



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Estudo da influência da secção transversal dos pilares na força de arrasto

Jorge Miguel Leitão Rodrigues

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutora Cristina Maria Sena Fael

Covilhã, Outubro de 2012

Dedicatória

Aos meus Pais

Agradecimentos

À Orientadora desta Dissertação, Professora Doutora Cristina Maria Sena Fael, por todo o apoio, empenho e dedicação prestados a este trabalho. Um muito obrigado também pelo despertar para novos caminhos de investigação e ensinamentos que em muito contribuíram para o meu desenvolvimento enquanto futuro profissional da Engenharia Civil.

Ao Professor Doutor João António Saraiva Pires da Fonseca, pelas discussões científicas que em muito enriqueceram este trabalho.

Ao Engenheiro Clemente Pinto por toda a disponibilidade, apoio e discussões que levaram ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Sr. Jorge Barros, técnico do laboratório de Hidráulica da Universidade da Beira Interior, pela disponibilidade, apoio e paciência que sempre teve ao longo do desenvolvimento desta Dissertação, bem como as palavras de incentivo e os momentos de boa disposição.

Ao Sr. Albino Alves e Luciano Rato, técnicos do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da Universidade da Beira Interior pela experiência e capacidades técnicas que colocaram ao meu dispor, bem como pelas palavras de incentivo e momentos de boa disposição prestados.

Ao Rolando Pereira por toda a disponibilidade, amizade e auxílio informático prestado para a realização deste trabalho.

Ao Rafael Ferreira por toda a amizade, companheirismo e apoio na configuração do trabalho.

À Filipa por todo o apoio, estímulo, amizade e incentivo ao longo de todo este trabalho.

A toda a minha família pelo apoio incondicional, paciência e preocupação demonstrada ao longo de toda a minha vida académica, e sem os quais não teria sido possível chegar até aqui.

A todos os meus amigos pelo entusiasmo, palavras de apreço e compreensão que em muito contribuíram para a conclusão deste trabalho, muito obrigado.

Um muito obrigado a todos os que contribuíram para a realização desta Dissertação, e que provaram que com apoio, é muito mais provável atingir os objectivos propostos.

Resumo

O escoamento em torno de um pilar origina diversos fenómenos resultantes da interacção entre o escoamento e o obstáculo. A análise e previsão destes fenómenos é bastante empírica e baseada apenas na literatura e ensaios controlados laboratorialmente a escalas reduzidas. No presente trabalho, foi tida em consideração toda a informação existente na literatura e experiências laboratoriais realizadas anteriormente. Contudo, a grande diferença em relação às demais investigações realizadas nesta área é conseguida através da utilização das novas tecnologias, mais concretamente através da modelação numérica de escoamentos através do *Fluent*.

Assim sendo, realizaram-se onze simulações no *Fluent*, utilizando o *Large Eddy Simulation*, como modelo de turbulência do escoamento. As três primeiras simulações foram realizadas com objectivo da validação da malha a utilizar nas restantes simulações. Por sua vez, as simulações com secção quadrada e circular são comparadas com os valores obtidos teoricamente através da revisão bibliográfica, feita neste trabalho, de modo a que o programa utilizado seja validado e transmita segurança nos valores obtidos futuramente. As restantes simulações são realizadas utilizando variadas secções transversais de pilares, de modo a comparar os resultados das forças de arrasto, e ver quais as secções que melhor se adaptam aos escoamentos turbulentos.

O conjunto das simulações permitiu estudar diferentes valores da força de arrasto, e que esta varia consoante o tipo de secção e as suas respectivas dimensões geométricas. Assim, foi possível observar através do programa utilizado, os fenómenos descritos na bibliografia, e também concluir que a análise deste tipo de interacções entre escoamentos e obstáculos quando feita após validação do programa utilizado, pode ser feita para os mais variados cenários de investigação.

Palavras-chave

Obstáculo, *Fluent*, Força de arrasto, modelação numérica

Abstract

The flow around the pier causes several phenomena resulting of the interaction between the flow and the obstacle. The analysis and prediction of this phenomenon is quite empiric and simply based in literature and rehearses controlled in laboratory to smaller scales.

In this present research, it was considered all the existing information in literature and laboratorial experiences previously performed. However, the great difference in relation to the other investigations performed in this area is achieved through the use of new technologies, more specifically through the numerical modelling of flows through the *Fluent*. Therefore, eleven simulations in the *Fluent* were held using the *Large Eddy Simulation* as the model of the turbulence of the flow. The first three simulations were performed in order to validate the mesh for use in other simulations. On the other hand, the simulations with circular and square section are compared to the values that were theoretically obtained through the bibliographic revision done in this research so that the used programme can be authenticated and may transmit security in the values obtained hereafter. The remaining simulations are performed using several cross-sections of piers, in order to compare the results of the drag forces among them and see the sections that are better adaptable to the turbulent flows.

The set of these simulations allowed observing the most diversified values of the drag force and that this varies according to the type of section and its respective geometrical dimensions. Therefore, it was possible to observe through the used program the phenomenon described in the bibliography and it was also possible to conclude that the analysis of this type of interaction between flows and obstacles, when done after validation program used, can be made for various scenarios of investigation.

Keywords

Obstacle, *Fluent*, drag force, numerical modelling

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação e enquadramento	1
1.2 Organização da dissertação	3
2. CARACTERIZAÇÃO DOS ESCOAMENTOS E OBSTÁCULOS	5
2.1 Introdução	5
2.2 Regimes de escoamento	5
2.3 Classificação dos obstáculos	6
2.4 Interacção escoamentos vs obstáculos.....	7
2.4.1 Introdução.....	7
2.4.2 Regime de escoamento laminar.....	8
2.4.3 Regime de escoamento de transição.....	10
2.4.4 Regime de escoamento turbulento.....	13
3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE FLUIDOS.....	25
3.1 Introdução	25
3.2 Equações governativas	26
3.2.1. Conservação da massa	26
3.2.2. Equação da quantidade de movimento	26
3.2.3. Variáveis características da turbulência	26
3.3 Modelos de resolução numérica.....	28
3.3.1 Introdução.....	28
3.3.2 Modelos baseados nas equações RANS	28
3.3.2.1 Modelo <i>standard</i> $k-\varepsilon$	30
3.3.2.2 Modelo $k-\omega$	30
3.3.2.3 Shear Stress Transport $k-\omega$	31
3.3.3 Large Eddy Simulation - LES	31
3.3.4 Direct Numerical Simulation - DNS	32
3.4 Métodos para a separação no espaço.....	32
3.4.1 Métodos dos volumes finitos.....	33
3.5 Malhas	33
4. PROCEDIMENTO NUMÉRICO	37
4.1 Introdução	37

