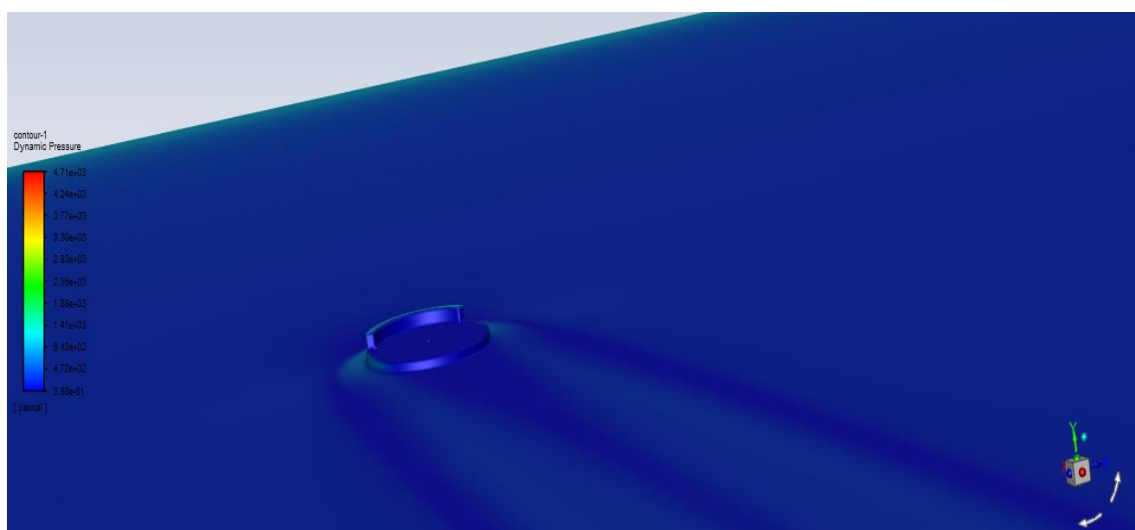


Figura 104- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s

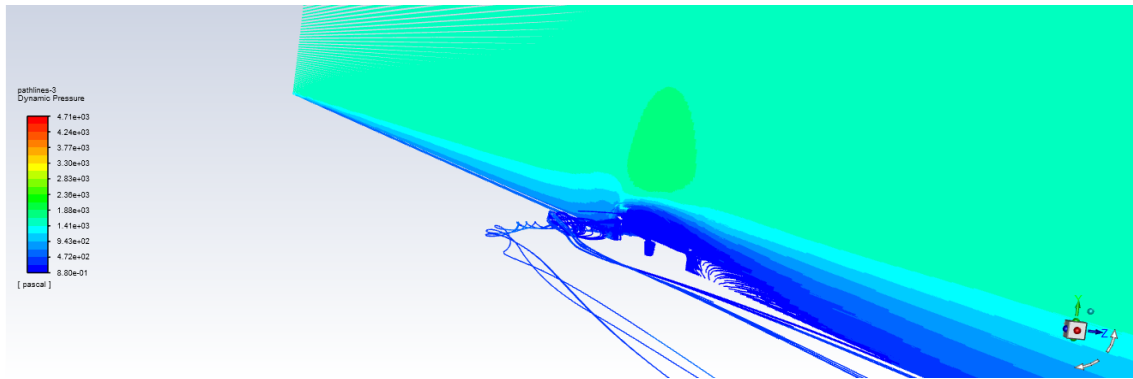


Figura 105- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s

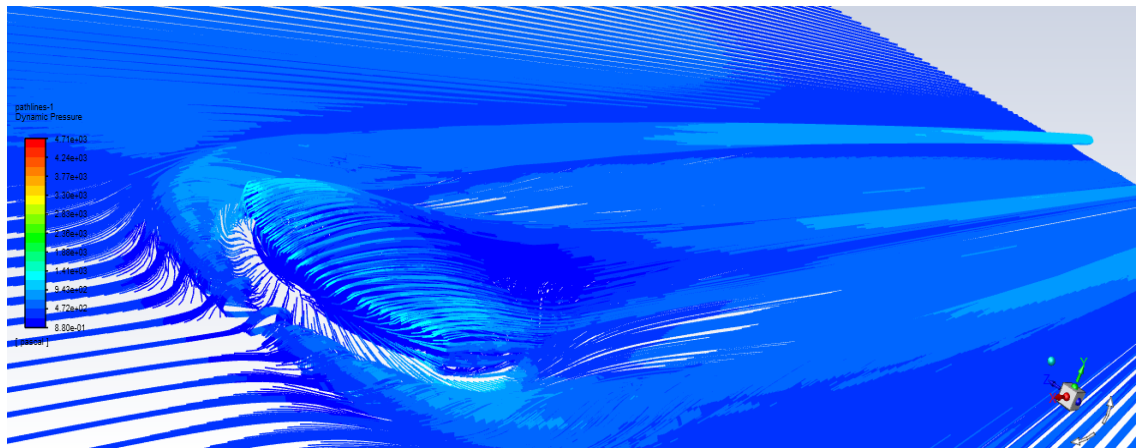


Figura 106- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s

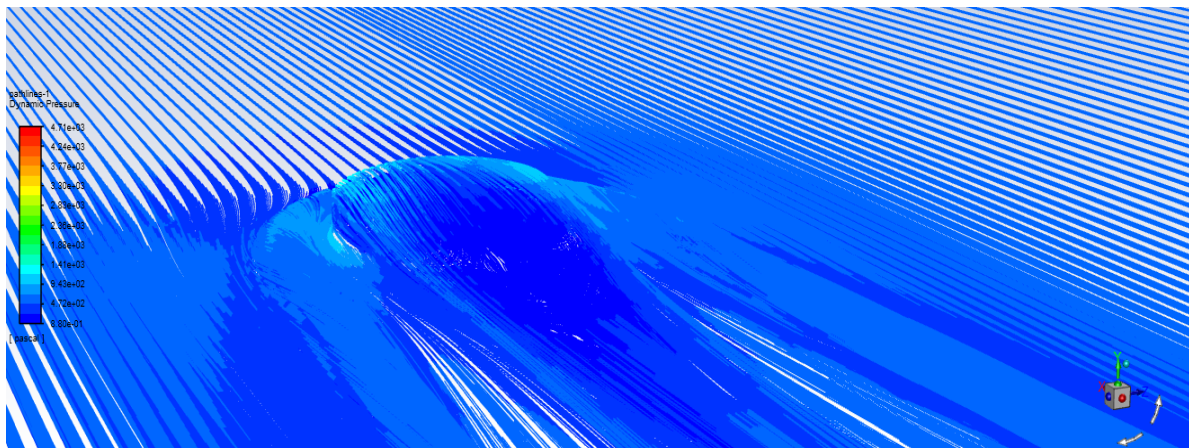


Figura 107- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s

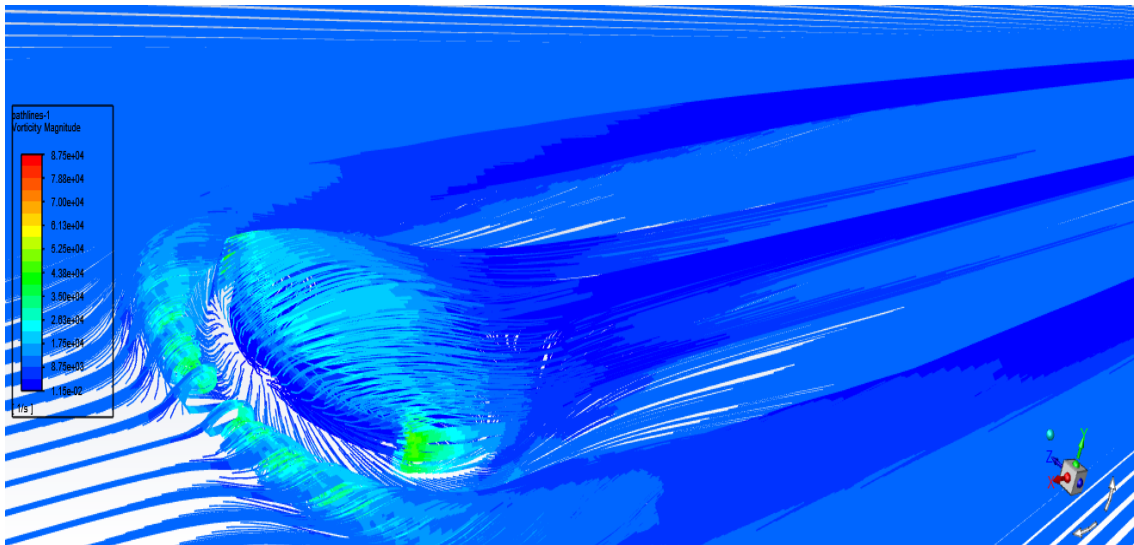


Figura 108- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s

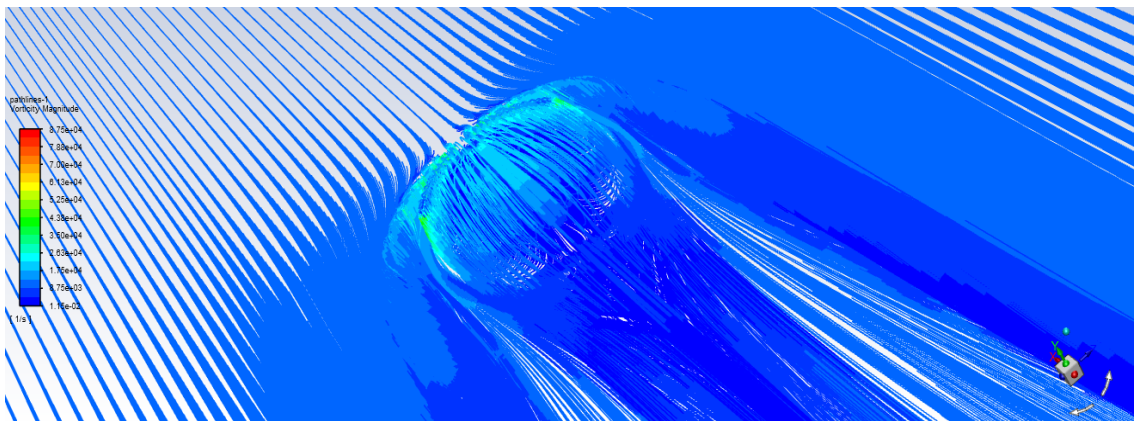


Figura 109- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s

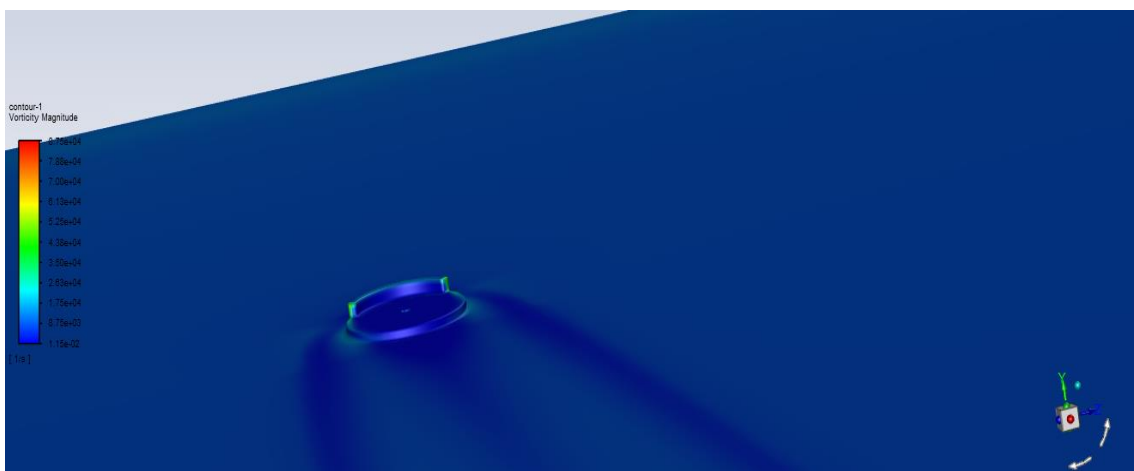


Figura 110- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 50 m/s

Ou seja, para a velocidade de escoamento de 50 m/s registaram-se os seguintes valores:

- **Pressão dinâmica média registada na condição de fronteira “tomada” – 6 Pascal**
- **Magnitude de vorticidade registada- 41000 1/s**

Simulação da tomada de pressão estática nº2 para velocidade do escoamento de 60 m/s

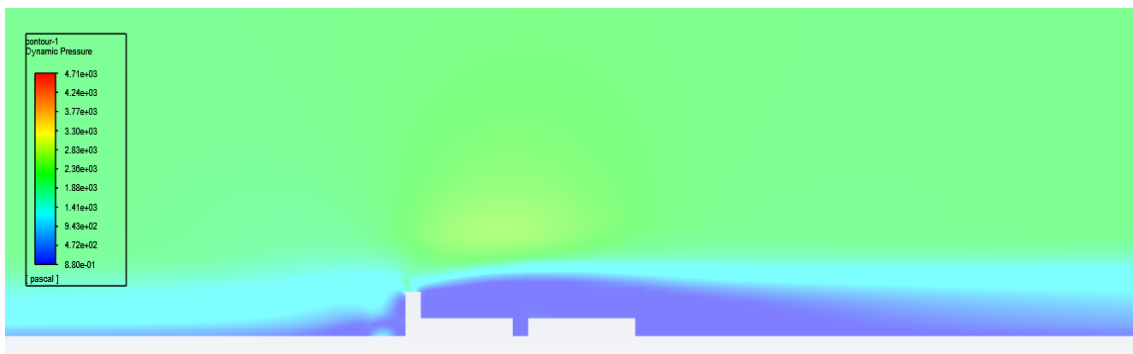


Figura 111- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s

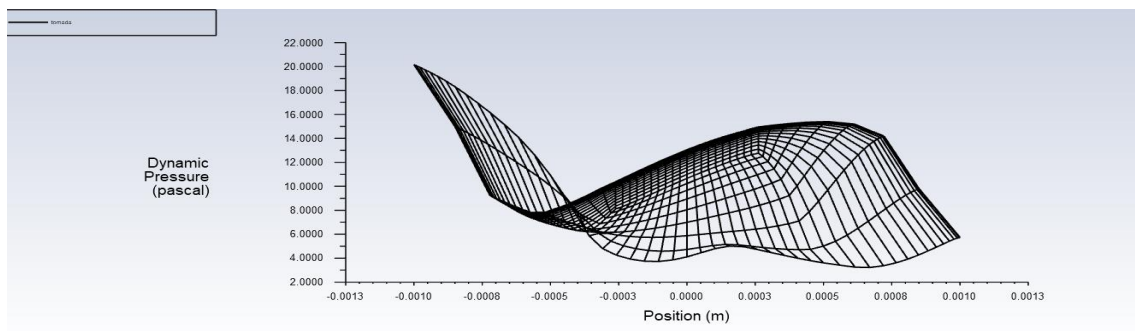


Figura 112- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s

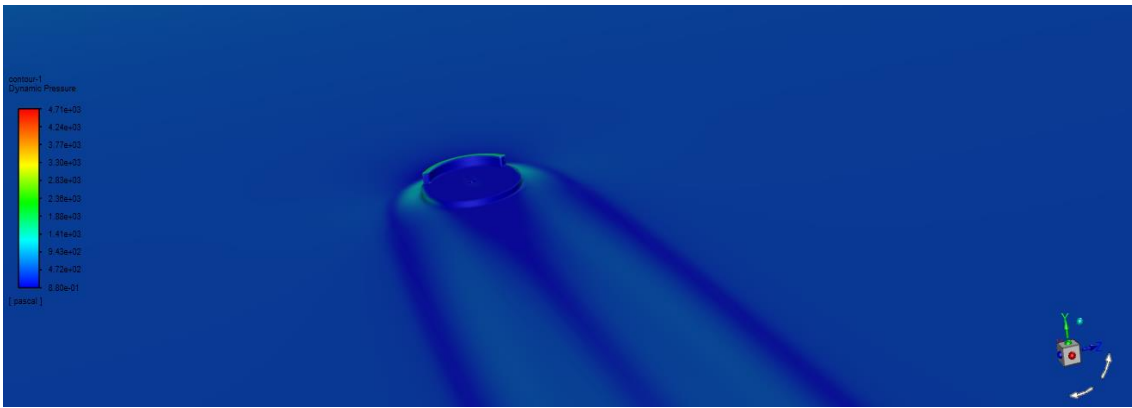


Figura 113- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s

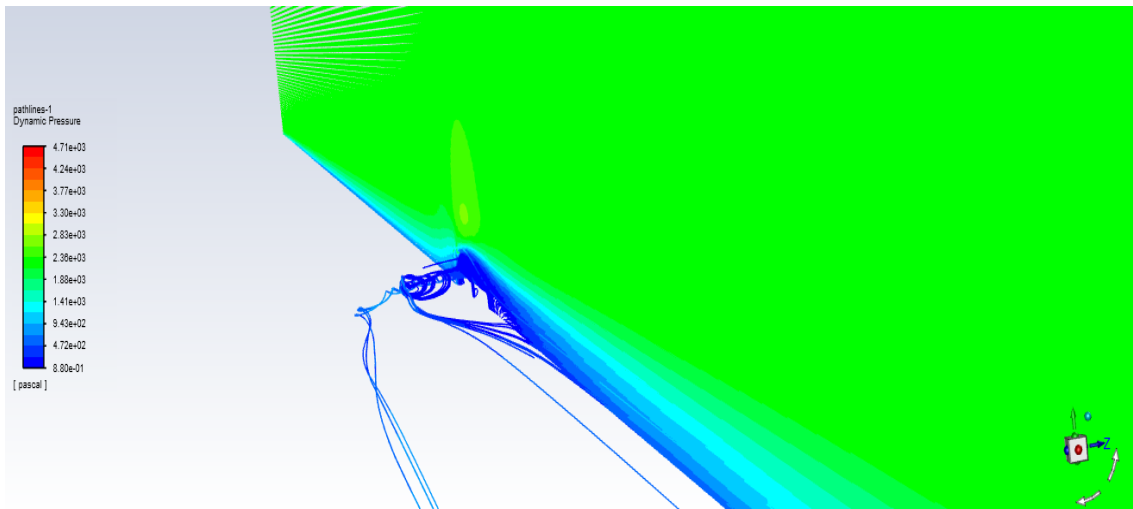


Figura 114- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s

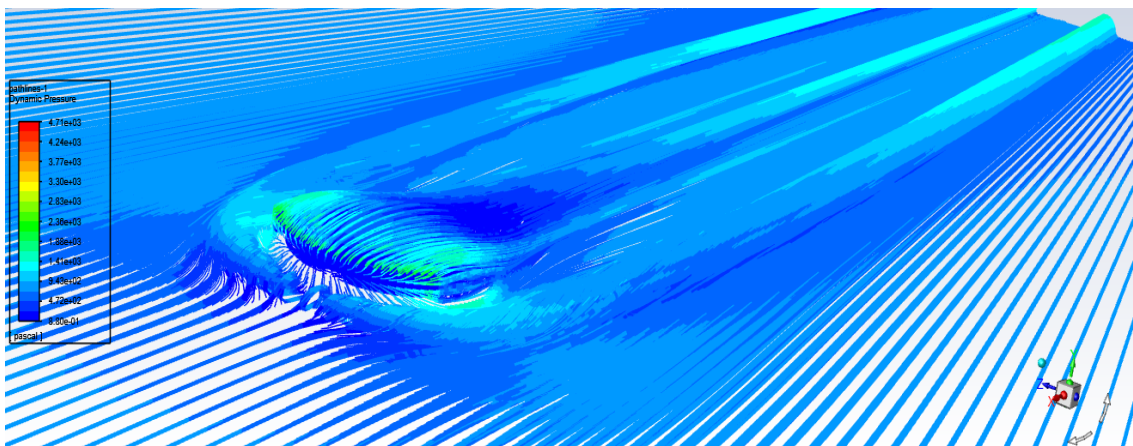


Figura 115- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s

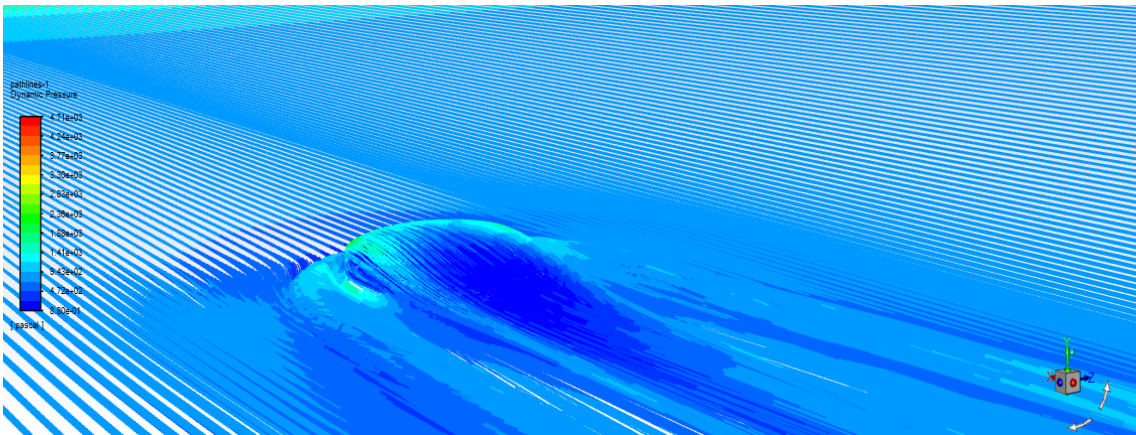


Figura 116- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s

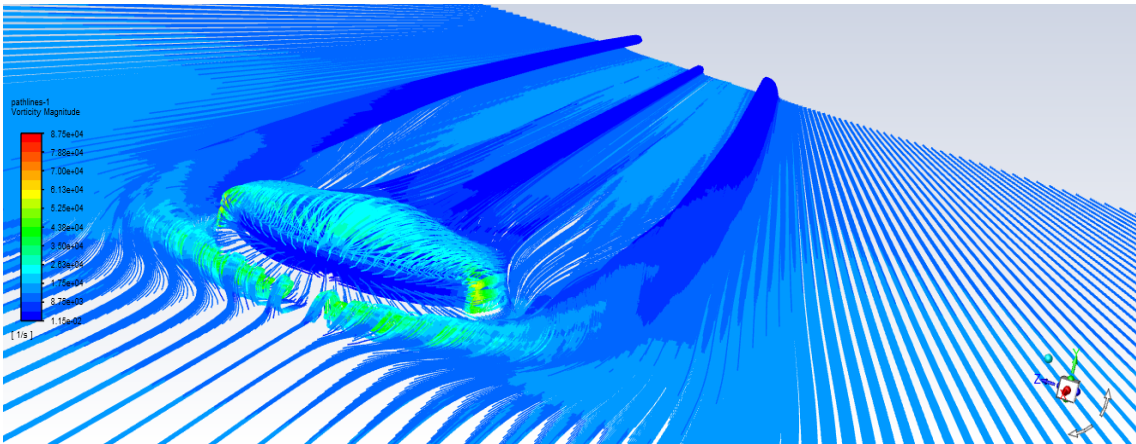


Figura 117- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s

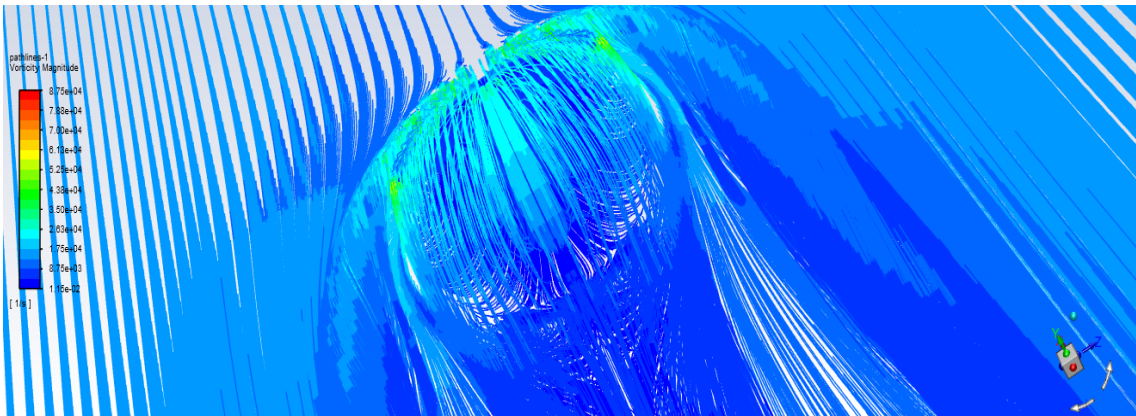


Figura 118- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s

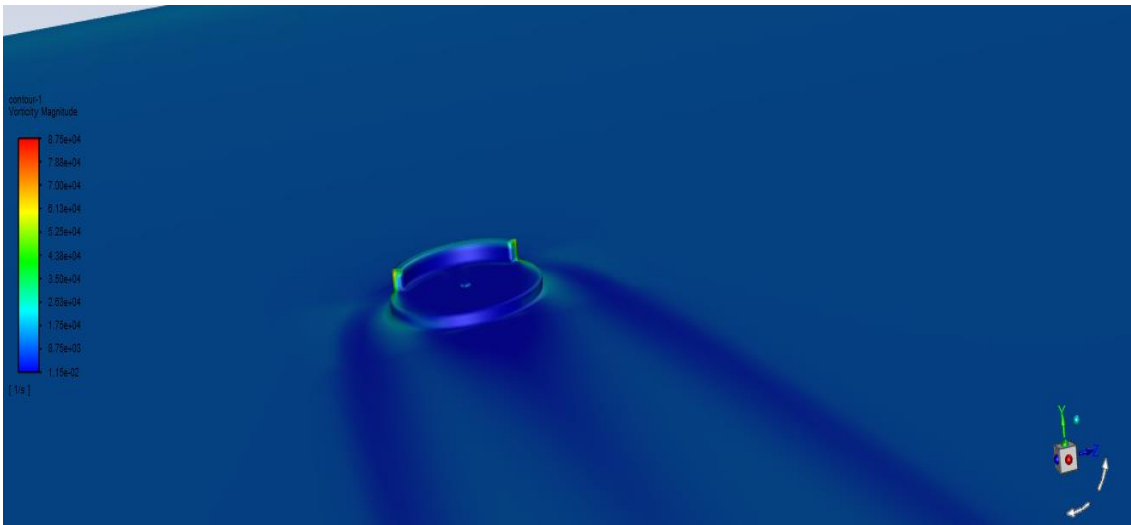


Figura 119- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 60 m/s

Ou seja, para a velocidade de escoamento de 60 m/s registaram-se os seguintes valores:

- **Pressão dinâmica média registada na condição de fronteira “tomada” – 10 Pascal**
- **Magnitude de vorticidade registada- 52500 1/s**