4.2 Características gerais do processo de simulação	37
4.3 Procedimento da simulação	38
4.3.1 Concepção da geometria da simulação	38
4.3.2 Geração da malha	39
4.3.3 Selecção do modelo de turbulência do escoamento	41
4.3.4 Condições de fronteira	43
4.3.5 Selecção do método de solução	46
4.3.6 Concretização do cálculo numérico	47
5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	49
5.1 Introdução	49
5.2 Características gerais das simulações	49
5.3 Simulação 1 - Secção transversal circular 1	53
5.4 Simulação 2 - Secção transversal circular 2	53
5.5 Simulação 3 - Secção transversal circular 3	53
5.6 Simulação 4 - Secção transversal quadrada	69
5.7 Simulação 5 - Secção transversal oblonga	74
5.8 Simulação 6 - Secção transversal lenticula-oblonga	79
5.9 Simulação 7 - Secção transversal lenticula oblonga	84
5.10 Simulação 8 - Secção transversal lenticular	89
5.11 Simulação 9 - Secção transversal lenticular	94
5.12 Simulação 10 - Secção transversal lenticular	99
5.13 Simulação 11 - Secção transversal lenticular	104
5.14 Resultados finais	109
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS INVESTIGAÇÕES	114
6.1 Aspectos gerais e conclusões	115
6.2 Sugestões para futuras investigações	116
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Formas de secções aerodinâmicas e rombudas de pilares.....	6
Figura 2.2 - Esteira de Von Kármán - Ilhas Canárias, extraído de http://wakes.uma.pt/pt/research.php em 10 de Setembro de 2012.....	7
Figura 2.3 - escoamento muito lento, $Re=1$, extraído de Carvalho (2003).....	8
Figura 2.4 - escoamento laminar lento, estado de separação, $Re=40$, extraído de Carvalho (2003).....	9
Figura 2.5 - Regime laminar periódico, $Re=45$, extraído de Carvalho (2003).....	9
Figura 2.6 - Regime laminar periódico, $Re=65$, extraído de Carvalho (2003).....	9
Figura 2.7 - Regime laminar periódico, $Re=202$, extraído de Carvalho (2003).....	9
Figura 2.8 - Regime de transição para $180 < Re < 250$, extraído de Carvalho (2003).....	10
Figura 2.9 - Regime de transição para $250 < Re < 400$, extraído de Carvalho (2003).....	10
Figura 2.10 - Transição na camada de corte para $Re=2 \cdot 10^3$, extraído de Carvalho (2003).....	11
Figura 2.11 - Transição na camada de corte para $Re=8 \cdot 10^3$, extraído de Carvalho (2003)	12
Figura 2.12 - Transição na camada de corte para $Re=110 \cdot 10^3$, extraído de Carvalho (2003)	12
Figura 2.13 - Regimes de escoamento em torno de um cilindro, extraído de Lindquist (2000)	14
Figura 2.14 - Regiões de escoamento próximas ao cilindro, extraído de Ferreira (2003)	15
Figura 2.15 - Formação do vórtice ferradura num regime de escoamento no plano de simetria, extraído de Ferreira (2003).....	16
Figura 2.16 - Vórtice secundário, extraído de Ferreira (2003).....	16
Figura 2.17 - Análise campo de escoamento, extraído de Carvalho (2003).....	17
Figura 2.18 - Linhas de emissão instantâneas em torno de um cilindro, extraído de Carvalho (2003)	19
Figura 2.19 - Relação entre Re e St para uma pequena secção circular, extraído de Sumer e Fredsoe (1997)	20
Figura 2.20 - Valor do coeficiente de arrasto para um cubo, extraído de White (2011)...	23
Figura 2.21 - Valor do coeficiente de arrasto vs número de Reynolds para diferentes tipos de obstáculo ao escoamento, extraído de White (2011).....	23
Figura 3.1 - Exemplo de malha ortogonal, extraído de Gonçalves (2007).....	34

Figura 3.2 - Exemplo de malha não ortogonal, extraído de Gonçalves (2007).....	34
Figura 3.3 - Exemplo de malha estruturada, extraído de Gonçalves (2007).....	35
Figura 3.4 - Exemplo de malha não estruturada, extraído de Gonçalves (2007).....	35
Figura 4.1 - Menu geral do ANSYS Workbench.....	38
Figura 4.2 - Exemplo de uma geometria possível para uma simulação.....	39
Figura 4.3 - Menu da formulação da malha - Sizing ANSYS Meshing.....	40
Figura 4.4 - Exemplo de uma malha - Vista isométrica.....	40
Figura 4.5 - Fluent Launcher.....	41
Figura 4.6 - Menu geral.....	42
Figura 4.7 - Escolha do modelo de turbulência.....	43
Figura 4.8 - Definição das propriedades dos materiais.....	44
Figura 4.9 - Condição de fronteira da secção “entrada”	45
Figura 4.10 - Características da superfície livre.....	45
Figura 4.11 - Exemplo da escolha do modelo de solução.....	47
Figura 4.12 - Resíduos resultantes das iterações do processo de cálculo.....	47
Figura 4.13 - Exemplo do Menu Run Calculation.....	48
Figura 5.1 - Sugestão das dimensões do domínio de cálculo, extraído de Azevedo (2011).....	50
Figura 5.2 - Dimensões do domínio de cálculo.....	50
Figura 5.3 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 1.....	54
Figura 5.4 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 1.....	54
Figura 5.5 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 1.....	55
Figura 5.6 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - Simulação 1.....	55
Figura 5.7 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 1.....	56
Figura 5.8 - Pressão total - Vista planta - simulação 1.....	56
Figura 5.9 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 1.....	57

Figura 5.10 - Pressão Estática - eixo de simetria - simulação 1.....	57
Figura 5.11 - Pressão total no pilar - simulação 1.....	58
Figura 5.12 - Resultado da força de arrasto no pilar - Simulação 1.....	58
Figura 5.13 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 2.....	59
Figura 5.14 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 2.....	59
Figura 5.15 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 2.....	60
Figura 5.16 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação 2.....	60
Figura 5.17 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 2.....	61
Figura 5.18 - Pressão total - Vista planta - simulação 2.....	61
Figura 5.19 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 2.....	62
Figura 5.20 - Pressão Estática - eixo de simetria - simulação 2.....	62
Figura 5.21 - Pressão total no pilar - simulação 2.....	63
Figura 5.22 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 2.....	63
Figura 5.23 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 3.....	64
Figura 5.24 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 3.....	64
Figura 5.25 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 3.....	65
Figura 5.26 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação 3.....	65
Figura 5.27 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 3.....	66
Figura 5.28 - Pressão total - Vista planta - simulação 3.....	66
Figura 5.29 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 3.....	67
Figura 5.30 - Pressão Estática - eixo de simetria - simulação 3.....	67
Figura 5.31 - Pressão total no pilar - simulação 3.....	68
Figura 5.32 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 3.....	68
Figura 5.33 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 4.....	69
Figura 5.34 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 4.....	70