### Simulação da tomada de pressão estática nº2 para velocidade do escoamento de 70 m/s

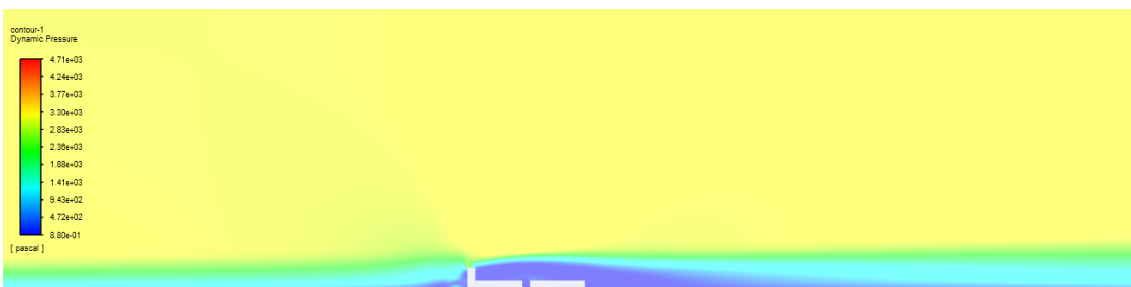


Figura 120- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s

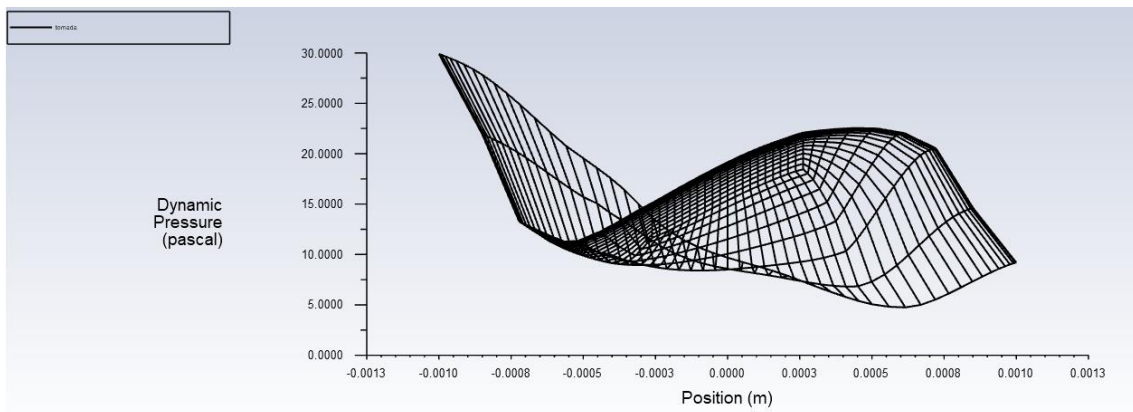


Figura 121- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s

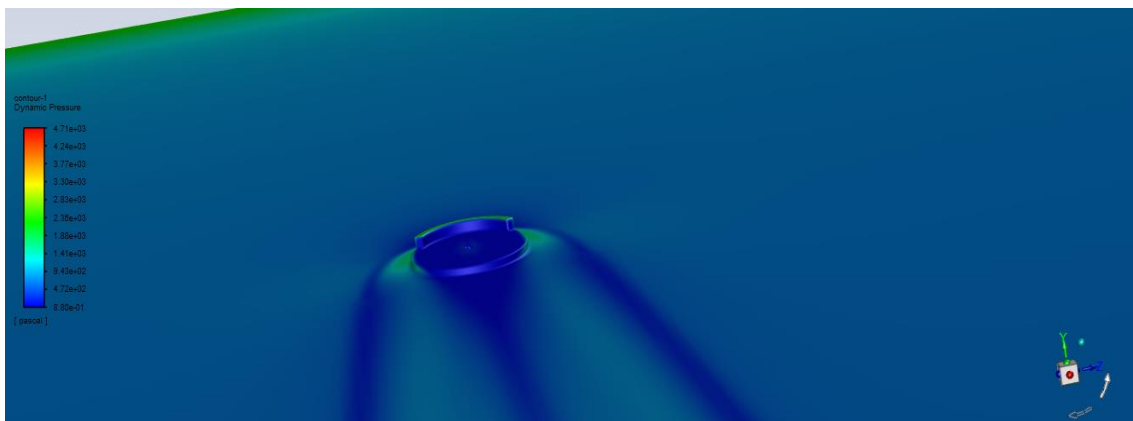


Figura 122- Perspetiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s

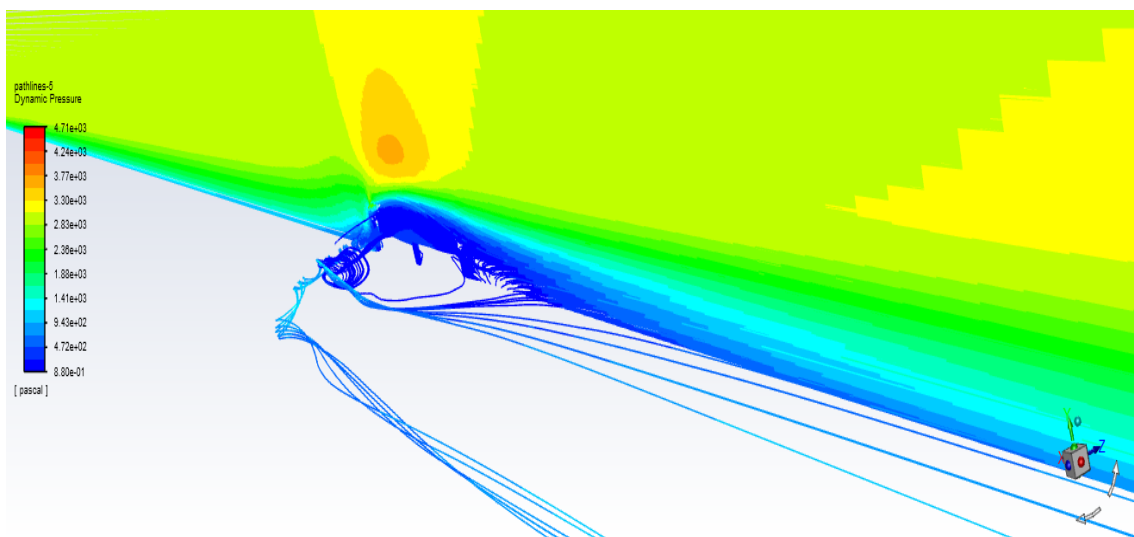


Figura 123- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s

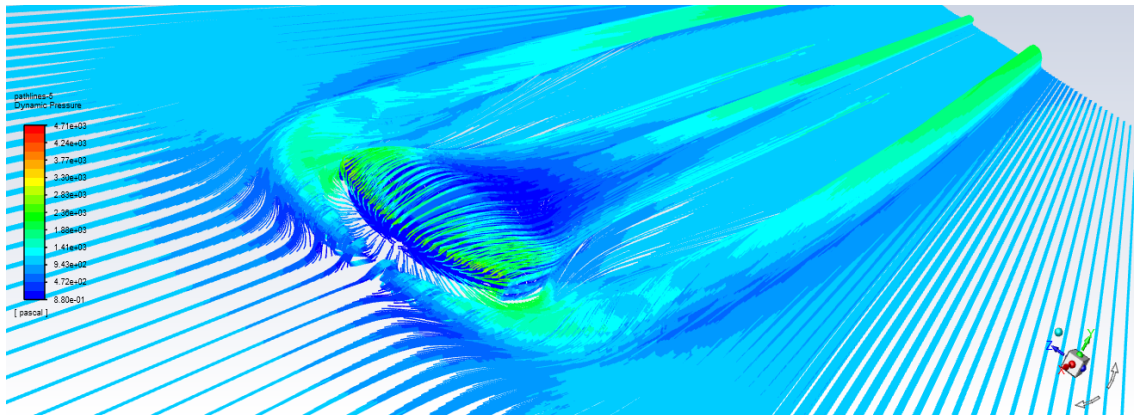


Figura 124- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s

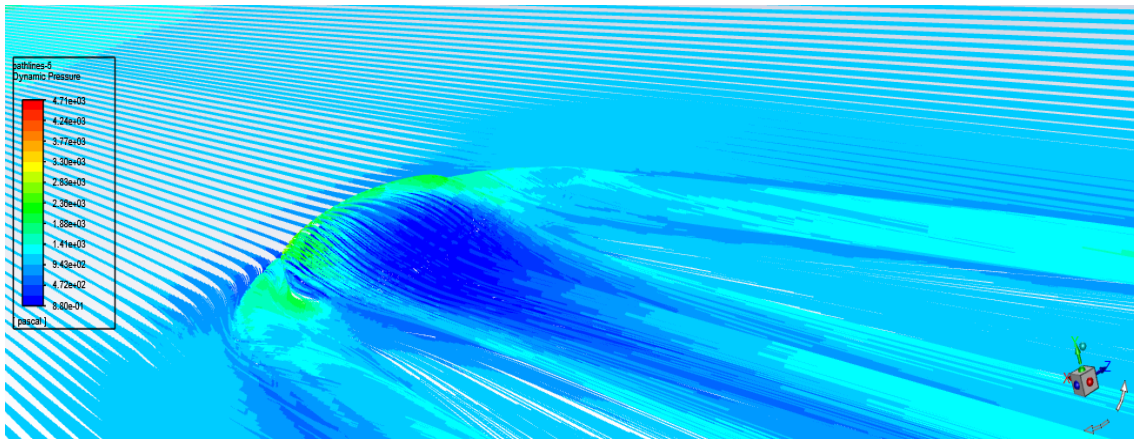


Figura 125- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s

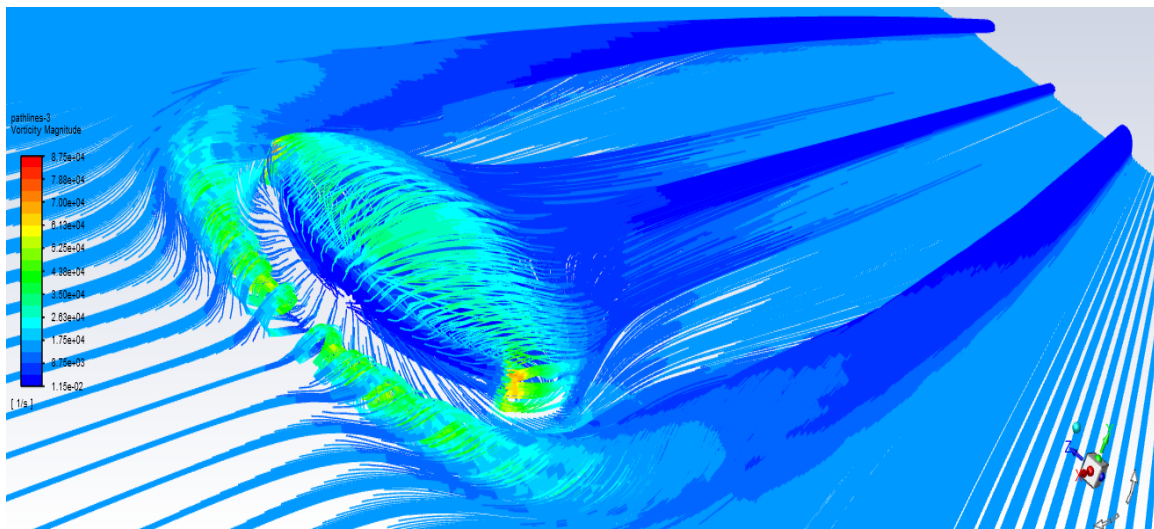