Figura 5.35 - Campo de velocidades - eixo de simetria - Simulação 4.....	70
Figura 5.36 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - Simulação 4.....	71
Figura 5.37 - Velocidade total - Vista isométrica - Simulação 4.....	71
Figura 5.38 - Pressão total - Vista planta - Simulação 4.....	72
Figura 5.39 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - Simulação 4.....	72
Figura 5.40 - Pressão estática - eixo de simetria - Simulação 4.....	73
Figura 5.41 - Resultado da força de arrasto no pilar - Simulação 4.....	73
Figura 5.42 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 5.....	74
Figura 5.43 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - Simulação 5.....	75
Figura 5.44 - Campo de velocidades - eixo de simetria - Simulação 5.....	75
Figura 5.45 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - Simulação 5.....	76
Figura 5.46 - Velocidade total - Vista isométrica - Simulação 5.....	76
Figura 5.47 - Pressão total - Vista planta - Simulação 5.....	77
Figura 5.48 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - Simulação 5.....	77
Figura 5.49 - Pressão estática - eixo de simetria - Simulação 5.....	78
Figura 5.50 - Pressão total no pilar - simulação 5.....	78
Figura 5.51 - Resultado da força de arrasto no pilar - Simulação 5.....	79
Figura 5.52 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 6.....	79
Figura 5.53 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - Simulação 6.....	80
Figura 5.54 - Campo de velocidades - eixo de simetria - Simulação 6.....	80
Figura 5.55 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - Simulação 6.....	81
Figura 5.56 - Velocidade total - Vista isométrica - Simulação 6.....	81
Figura 5.57 - Pressão total - Vista planta - Simulação 6.....	82
Figura 5.58 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - Simulação 6.....	82
Figura 5.59 - Pressão estática - eixo de simetria - Simulação 6.....	83

Figura 5.60 - Pressão total no pilar - Simulação 6.....	83
Figura 5.61 - Resultado da força de arrasto no pilar - Simulação 6.....	84
Figura 5.62 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 7.....	84
Figura 5.63 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - Simulação 7.....	85
Figura 5.64 - Campo de velocidades - eixo de simetria - Simulação 7.....	85
Figura 5.65 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - Simulação 7.....	86
Figura 5.66 - Velocidade total - Vista isométrica - Simulação 7.....	86
Figura 5.67 - Pressão total - Vista planta - Simulação 7.....	87
Figura 5.68 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - Simulação 7.....	87
Figura 5.69 - Pressão estática - eixo de simetria - Simulação 7.....	88
Figura 5.70 - Pressão total no pilar - Simulação 7.....	88
Figura 5.71 - Resultado da força de arrasto no pilar - Simulação 7.....	89
Figura 5.72 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 8.....	89
Figura 5.73 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - Simulação 8.....	90
Figura 5.74 - Campo de velocidades - eixo de simetria - Simulação 8.....	90
Figura 5.75 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - Simulação 8.....	91
Figura 5.76 - Velocidade total - Vista isométrica - Simulação 8.....	91
Figura 5.77 - Pressão total - Vista planta - Simulação 8.....	92
Figura 5.78 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - Simulação 8.....	92
Figura 5.79 - Pressão estática - eixo de simetria - Simulação 8.....	93
Figura 5.80 - Pressão total no pilar - Simulação 8.....	93
Figura 5.81 - Resultado da força de arrasto no pilar - Simulação 8.....	94
Figura 5.82 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 9.....	94
Figura 5.83 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - Simulação 9.....	95
Figura 5.84 - Campo de velocidades - eixo de simetria - Simulação 9.....	95

Figura 5.85 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - Simulação 9.....	96
Figura 5.86 - Velocidade total - Vista isométrica - Simulação 9.....	96
Figura 5.87 - Pressão total - Vista planta - Simulação 9.....	97
Figura 5.88 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - Simulação 9.....	97
Figura 5.89 - Pressão estática - eixo de simetria - Simulação 9.....	98
Figura 5.90 - Pressão total no pilar - Simulação 9.....	98
Figura 5.91 - Resultado da força de arrasto no pilar - Simulação 9.....	99
Figura 5.92 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 10.....	99
Figura 5.93 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - Simulação 10....	100
Figura 5.94 - Campo de velocidades - eixo de simetria - Simulação 10.....	100
Figura 5.95 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - Simulação 10.....	101
Figura 5.96 - Velocidade total - Vista isométrica - Simulação 10.....	101
Figura 5.97 - Pressão total - Vista planta - Simulação 10.....	102
Figura 5.98 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - Simulação 10.....	102
Figura 5.99 - Pressão estática - eixo de simetria - Simulação 10.....	103
Figura 5.100 - Pressão total no pilar - Simulação 10.....	103
Figura 5.101 - Resultado da força de arrasto no pilar - Simulação 10.....	104
Figura 5.102 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 11.....	104
Figura 5.103 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - Simulação 11...	105
Figura 5.104 - Campo de velocidades - eixo de simetria - Simulação 11.....	105
Figura 5.105 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - Simulação 11.....	106
Figura 5.106 - Velocidade total - Vista isométrica - Simulação 11.....	106
Figura 5.107 - Pressão total - Vista planta - Simulação 11.....	107
Figura 5.108 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - Simulação 11.....	107

Figura 5.109 - Pressão estática - eixo de simetria - Simulação 11.....	108
Figura 5.110 - Pressão total no pilar - Simulação 11.....	108
Figura 5.111 - Resultado da força de arrasto no pilar - Simulação 11.....	109
Figura 5.112 - Força de arrasto vs N° de elementos da malha.....	110
Figura 5.113 - Força de arrasto da simulação vs número da simulação.....	111
Figura 5.114 - Força de arrasto teórica vs força de arrasto da simulação.....	112
Figura 5.115 - Força de arrasto vs comprimento da secção do pilar.....	113
Figura 5.116 - Força de arrasto vs largura da secção do pilar.....	113
Figura 5.117 - Valor do coeficiente de arrasto vs número de Reynolds para diferentes tipos de obstáculo ao escoamento adaptado às simulações 1,2,3 e 4, extraído de White (2011).....	114

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Padrões de escoamentos com obstáculos cilíndricos - Carvalho (2003).	21
Tabela 2.2 - Relação entre L/D vs C_D , White (2011).....	22
Tabela 2.3 - Relação entre L/d vs C_D para corpos com a forma de elipse, White (2011).....	23
Tabela 5.1 - Geometria das secções transversais dos pilares das simulações.....	51
Tabela 5.2 - Volumes dos elementos da malha de cada simulação.....	52
Tabela 5.3 - Resultados finais da força de arrasto vs simulação.....	110

Simbologia

A	Área projectada na direcção perpendicular ao escoamento
\vec{a}	Vector aceleração
C_D	Coefficiente de arrasto
C_L	Coefficiente de sustentação
C_p	Coefficiente de pressão
C_μ	Constante empírica do modelo de turbulência
F_D	Força de arrasto
F_L	Força de sustentação
f	Função genérica
D	Dimensão característica
L	Comprimento do obstáculo na direcção normal ao escoamento
I	Intensidade da turbulência
i, j, k	Coordenadas vectoriais
k	Energia cinética turbulenta
l	Comprimento característico da turbulência
u_i, u_j, u_k	Componentes vectoriais da velocidade
n	Frequência de emissão de vórtices
p	Pressão num ponto qualquer do domínio do fluido
p_∞	Pressão de referência
Re	Número de Reynolds
St	Número de Strouhal
t	Tempo
U	Velocidade média do escoamento de aproximação
u	Velocidade média do escoamento num ponto
u'	Componente flutuante da velocidade segundo i

$x_{célula}$	Distância que um elemento do fluido percorre através de um volume de controlo
x_i	Posição da partícula na direcção i
Δ_p	Variação de pressão
Δ_t	Intervalo de tempo da fracção de volume calculada
δ_{ij}	Delta de <i>Kronecker</i>
ε	Taxa de dissipação turbulenta
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
μ_t	Viscosidade dinâmica turbulenta
ν_t	Viscosidade cinemática turbulenta
ρ	Massa volúmica do fluido
$(-\rho \overline{u'_i u'_j})$	Tensões de Reynolds
S_{ij}	Tensor das deformações
ω	Taxa de dissipação específica

Abreviaturas

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CFL	<i>Número de Courant</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
PISO	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
PVC	Cloreto de Polivinila
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RSM	<i>Reynolds Stress Models</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
SIMPLEC	<i>SIMPLE-Consistent</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
VOF	<i>Volum of Fluid</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação e enquadramento

Na Engenharia Civil, todas as estruturas têm as suas particularidades e relevância. No entanto, as pontes, pela sua finalidade e importância assumem um papel preponderante de estudo neste ramo da engenharia.

Normalmente, as pontes são utilizadas para a transposição de linhas água, vales, ou outros obstáculos naturais ou artificiais. A sua construção tem a finalidade de facilitar o transporte pedonal, ferroviário ou rodoviário e a sua importância em termos económicos é inquestionável.

Devido à evolução da construção e o conseqüente crescimento do número de pontes com pilares fundados em leitos de rio, tornou-se essencial o desenvolvimento do estudo dos fenómenos que surgem devido à interacção entre o escoamento e o obstáculo. A modificação do campo de velocidades do escoamento, do campo de pressões e o incremento de forças de arrasto e sustentação no pilar, são algumas das componentes que mais interessam para o estudo do comportamento do pilar. Deste modo, com o aumento do número de construções de pontes, aumentou também os estudos das interacções entre escoamento e obstáculos.

Ao longo dos últimos anos, os estudos de escoamentos sob pilares fundados em leitos de rios, baseavam-se nos conhecimentos expostos em literatura, e na sua representação em menor escala, controlada laboratorialmente, o que provocava um aumento do tempo e recursos gastos nas investigações.

Actualmente, e graças ao contínuo desenvolvimento da área da investigação científica e tecnológica auxiliada pelos modelos computacionais e o seu desenvolvimento exponencial, as investigações nesta área sofreram um significativo avanço e mudança de metodologias.

Neste trabalho, a evolução tecnológica e as novas ferramentas disponíveis para analisar escoamentos sob obstáculos são a base da investigação desenvolvida. Particularmente, para a simulação de escoamentos a escala reduzida, optou-se pela utilização do *Fluent*, um programa inserido na definição de CFD (Computational Fluid Dynamics), cuja utilização é transversal às mais variadas áreas da Engenharia. As forças exercidas por fluidos em movimento são importantes em vários campos da engenharia. A título de exemplo, e para o caso do fluido ser água, podem citar-se as que actuam nos cascos dos navios, nas pás das turbinas e como não poderia deixar de se referir nos pilares e encontros de pontes.

Segundo Bakker (2004), o uso do CFD para a análise dos mais diversos problemas tem inúmeras vantagens, tais como:

- Custo relativamente baixo quando comparado com possíveis custos de experiências laboratoriais, e ainda com a possibilidade desses mesmos custos diminuírem com o aumento da capacidade dos computadores;
- Velocidade na obtenção e análise de resultados; certos tipos de simulações podem ser feitos rapidamente, quando comparadas com experiências laboratoriais;
- Capacidade de simulação de condições reais, ou seja, qualquer condição física pode ser simulada teoricamente;
- Capacidade de simular condições ideais, pois permite um grande controlo sobre o processo físico, e fornece a capacidade de isolar fenómenos específicos para o estudo;
- Fornece informações bastante abrangentes, ou seja, permite examinar um grande número de regiões de interesse e produz um conjunto completo de parâmetros de escoamento para análise;
- Problemas de grandes dimensões, cuja análise seja feita em larga escala, podem ser auxiliados pelo uso desta ferramenta.

Porém, e segundo Oliveira (2001), o uso desta ferramenta também pode ter desvantagens, tais como:

- Limitação pela validade do modelo matemático/físico que se vai resolver;
- Nos problemas que não dispõem de modelos matemático adequados e precisos, são necessários dados experimentais que sirvam para validação; é necessário ainda proceder ao desenvolvimento dos próprios modelos matemáticos de forma a representarem melhor todos os processos reais;
- Nos problemas que dispõem de modelos matemáticos adequados e precisos pode ser ocasionalmente mais caro efectuar um cálculo numérico do que levar a cabo uma experiência.

No entanto para que uma simulação numérica de um escoamento de fluidos seja feita de um modo correcto e seguro, é necessário existir um total conhecimento de todos os fenómenos físicos do problema que está em análise. Estes fenómenos físicos têm como principais componentes as condições de fronteira do problema e os seus esquemas numéricos a analisar. Segundo Ramos (2012), para que o problema seja analisado com sucesso no seu todo, não basta conhecer os fenómenos físicos deste através de trabalhos experimentais ou de investigação teórica, é também necessário que se conheça e compreenda como funciona o CFD no seu conjunto, principalmente, os seus métodos de resolução. Assim sendo, todas as simulações no CFD, devem obedecer a determinados requisitos, tais como:

- **Consistência:** A solução é mais precisa, quanto menor for a dimensão dos elementos da malha. A diferença entre a equação discretizada e o valor real é denominado erro de truncatura;
- **Estabilidade:** Todos os métodos utilizados para alcançar uma solução, não devem aumentar os erros gerados no processo de cálculo;
- **Convergência:** A solução deve convergir para um determinado valor durante e após a obtenção da solução;
- **Precisão:** Os erros que possam existir aquando da modelação, geração da malha, convergência e outras fases do programa, faz com que as soluções numéricas do escoamento obtidas sejam soluções aproximadas;
- **Conservação:** Todo o processo de cálculo deve cumprir as leis de conservação.

Face ao exposto, o objectivo principal deste trabalho é a modelação numérica de um escoamento sob o pilar de uma ponte fundado num leito de rio, para que seja possível compreender melhor todos os efeitos que esse obstáculos provoca no escoamento, bem como, aferir quais os melhores tipos de secção de pilares que se adaptam aos escoamento, de modo a tentar eliminar ou reduzir as varáveis que são desfavoráveis à conservação integral da peça. Com a modelação numérica, passa também a ser possível em alguns casos dispensar os ensaios laboratoriais e deste modo reduzir o tempo e custo da análise de problemas deste tipo.

1.2 Organização da dissertação

A organização desta dissertação é constituída por 6 capítulos, sendo que o primeiro capítulo, onde este subcapítulo está inserido, é a introdução.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica que contempla a análise dos tipos de escoamentos e obstáculos, e a interacção entre ambos.

No terceiro capítulo expõe-se a modelação numérica de escoamentos, onde se apresenta as equações governativas dos mesmos, malhas utilizadas, modelos de turbulência, geometria da peça, entre outras componentes da modelação.

No quarto capítulo é apresentado o procedimento numérico exemplificativo para uma simulação de escoamento, onde todas as componentes inerentes à mesma são expostas.

No quinto capítulo apresenta-se e discutem-se os resultados obtidos nas simulações realizadas, comparando-os com os compilados no capítulo 2.

O sexto e último capítulo consiste na conclusão e considerações finais deste trabalho, onde se apresenta as conclusões retiradas da dissertação, bem como os possíveis desenvolvimentos que poderão ser trabalhados no futuro.