Figura 126- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s

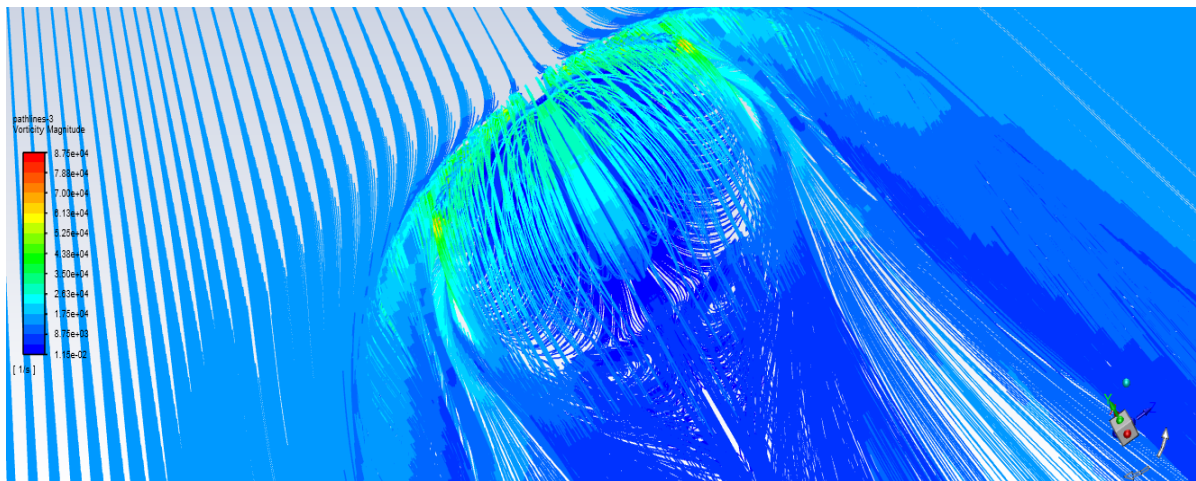


Figura 127- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s

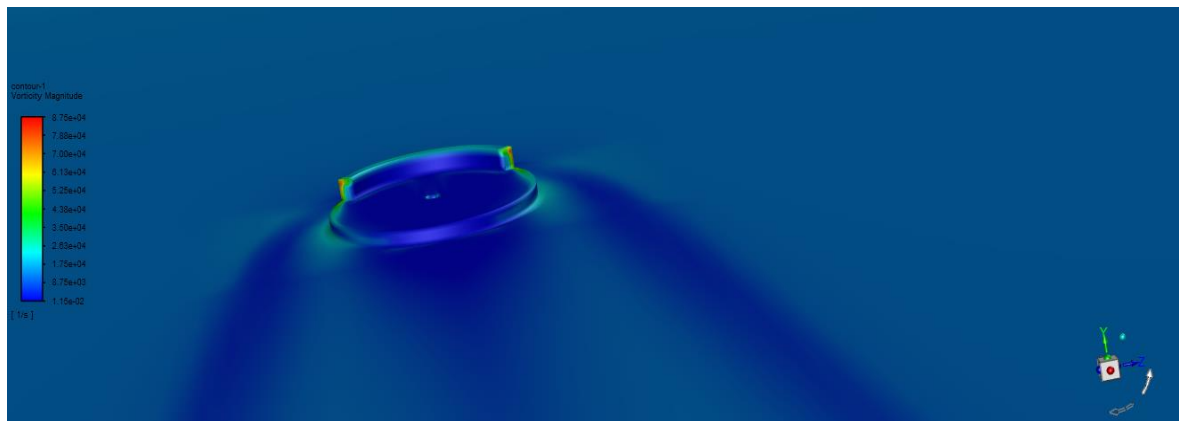


Figura 128- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 70 m/s

Ou seja, para a velocidade de escoamento de 70 m/s registaram-se os seguintes valores:

- **Pressão dinâmica média registada na condição de fronteira “tomada” – 16 Pascal**
- **Magnitude de vorticidade registada- 71000 1/s**

## Simulação da tomada de pressão estática nº2 para velocidade do escoamento de 80 m/s

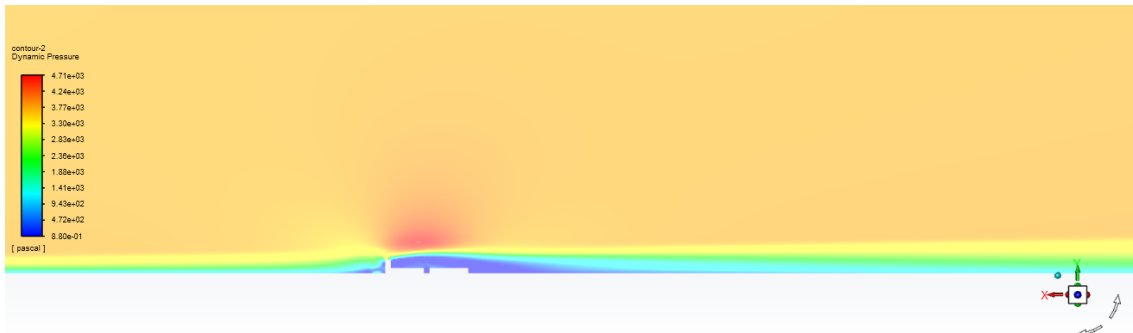


Figura 129- Distribuição bidimensional do campo de pressões dinâmicas através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s