2. CARACTERIZAÇÃO DOS ESCOAMENTOS E OBSTÁCULOS

2.1 Introdução

Este capítulo visa caracterizar a interação entre o escoamento e os obstáculos inseridos no seio do escoamento e está organizado em três subcapítulos.

No primeiro subcapítulo, caracterizam-se os regimes de escoamento de fluidos; no segundo subcapítulo caracterizam-se os obstáculos inseridos no seio do escoamento; por fim, mas não menos importante, será feita uma análise à interação entre eles, onde serão analisados diversos fenómenos que resultam desta interação, como por exemplo a criação e o tipo de vórtices, bem como os coeficientes de arrastamento, sustentação ou pressão.

2.2 Regimes de escoamento

Encontram-se descritos na literatura da especialidade diferentes padrões de escoamento em torno de obstáculos. Esta variação de padrões e a respectiva limitação entre regimes é caracterizada pelo número de Reynolds, Re , parâmetro adimensional que traduz o efeito da viscosidade e que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas do escoamento, permitindo a distinção dos diferentes tipos de escoamento existentes e que pode ser definido pela seguinte expressão:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} = \frac{F_{inércia}}{F_{viscosa}} \quad (2.1)$$

Onde ρ representa a massa volúmica do fluido, U representa a velocidade média do escoamento de aproximação, D representa a dimensão característica e μ representa a viscosidade dinâmica do fluido.

Os escoamentos podem ser divididos em três regimes gerais:

- Laminar;
- Regime de transição;
- Regime turbulento.

2.3 Classificação dos obstáculos

A existência de obstáculos no seio do escoamento é de facto o que preocupa e motiva todos os investigadores desta área a desenvolver os mais variados estudos.

São inúmeros os exemplos de obstáculos inseridos no seio do escoamento, tais como pilares de pontes, ou pequenas ilhas e embarcações ancoradas. Estes obstáculos podem ter as mais variadas formas, e conseqüentemente, os tipos de arestas que possuem, influenciam o que se passa nesse escoamento aquando da interacção com o obstáculo. As arestas mais acentuadas, como por exemplo, os pilares de uma ponte com secção quadrangular ou rectangular, ou os obstáculos com superfícies contínuas, como no caso de pilares com a secção circular ou elíptica, ambos provocam diferentes interacções com o escoamento. De um modo geral, o ponto de separação do escoamento, depende de diversos factores, tais como o número de Reynolds e a forma geométrica do corpo.

Segundo Carvalho (2003), na dinâmica dos fluidos, os corpos podem ser classificados, quanto à sua forma geométrica, como fuselados e não-fuselados. Os corpos não-fuselados produzem um alto coeficiente de arrasto, que se deve, sobretudo, ao descolamento prematuro da camada limite, acarretando a formação de uma esteira grande espessura. As formas fuseladas, ao contrário, retardam o descolamento da camada limite, minimizando o coeficiente de arrasto e, muitas vezes, produzindo um alto valor do coeficiente de sustentação, como ocorre sobre as asas de uma aeronave.

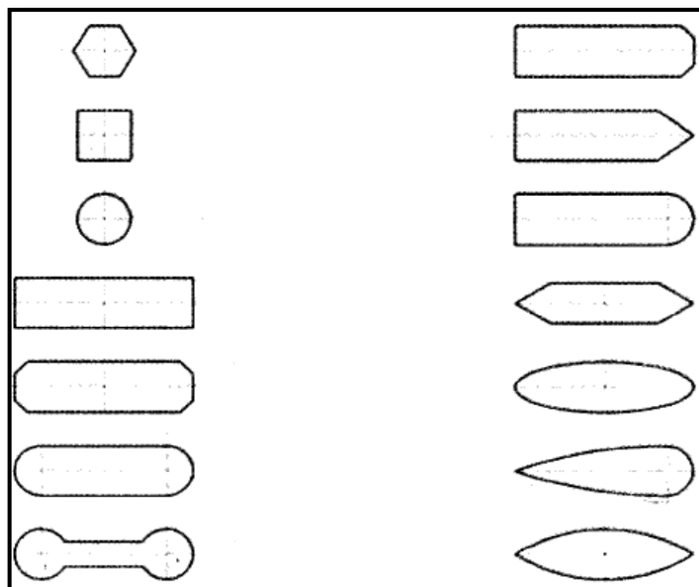


Figura 2.1 - Formas de secções fuseladas e não fuseladas de pilares

2.4 Interação escoamentos vs obstáculos

2.4.1 Introdução

Após uma análise aos escoamentos e aos obstáculos que muitas vezes surgem no seio do escoamento, surge neste ponto a importância de abordar a interação entre eles, e todos os fenómenos que esta interação origina. Como principais factores dependentes desta interação, destaca-se a formação de vórtices, e a consequente geração de forças que interferem com a estabilidade dos obstáculos inseridos nos escoamentos.

Como exemplo de um caso típico de um escoamento em torno de um obstáculo com a respectiva criação de uma esteira turbilhonar e com criação de vórtices, apresenta-se na figura 2.2. Trata-se de um exemplo largamente documentado na bibliografia, como a famosa esteira de Von Kármán, uma esteira formada a jusante das ilhas Canárias, que pode ser visível através do espaço, com o auxílio das nuvens que actuam como um excelente meio de visualização neste caso.

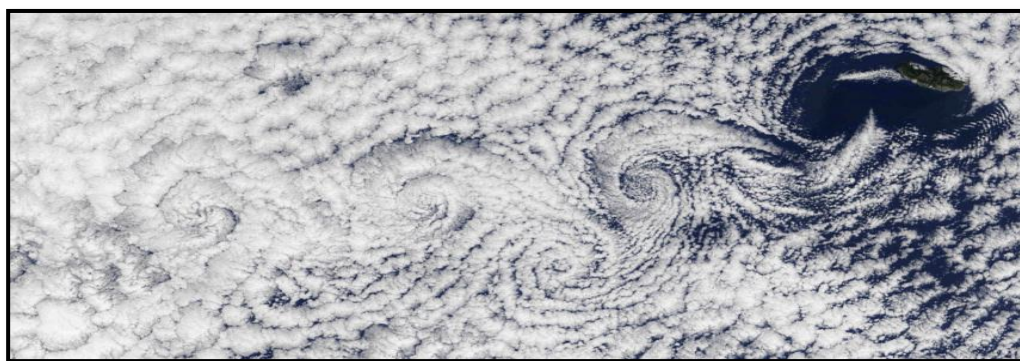


Figura 2.2 - Esteira de Von Kármán - Ilhas Canárias extraído de <http://wakes.uma.pt/pt/research.php> em 10 de Setembro de 2012

Tal como já foi referido anteriormente, a interação entre o escoamento e os obstáculos originam o aparecimento de vórtices. A formação destes fenómenos provoca grande preocupação na Engenharia Civil, com principal enfoque na análise de pilar fundados em leitos de rios, o que origina diversos estudos relacionados com estes fenómenos. Em seguida, são apresentados para os diferentes tipos de regime de escoamento, já referidos anteriormente, diversos comportamentos resultantes da interação entre o escoamento e o obstáculo.

2.4.2 Regime de escoamento laminar

O regime de escoamento laminar pode ser dividido em três tipos:

- Escoamento muito lento ou regime de não separação ($0 < Re < 4-5$);
- Estado de separação ($4-5 < Re < 32-48$);
- Regime laminar periódico ($32-48 < Re < 180-200$).

No escoamento muito lento ou regime de não separação, tal como se pode observar na figura 2.3, o fluido mantém-se junto à superfície do cilindro, ao longo de todo o seu perímetro. Neste caso, o escoamento é permanente e as linhas de corrente são perfeitamente simétricas, tanto em relação ao eixo transversal, como em relação ao eixo longitudinal do cilindro.

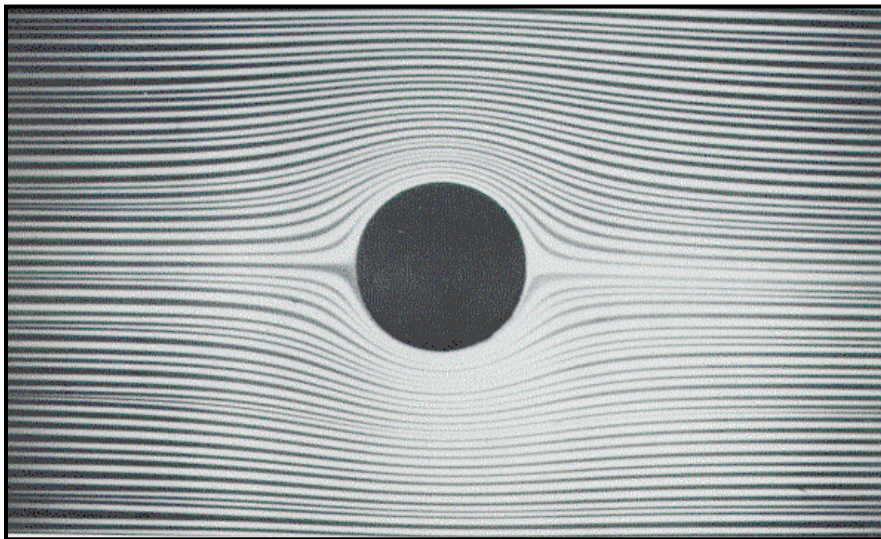


Figura 2.3 - Escoamento muito lento, $Re=1$, extraído de Carvalho (2003)

No escoamento de estado de separação, tal como se pode observar na figura 2.4, o escoamento já se afasta da superfície do cilindro e perde a sua simetria em relação ao eixo transversal, contudo, mantendo a sua simetria relativamente ao eixo longitudinal. Neste tipo de regime de escoamento, as camadas de corte livres que se desenvolvem nos lados de um qualquer tipo de corpo sólido, reencontram-se a jusante das zonas de recirculação, no ponto denominado, ponto de estagnação.

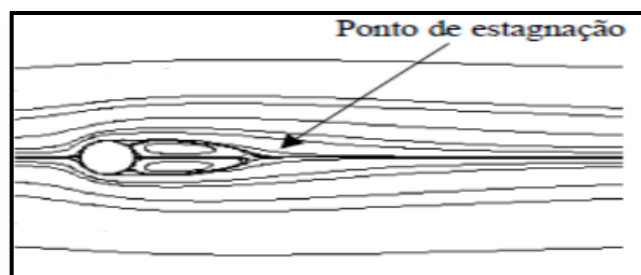


Figura 2.4 - Escoamento laminar, estado de separação, $Re=40$, extraído de Carvalho (2003)

No regime de escoamento laminar periódico, tal como se pode observar na figura 2.5, a região mais próxima da esteira torna-se instável para um número de Reynolds superior ao intervalo de 32-48 e uma oscilação senoidal na camada de corte que se inicia no ponto de estagnação. A oscilação espontânea é sensível às perturbações e depende das características particulares de cada ensaio experimental. Quando o número de Reynolds ultrapassa o intervalo de 45-65, a amplitude da oscilação aumenta e a camada de corte começa nesse instante a enrolar-se em torno de si mesma, como se pode verificar na figura 2.6. Já quando o número de Reynolds se aproxima do patamar de 180-200, a esteira passa a poder ser identificada pela emissão alternada de vórtices, como pode ser observado na figura 2.7.



Figura 2.5 - Regime laminar periódico, $Re=45$, extraído de Carvalho (2003)



Figura 2.6 - Regime laminar periódico, $Re=65$, extraído de Carvalho (2003)



Figura 2.7 - Regime laminar periódico, $Re=202$, extraído de Carvalho (2003)

2.4.3 Regime de escoamento de transição

No que diz respeito ao regime de transição, este é caracterizado por ser um fenómeno que é bastante sensível a perturbações de diversos tipos, que se podem sentir em diferentes zonas do escoamento e de diferentes formas, em torno de um cilindro, cujo início pode ser antecipado através de pequenas perturbações externas que destabilizam o escoamento. São três os tipos de transição que podem ocorrer no escoamento em torno de um cilindro:

- Transição na esteira;
- Transição na camada de corte;
- Transição na camada limite.

Segundo Carvalho (2003), no regime de transição na esteira, a transição do escoamento laminar periódico para o turbulento manifesta-se pela desorganização da esteira em regiões afastadas do obstáculo, como se pode verificar na figura 2.8. Com um aumento do número de Reynolds, as instabilidades que dão origem a um processo deste tipo, aproximam-se do obstáculo, o que faz com que os vórtices que se soltam próximos à sua base oscilem, como mostra a figura 2.9. Esta transição na esteira, normalmente verifica-se para números de Reynolds entre 180 e 400.



Figura 2.8 - Regime de transição para $180 < Re < 250$, extraído de Carvalho (2003)



Figura 2.9 - Regime de transição para $250 < Re < 400$, extraído de Carvalho (2003)

No caso da transição na camada de corte, o mesmo autor refere que esta acontece, tal como a definição indica, na camada de corte, ficando a camada limite totalmente laminar. Segundo Quintela (2007), Prandtl introduziu em 1904 o conceito de camada limite, definindo-a como a

zona adjacente à parede onde os efeitos viscosos são importantes, considerando também que nas zonas exteriores próximas da camada limite, os gradientes da velocidade são em geral pequenos, o que permite que o escoamento possa ser estudado como um líquido perfeito nessa zona. Azevedo (2011) afirma que um escoamento sobre um objecto provoca tensões de corte na camada do fluido adjacente ao objecto, e que sobre a superfície, a tensão de corte é máxima e a velocidade tangencial do fluido é nula na camada fluido adjacente ao objecto. O mesmo autor afirma também que ao longo da direcção normal à superfície, a tensão de corte diminui e a velocidade tende para a velocidade do fluido antes de ser perturbado pela presença do obstáculo, estabelecendo-se deste modo um perfil de velocidades na camada adjacente ao objecto. A este perfil, o autor dá o nome de camada limite. Neste tipo de regime de escoamento, também pode existir uma subdivisão em três fases de transição:

- Transição de ondas $(350-400) < Re < (1.10^3-2.10^3)$;
- Transição dos vórtices $(1.10^3-2.10^3) < Re < (20.10^3-40.10^3)$;
- Degeração em turbulência $(20.10^3-40.10^3) < Re < (100.10^3-200.10^3)$.