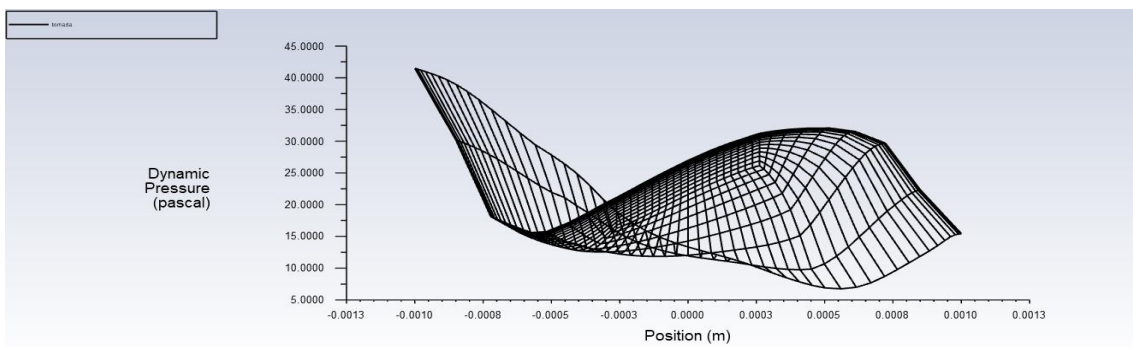


Figura 130- Distribuição da pressão dinâmica na condição de fronteira "tomada" para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s

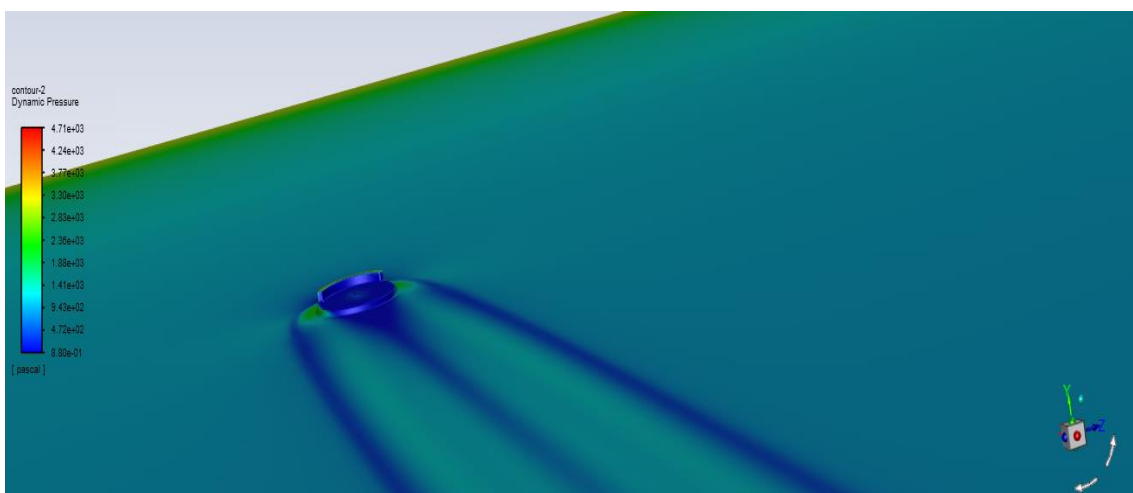


Figura 131- Perspectiva exterior da distribuição da pressão dinâmica através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s

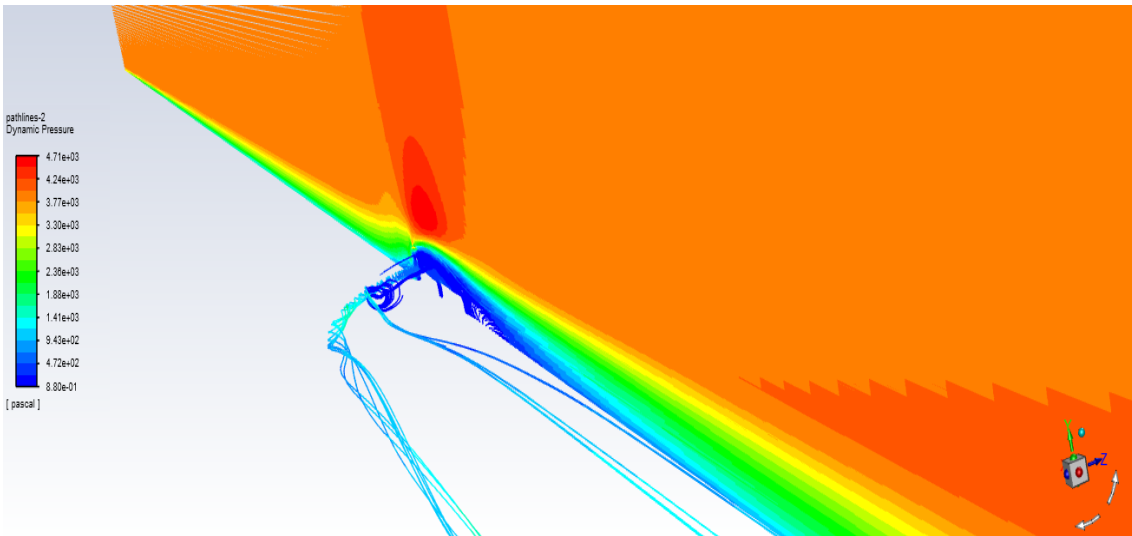


Figura 132- Distribuição tridimensional da pressão dinâmica segundo o plano de corte XY através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s

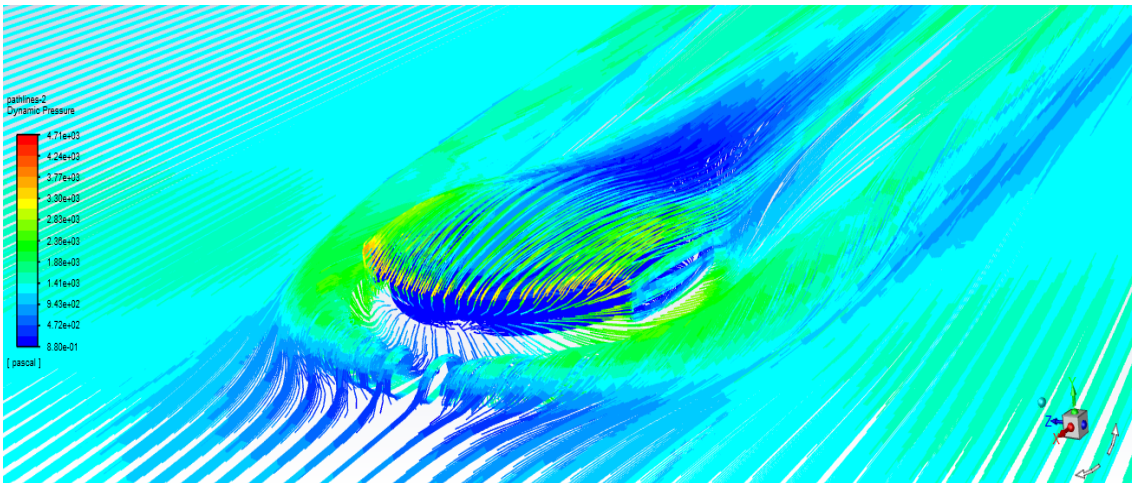


Figura 133- Perspectiva frontal aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s

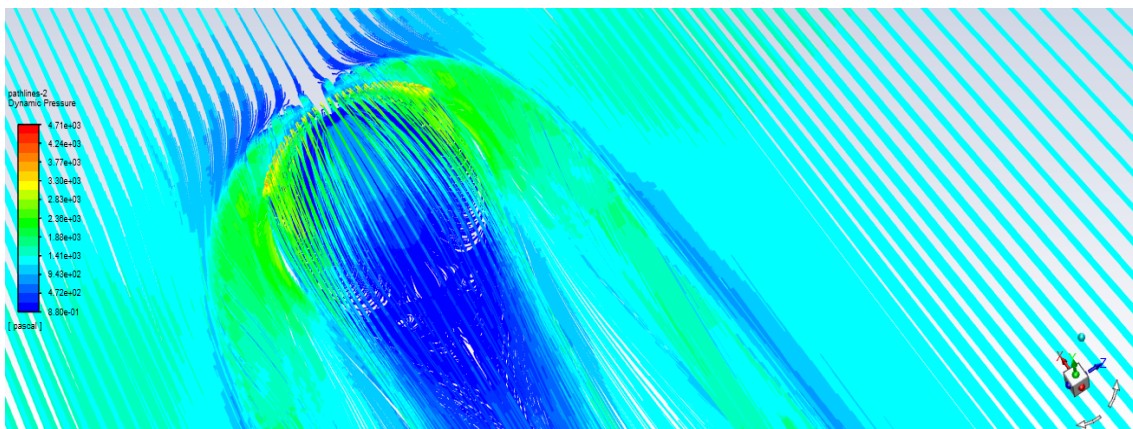


Figura 134- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da pressão dinâmica através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s

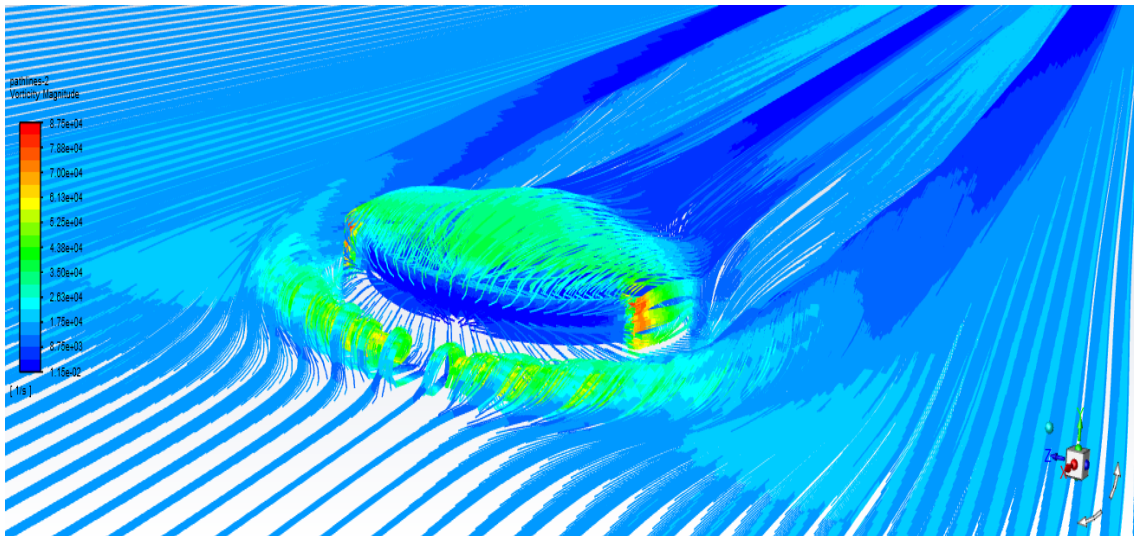


Figura 135- Perspetiva frontal aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s

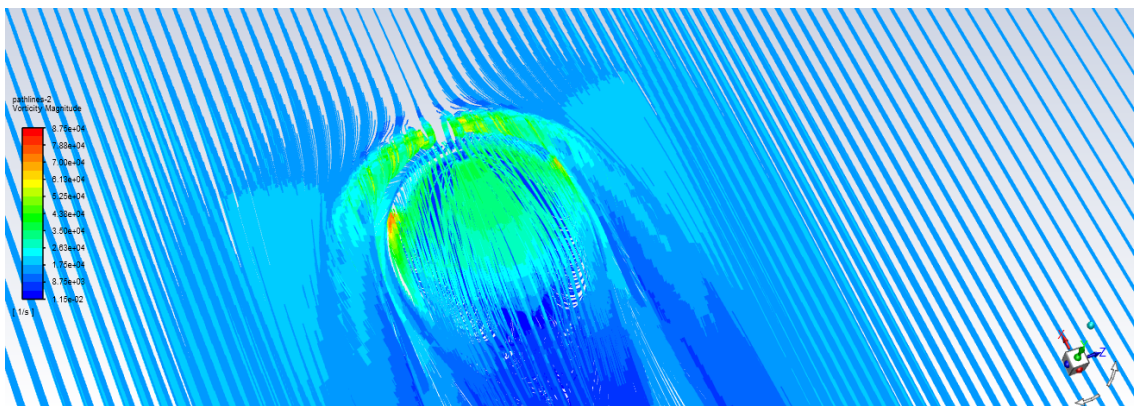


Figura 136- Perspetiva traseira aproximada da distribuição da magnitude de vorticidade através de pathlines para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s

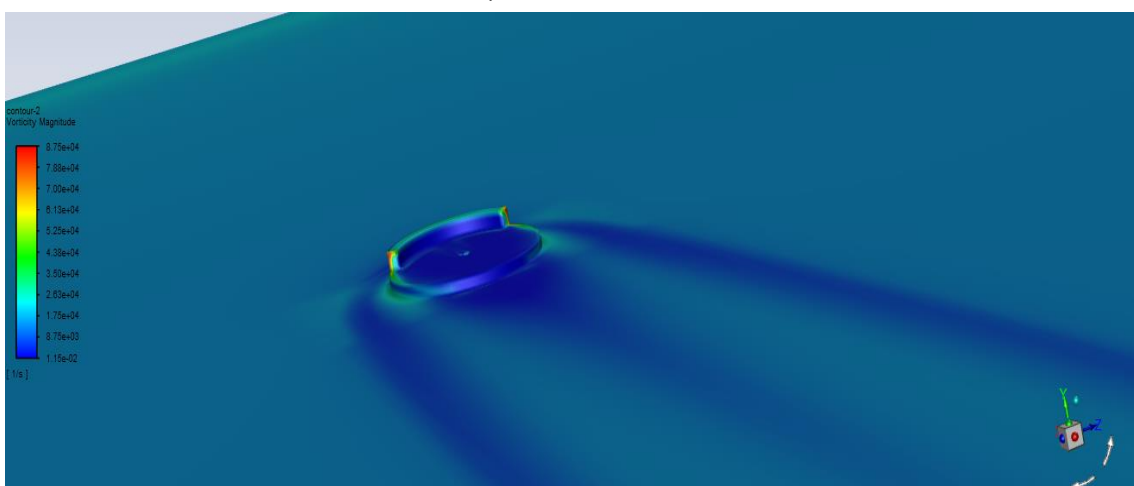


Figura 137- Perspetiva exterior da distribuição da magnitude de vorticidade através de contour para a tomada de pressão estática nº2 a 80 m/s

Ou seja, para a velocidade de escoamento de 80 m/s registaram-se os seguintes valores:

- **Pressão dinâmica média registada na condição de fronteira “tomada”** - 22 Pascal
- **Magnitude de vorticidade registada**- 86000 1/s

Em síntese e à semelhança da tomada nº1, a tabela nº2 compara os valores obtidos em cada simulação da tomada de pressão estática nº2 consoante as velocidades do escoamento exterior livre do ar.

<b>Simulação</b>	<b>Pressão dinâmica (Pa)</b>	<b>Magnitude de vorticidade (1/s)</b>
50 m/s	6	41000
60 m/s	10	52500
70 m/s	16	71000
80 m/s	22	86000

Tabela 2- Síntese comparativa dos resultados obtidos na tomada de pressão estática nº2 consoante a velocidade

Analogamente aos resultados obtidos nas simulações relacionadas com a tomada de pressão estática nº1, verifica-se pela tabela 2 que à medida que a velocidade do escoamento exterior livre do ar aumenta, tanto a pressão dinâmica como a magnitude de vorticidade aumentam da mesma forma.

Em relação à distribuição da pressão dinâmica nesta tomada de pressão estática, observa-se que o gradiente de pressões ao redor desta tomada de pressão estática é bastante superior quando a simulação é efetuada para 80 m/s quando comparada à simulação executada para 50 m/s. Ainda assim observa-se através da escala de cor do *contour* representado abaixo, que a linha de pressão estática contém uma pressão dinâmica relativamente semelhante tanto na simulação de 50 m/s como na simulação de 80 m/s, o que significa que a pressão dinâmica que se encontra presente na linha de pressão estática, não irá aumentar de forma tão evidente com o aumento da velocidade do escoamento exterior livre do ar, como se pode verificar pela figura 138 comparativa da distribuição bidimensional da pressão dinâmica para a simulação de 50 m/s e para a simulação de 80 m/s.

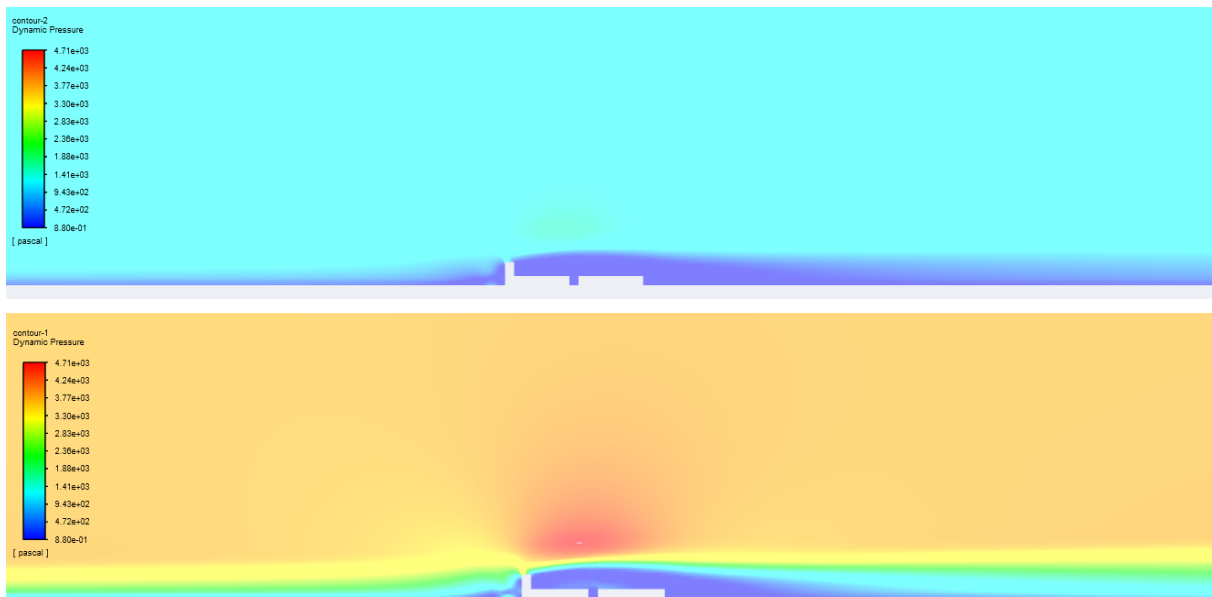


Figura 138- Comparação da distribuição da pressão dinâmica na tomada de pressão estática nº2 nas simulações de 50 m/s (esquerda) e 80 m/s (direita)

À semelhança da tomada de pressão estática nº1 observa-se, ainda que de forma pouco evidente, que à medida que a velocidade do escoamento de ar aumenta a altura da bolha de recirculação, localizada sobre a linha de pressão estática, aumenta também. Por consequência deste fator e aliado também ao aumento da velocidade do escoamento provoca com que a esteira, deixada pela colisão do escoamento do ar com a tomada de pressão estática, seja uma esteira bastante mais desenvolvida e por sua vez bastante mais turbulenta, como se verifica pela figura 139.

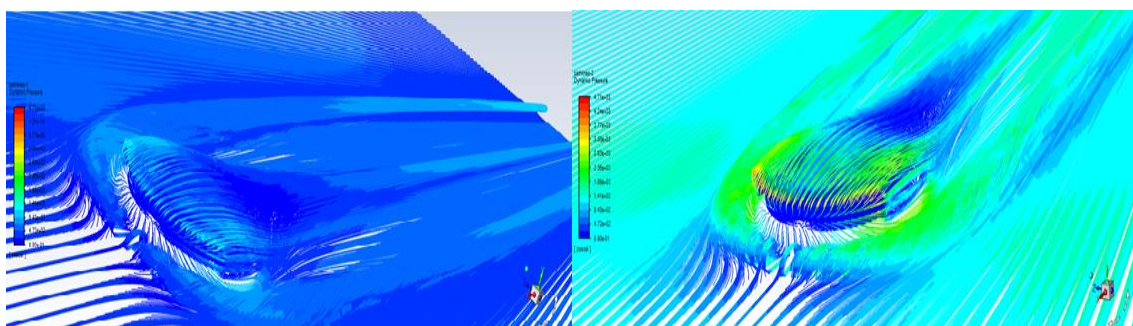


Figura 139- Comparação da bolha de recirculação e da esteira deixada na simulação de 50 m/s (esquerda) e 80 m/s (direita) para a tomada de pressão estática nº2

No que diz respeito à magnitude de vorticidade, esta cresce à medida que a velocidade do escoamento exterior do ar aumenta. Observa-se também que neste design de tomada de pressão estática a vorticidade ocorre em duas zonas distintas da mesma. Os primeiros vórtices a serem formados neste escoamento ocorrem justamente nas pontas aguçadas desta tomada, que se localizam na parte frontal da mesma. No entanto, também são formados outros vórtices

noutra zona da tomada de pressão estática, sendo essa zona localizada na segunda metade da tomada, onde o escoamento não tem capacidade de agarrar-se à parede do cilindro. Em virtude desta formação dupla de vórtices, é criada uma turbulência bastante elevada a jusante desta tomada, pois esses vórtices formados em zonas distintas da tomada de pressão estática quando se encontram provocam uma grande instabilidade nas partículas do escoamento, promovendo que a esteira existente se torne ainda mais desenvolvida e turbulenta. Na figura 140 consegue-se observar esse fenómeno de turbulência que ocorre a jusante da tomada de pressão estática e observa-se a diferença presente na magnitude de vorticidade entre a simulação para 50 m/s e a simulação para 80 m/s.