A transição de ondas manifesta-se na forma de ondulações na camada de corte, tal como apresentado na figura 2.10, e com o aumento do número de Reynolds, as ondas que delimitam a camada corte passam a ser vórtices discretos, como se pode verificar na figura 2.11. Porém, caso o número de Reynolds ainda seja maior, este leva o escoamento ao início do regime turbulento, que passa a ser caracterizado pela presença de diferenciadas escalas de tempo e comprimento, como pode ser observado na figura 2.12.



Figura 2.10 - Transição na camada de corte para $Re=2.10^3$, extraído de Carvalho (2003)

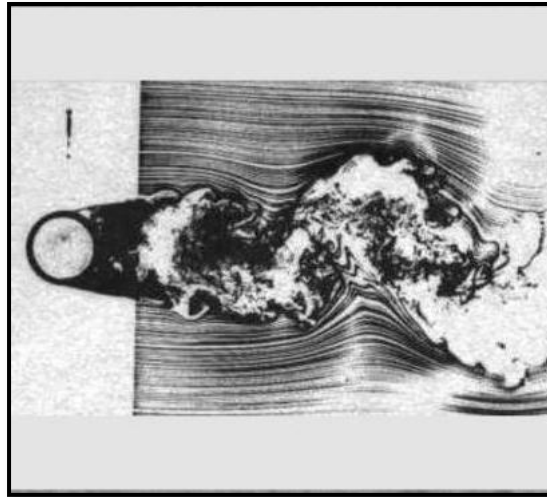


Figura 2.11 - Transição na camada de corte para $Re=8.10^3$, extraído de Carvalho (2003)



Figura 2.12 - Transição na camada de corte para $Re=110.10^3$, extraído de Carvalho (2003)

Por último, relativamente ao regime de transição do escoamento na camada limite, segundo Carvalho (2003) também pode ser subdividida nas seguintes fases:

- Regime pré-critico $(100.10^3-200.10^3) < Re < (300.10^3-340.10^3)$

Esta região é caracterizada pelo início da transição na camada de corte ao longo da linha de separação e termina com um determinado valor no número de Reynolds, com uma queda da descontinuidade do coeficiente de arrasto e um acréscimo na frequência de emissão de vórtices. Nesta região é ainda notada uma certa assimetria na distribuição da pressão num dos lados da camada de corte, devido a uma elevada transição o que permite um recolamento sobre a superfície do cilindro.

- Regime de uma bolha $(300.10^3 -340.10^3) < Re < (380.10^3-400.10^3)$

Este regime de separação caracteriza-se por uma bolha assimétrica e termina com um valor alto do número de Reynolds, com uma força de arrasto baixa, e um aumento na frequência de desprendimento de vórtices que ocorre no lado oposto do cilindro, quando a segunda bolha é formada.

- Regime de duas bolhas $(380 \cdot 10^3 - 400 \cdot 10^3) < Re < (0,5 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^6)$

Neste regime de duas bolhas existe uma combinação complicada da separação laminar, transição, recolamento, e separação turbulenta da camada limite nos dois lados do cilindro em causa. Tanto no regime de duas bolhas, como no regime de uma bolha, há uma grande sensibilidade a perturbações e podem ser eliminados pela presença de uma superfície suficientemente rugosa ou uma corrente livre turbulenta.

Com o aumento do número de Reynolds, surge a transição, em primeiro lugar, para uma das linhas de separação e depois para outra linha de separação de um modo irregular. Isso origina o rompimento e fragmentação da bolha de separação ao longo do cilindro. A fragmentação regular das linhas de separação prevê o desprendimento periódico dos vórtices e logo depois o regime é elevado ao regime seguinte, o regime supercrítico.

- Regime supercrítico $(0,5 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^6) < Re < (3,4 \cdot 10^6 - 6 \cdot 10^6)$
- Regime pós-critico $(3,5 \cdot 10^6 - 6 \cdot 10^6) < Re < \text{valor não conhecido}$.

Neste regime, o regime pós-critico, acontece a transição da camada limite, podendo ocorrer em qualquer região situada entre o ponto de estagnação e o ponto de separação. Se o número de Reynolds aumenta, a região de transição avança para o ponto de estagnação.

2.4.4 Regime de escoamento turbulento

Neste regime de escoamento, é onde a maioria dos estudos se centram, pois é neles que surgem diversos fenómenos importantes para a análise de um escoamento. Assim sendo, pode-se afirmar que nestes escoamentos as suas partículas apresentarem um movimento caótico na sua observação macroscópica. Para além disso, é também caracterizado pela sua difusividade, irregularidade, elevados números de Reynolds, dissipação da energia e vorticidade.

Na figura 2.13, apresenta-se os diferentes escoamentos com obstáculos de secção circular, e a respectiva formação de vórtices para valores distintos do número de Reynolds de acordo com Lindquist (200).

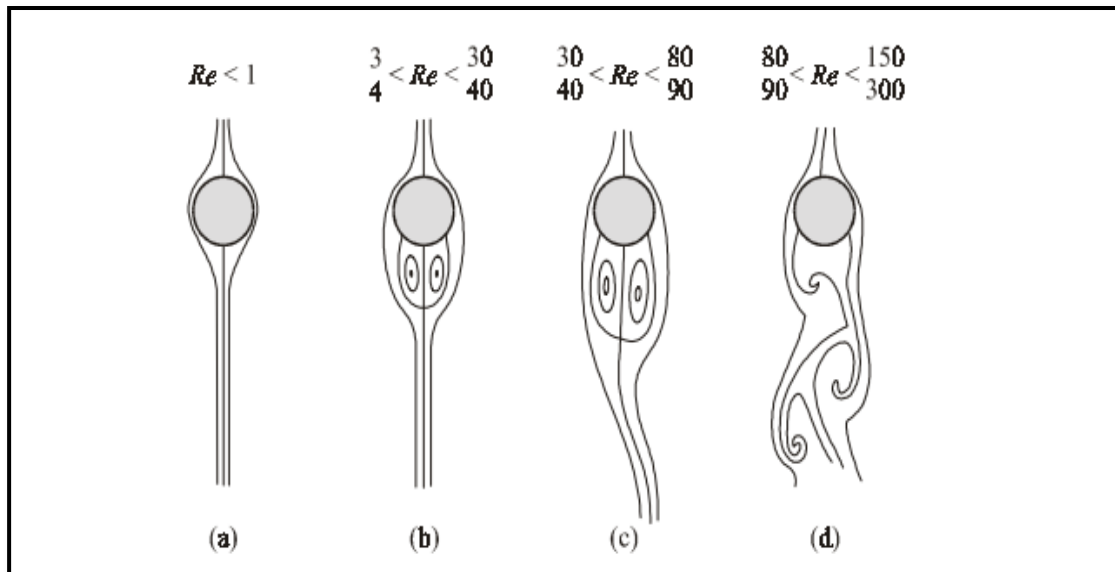


Figura 2.13- Regimes de escoamento em torno de um cilindro, extraído de Lindquist (2000)

Segundo Lindquist (2000), a figura 2.13 permite verificar que:

- Para números de Reynolds inferiores à unidade, o escoamento contorna com perfeição o corpo sólido, sem deslocamento apreciável da camada limite, e que produz uma esteira caracterizada pela simetria e independência do tempo;
- Para valores do número de Reynolds compreendidos entre 4 e 40, o escoamento separa-se do cilindro num ponto a jusante do obstáculo, formando um par de vórtices simétricos, que permanecem num estado estacionário e com um movimento rotativo atrás do corpo sólido;
- Com um aumento do número de Reynolds para valores compreendidos entre 40 e 90, a região onde circulam os vórtices tem tendência a crescer e a tornar-se instável e assimétrica, produzindo oscilações periódicas na esteira do cilindro;
- Todas as instabilidades existentes num escoamento em torno de um obstáculo são amplificadas com o aumento do número de Reynolds, resultando na formação da famosa esteira de Von Kármán, que é caracterizada pela emissão de vórtices de um modo alternado, e que se desprendem de ambos os lados do obstáculo ao escoamento.