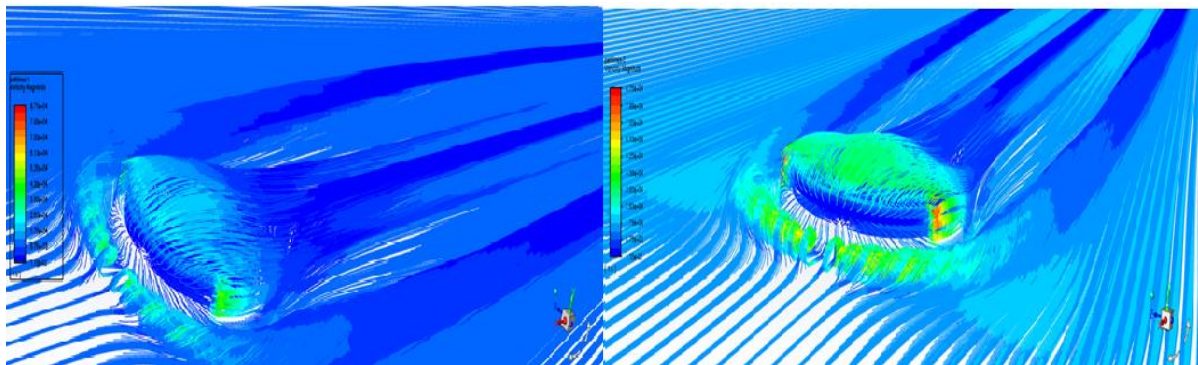


Figura 140- Comparação da magnitude de vorticidade na simulação de 50 m/s (esquerda) e 80 m/s (direita) para a tomada de pressão estática nº2

## 5.4 Comparação dos resultados obtidos entre a tomada de pressão estática nº1 e a tomada de pressão estática nº2

Tal como mencionado no começo deste capítulo, após se efetuar a análise dos resultados obtidos para cada tomada de pressão estática, de modo a averiguar-se a influência que o incremento que a velocidade do escoamento do ar teria nos parâmetros em estudo, iria se efetuar uma comparação entre os dois designs de tomada de pressão estática de modo a analisar-se qual das tomadas seria a mais eficaz na prevenção da entrada de pressão dinâmica na linha de pressão estática.

Portanto a tabela 3 compara os resultados obtidos em cada simulação efetuada, para assim se dar início à comparação dos resultados obtidos por cada tomada de pressão estática.

<b>Simulação</b>	<b>Pressão dinâmica (Pa) medida na linha de pressão estática da tomada de pressão estática nº1</b>	<b>Pressão dinâmica (Pa) medida na linha de pressão estática da tomada de pressão estática nº2</b>	<b>Magnitude de vorticidade (1/s) medida na tomada de pressão estática nº1</b>	<b>Magnitude de vorticidade (1/s) medida na tomada de pressão estática nº2</b>
50 m/s	15	6	34000	41000
60 m/s	25	10	49000	52500
70 m/s	37	16	69000	71000
80 m/s	42	22	77000	86000

Tabela 3- Comparação dos resultados obtidos entre as duas tomadas de pressão estática

Observando a tabela acima, verifica-se com clareza que a pressão dinâmica medida na linha de pressão estática (condição de fronteira "tomada") da tomada de pressão estática nº2 é inferior à pressão dinâmica medida na tomada de pressão estática nº1. Também pode observa-se que a pressão dinâmica medida na tomada de pressão estática nº2 é em média metade da pressão dinâmica medida na tomada de pressão estática nº1. Constata-se ainda que a magnitude de vorticidade medida na tomada de pressão estática nº2 é superior à magnitude de vorticidade medida na tomada de pressão estática nº1. No entanto verifica-se que a diferença de magnitude de vorticidade de uma tomada de pressão estática para outra não é tão acentuada quanto a pressão dinâmica medida entre as duas tomadas.

Em relação à distribuição da pressão dinâmica ao redor de cada uma das tomadas, verifica-se que a tomada de pressão estática nº2 tem a capacidade de criar uma bolha de recirculação acima da linha de pressão estática, muito superior em termos de dimensão à bolha de recirculação criada pela tomada de pressão estática nº1. Isto deve-se ao facto de a tomada

de pressão estática nº2 possuir um design ligeiramente diferente ao design da tomada de pressão estática nº1, pois na prática a tomada nº2 é uma adaptação do design da tomada nº1, sendo a única diferença entre elas o facto de a tomada nº2 possui um acrescento acima do disco que protege a linha de pressão estática. Esse acrescento que acompanha cerca de 1/3 do perímetro provoca a criação de uma bolha de recirculação de escoamento bastante superior à bolha de recirculação criada pela tomada de pressão estática nº1. Por conseguinte, quando é criada uma bolha de recirculação superior é natural e lógico que a pressão dinâmica medida seja inferior, pois é criada uma barreira à circulação do escoamento exterior do ar, sendo essa a razão principal pela qual a pressão dinâmica medida na linha de pressão estática da tomada de pressão estática nº2, ser cerca de metade da pressão dinâmica medida na tomada de pressão estática nº1.

A figura 141 compara as simulações de 80 m/s para a tomada de pressão estática nº1 e nº2, onde se verifica visualmente o que foi mencionado no parágrafo anterior.

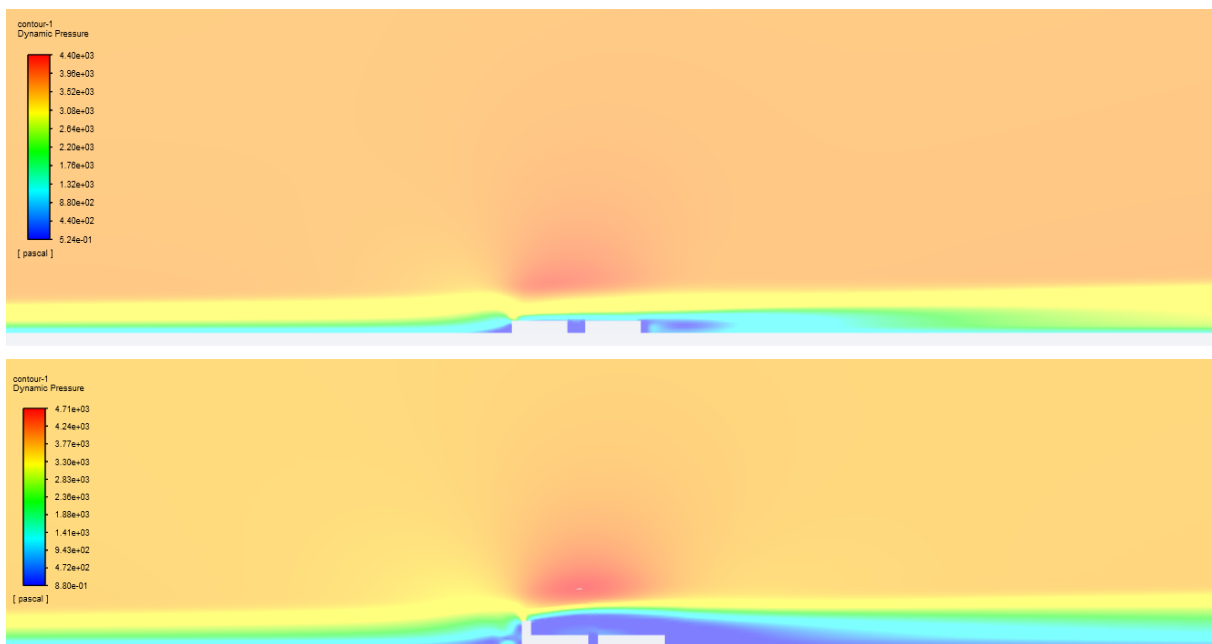


Figura 141- Comparação entre a distribuição de pressão dinâmica entre a tomada de pressão estática nº1 (tomada de cima) e nº2 (tomada de baixo), para a mesma velocidade de escoamento exterior

Quanto à magnitude de vorticidade, esta é ligeiramente superior na tomada de pressão estática nº2. Este facto ocorre devido à formação de vórtices em duas zonas distintas da tomada de pressão, e também pelo facto de que os primeiros vórtices formados no acrescento mencionado anteriormente, que cobre 1/3 do disco protetor da linha de pressão estática, serem bastante mais intensos devido às pontas aguçadas do acrescento. A vorticidade observada é bastante mais intensa quando comparada aos vórtices formados quando o escoamento já

não tem capacidade para agarrar-se à parede circular do cilindro. Por essa razão, e visto que os vórtices formados na tomada de pressão estática nº1 ocorrem através da incapacidade do escoamento ficar agarrado à parede circular do seu disco, é natural que a magnitude de vorticidade seja ligeiramente superior na tomada de pressão estática nº2, devido à presença dessas arestas vivas, como se pode aferir pela figura 142.

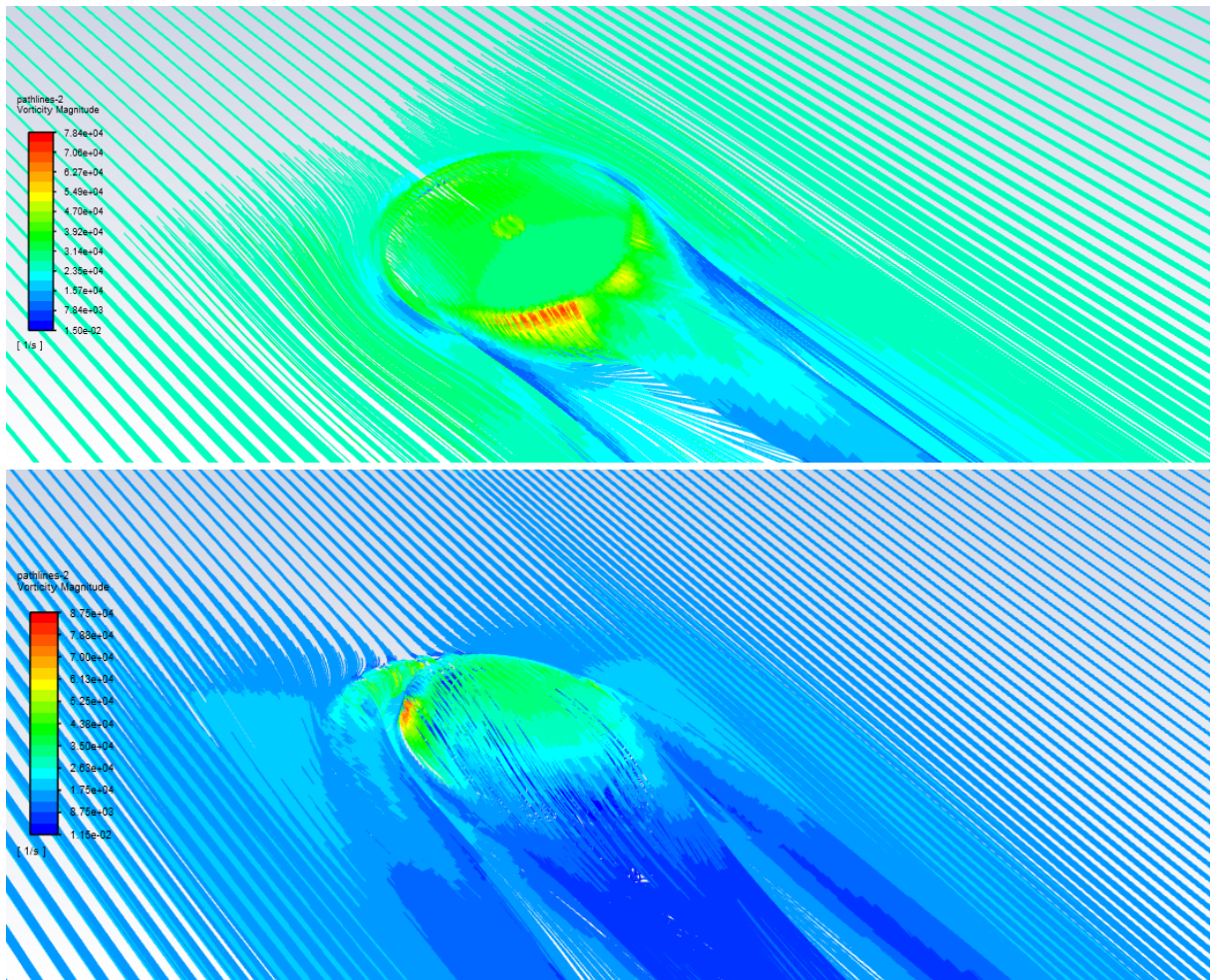


Figura 142- Comparação entre a magnitude de vorticidade entre a tomada de pressão estática nº1 (tomada de cima) e nº2 (tomada de baixo), para a mesma velocidade de escoamento exterior (80m/s)

Em suma, e como se pode constatar pela comparação efetuada dos resultados obtidos entre cada uma das tomadas de pressão estática, depende-se que a tomada de pressão estática mais eficaz na prevenção da entrada de pressão dinâmica na linha de pressão estática é a tomada de pressão estática nº2, pois é aquela que obteve os melhores resultados na medição de pressão dinâmica na linha de pressão estática. Todavia ambas têm uma influência bastante notória na redução da pressão dinâmica que entra na linha de pressão estática.

De notar que com a entrada de pressão dinâmica na linha de pressão estática, a pressão total que será medida, e que será transmitida aos instrumentos de voo será a pressão estática do meio envolvente mais a pressão dinâmica que se encontra presente na linha de pressão estática. Sabendo que cada 100 Pascal corresponde à pressão de 27 pés de ar, o erro máximo admitido para 80 m/s na tomada de pressão estática nº2 na leitura de altitude é de 6 pés. Assim é comprovada a importância da existência de um dispositivo capaz de diminuir a entrada de pressão dinâmica na linha de pressão estática, de modo a não ocorrerem erros de leitura nos instrumentos de voo, para assim se evitarem possíveis acidentes ou incidentes em voo.



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 Síntese da investigação

O principal objetivo desta dissertação era a modelação tridimensional dos dois modelos de tomada de pressão estática presentes no Tecnam P2008 para que cada um destes modelos fosse devidamente testado através de simulações numéricas, de modo a verificar-se a redução de pressão dinâmica que entra na linha de pressão estática, e também concluir-se qual dos dois designs de tomada de pressão estática seria o mais eficaz na prevenção de entrada de pressão dinâmica na linha de pressão estática.

Para a realização desta dissertação, foi necessário adquirir conhecimento prévio acerca do funcionamento do sistema pitot-estático da aeronave em causa, bem como entender como deveria ser efetuada uma simulação em CFD que envolvesse escoamento exterior, de modo a garantir que as simulações efetuadas produziram resultados o mais realista possíveis, que seria um fator fundamental e imprescindível para o sucesso na elaboração desta dissertação.

Devido a toda a profundidade inerente ao estudo deste tipo de escoamento exterior ao redor da tomada de pressão estática, foi essencial efetuar uma investigação acerca da modelação numérica que seria utilizada nesta dissertação. Apenas com essa investigação é que se conseguiu concluir qual dos modelos de turbulência seria o mais adequado a utilizar, bem como qual seria o tratamento que a malha deveria conter junto à sua parede, para assim garantir que as simulações a efetuar seriam simulações que iriam representar de forma fiel a interação entre um escoamento exterior e a tomada de pressão estática.

No que diz respeito às dificuldades enfrentadas no decorrer da elaboração desta dissertação, estas ocorreram aquando da elaboração da malha e da execução das simulações numéricas. A elaboração da malha para cada tomada de pressão estática conteve vários desafios, pois o método escolhido para a elaboração da malha, apesar de obter resultados bastante

satisfatórios, é um método bastante custoso a nível temporal, pois cada modificação que era efetuada na malha demorava algum tempo a ser implementada, dado as malhas obtidas serem bastante complexas e pesadas a nível computacional. Outro desafio residia em cumprir os parâmetros de qualidade da malha, nomeadamente a ortogonalidade, visto que estas malhas continham vários cantos arredondados o que facilitava a obtenção de uma malha não-estrutura e sem qualidade. Em relação à execução das simulações numéricas, as mesmas eram bastante exigentes a nível computacional, o que se traduzia em simulações morosas, dificultando bastante a obtenção de resultados de uma maneira mais prática e direta.

Por outro lado, podia se ter optado por uma malha menos exigente a nível computacional, no entanto não seria possível visto que o estudo que se pretendia teria de conter um  $y^+$  menor que 5, pois era essencial que o estudo fosse feito junto à parede na subcamada viscosa, sendo essa a principal razão de que cada simulação e de cada mudança na malha custasse tanto tempo a ser elaborada.

Em síntese, considera-se que apesar dos desafios e adversidades enfrentados esta dissertação cumpriu o propósito a que estava destinada, ou seja, comprovou-se que a existência de uma tomada de pressão estática induz a redução da pressão dinâmica presente na linha de pressão estática, e concluiu-se também qual seria o design mais eficaz na prevenção de entrada de pressão dinâmica na linha de pressão estática, sendo o design mais eficaz o relacionado com a tomada de pressão estática nº2.

## 6.2 Sugestão para trabalho futuro

Uma ideia para trabalho futuro de continuação do estudo da diminuição da pressão dinâmica na linha de pressão estática através da criação de tomadas de pressão estática, seria efetuar simulações numéricas com outros modelos computacionais tais como DNS ou LES, e com outros designs pertinentes de tomadas de pressão estática, que praticamente extinguissem a entrada de pressão dinâmica na linha de pressão estática.

A figura 143 ilustra novas ideias de designs para tomadas de pressão estática, que poderão reduzir ainda mais a entrada de pressão dinâmica em cada linha de pressão estática, porém podem prejudicar a aerodinâmica da aeronave, produzindo mais arrasto, sendo esse um parâmetro não desejável numa aeronave.

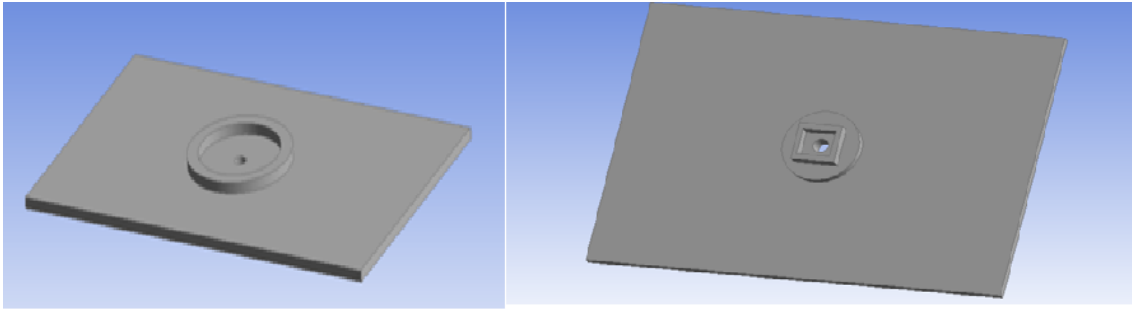


Figura 143- Novos designs para tomadas de pressão estática



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Metz R. Static Port Location and Altitude Calibration.Kitplanes.2017. <https://www.kitplanes.com/static-port-location-and-altitude-calibration/> (acedido Mar.28, 2022)
- [2] Flight Manual P2008 TC. Tecnam. 2017.pp26
- [3] Tallman, J. How it works: pitot-static system the pressure's on. Aopa. <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2018/november/flight-training-magazine/how-it-works-pitot-static-system> (acedido Mar.28, 2022)
- [4] Morgan, T. How does the Cessna 172 airspeed indicator work?. <https://www.quora.com/How-does-the-Cessna-172-airspeed-indicator-work> (acedido Mar.29, 2022)
- [5] COIMBA, A.L. Mecânica dos Fluidos. Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015.
- [6] Freire, A.P.S Teoria de Camada Limite. Programa de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1990.
- [7] Sumer, B. M. e Fredsoe J. "*Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*", Advanced Series on Ocean Engineering, volume 26, 2006.
- [8] Munson, Bruce R. et al., "*Fundamentals of Fluid Mechanics*", John Wiley & Sons, Inc, 4ª edição, 2000
- [9] Blevins, R. D., 1990, "Flow-Induced Vibration", 2ª. Ed., Van Nostrand Reinhold, New York
- [10] Sengur, R. CFD modeling of submerged membrane bioreactors (sMBRs): A review
- [11] Dyke ,V. An Album of Fluid Motion,1982
- [12] Turbulence Models In CFD. Ideal Simulations. <https://www.idealsimulations.com/resources/turbulence-models-in-cfd/> (acedido 16 Jun. 2022)
- [13] Menter, F. R., "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, August 1994, pp. 1598-1605, <https://doi.org/10.2514/3.12149>.
- [14] What is a Mesh. SimScale. <https://www.simscale.com/docs/simwiki/preprocessing/what-is-a-mesh/> (acedido Jul. 7, 2022)

- [15] Tecchio C. Desenvolvimento de metodologia numérica para otimização de malhas de blocos múltiplos para aplicações aeroespaciais.2014
- [16] Pequeno A. Malha e Modelo de Turbulência. Engenharia Aeronáutica. <https://engenhariaaeronautica.com.br/artigos-engenharia-aeronautica/malha-e-modelo-de-turbulencia/> (acedido Ago. 3, 2022)
- [17] Luiz F. Avaliação da qualidade da malha. Notas em CFD.2015. <http://notasemcfd.blogspot.com/2015/07/avaliacao-da-qualidade-da-malha.html> (acedido Ago. 4, 2022)
- [18] Petrock S. Is This a Good FEA Mesh? Here's How to Answer Yes, No, and All-You-Need-to-Know About Meshing Infographic. 2017. <https://blogs.solidworks.com/tech/2017/08/good-fea-mesh-heres-answer-yes-no-need-know-meshing-infographic.html> (acedido Ago 10, 2022)
- [19] Basics of Y Plus, Boundary Layer and Wall Function in Turbulent Flows. LearnCAx. <https://www.learncax.com/knowledge-base/blog/by-category/cfd/basics-of-y-plus-boundary-layer-and-wall-function-in-turbulent-flows> (acedido Ago. 12, 2022)
- [20] What is y+ (yplus)?. SimScale CAE Forum.2018 <https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-yplus/82394> (acedido Ago. 16, 2022)
- [21] Lamberts M. Jet Photos. <https://www.jetphotos.com/photo/10439115> (acedido Ago. 28, 2022)
- [22] Atsushi, Y; Takeshi, I; Yozo, F. Numerical modeling of local wind focusing on computational domain setting and boundary treatments. Yokohma.2006
- [23] Pressure-Based Solver. AFS. 2009 <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node361.html> (acedido Ago. 2, 2022)