Se fosse feita uma análise para números de Reynolds ainda maiores, surgiriam com certeza outras instabilidades, onde os efeitos de turbulência e de tridimensionalização da esteira seriam muito mais pronunciados; apesar destes resultados mostrarem o escoamento em torno de cilindros de base circular, este tipo de padrões são também observados ao redor de outros tipos de corpos de um modo muito semelhante.

Segundo o mesmo autor, como a zona mais interna das camadas de corte, que está em contacto com a esteira, move-se mais lentamente do que a sua parte externa, em contacto com a corrente livre, estas camadas tem a tendência a enrolarem-se sobre si próprias, o que leva à formação de vórtices discretos, cujo comportamento dinâmico dá origem a diferentes padrões de escoamento, tal como apresentado na figura anterior.

De acordo com Carvalho (2003), é mais usual ocorrerem escoamentos cujos valores de Reynolds encontram-se dentro do intervalo das figuras 2.13 c) e d), e é nestes tipos de escoamentos que as forças de pressão e de viscosidade assumem particular importância de análise.

Segundo Ferreira (2003), o escoamento em torno de um obstáculo pode ser analisado com particular incidência em duas regiões distintas:

- A região principal, externa, onde se analisa o escoamento de aproximação;
- A região secundária, interna, onde as características viscosas do escoamento assumem particular importância, onde surgem duas estruturas hidrodinâmicas importantes, o vórtice ferradura e a esteira de vórtices, tal como pode ser observado na figura 2.14.

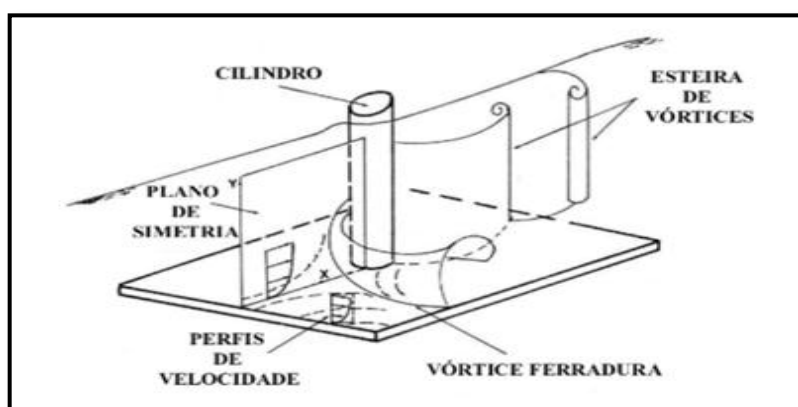


Figura 2.14 - Regiões de escoamento próximas ao cilindro, extraído de Ferreira (2003)

De acordo com o mesmo autor, em relação ao vórtice ferradura, este forma-se a partir da rotação horizontal do escoamento de aproximação, região principal, na linha de estagnação deste mesmo escoamento. A fenómeno de criação deste tipo de vórtice pode ser observado na figura 2.15.

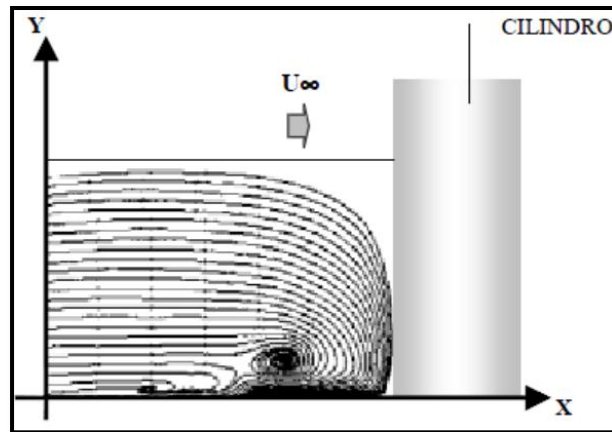


Figura 2.15 - Formação do vórtice ferradura num regime de escoamento no plano de simetria, extraído de Ferreira (2003)

Ferreira (2003) refere que o diâmetro do vórtice não depende do número de Reynolds, mas sim do diâmetro do pilar em estudo. As suas pesquisas e investigações experimentais mostram que na região do leito do canal, próximo do vórtice ferradura, surge uma concentração de vorticidade de sinal contrário ao vórtice inicial, ou seja, surge um vórtice secundário. O autor refere ainda que podem existir casos em que depois da formação do vórtice secundário, se crie um novo vórtice, um terceiro vórtice que terá o mesmo sinal que o primeiro. A formação do vórtice pode ser observado na figura 2.16.

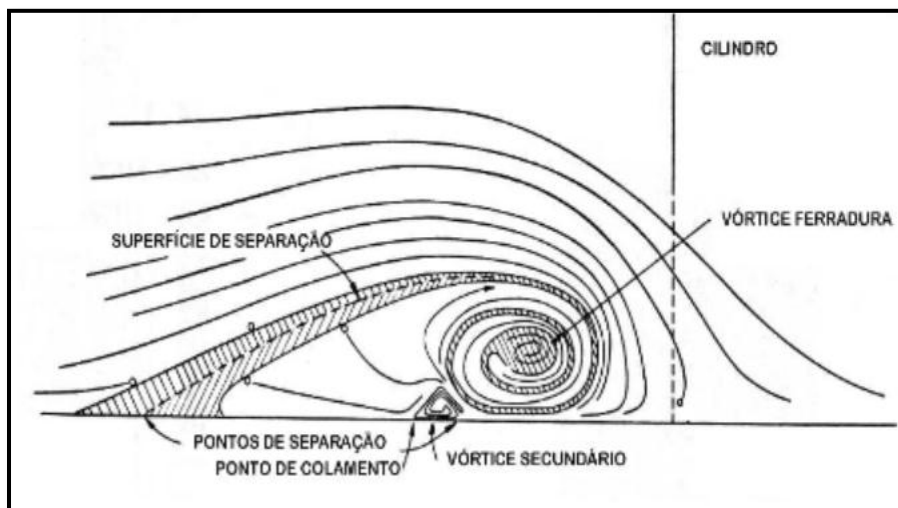


Figura 2.16 - Vórtice secundário, extraído de Ferreira (2003)

Zdravkovich (1997), citado em Carvalho (2003), apresenta uma análise global ao campo de escoamento em torno de um cilindro. Essa análise é apresentada na figura 2.16, onde se verifica que a velocidade média local do fluido pode ser maior, igual, ou menor à velocidade do escoamento não perturbado, dividindo o escoamento em quatro regiões diferentes:

- Uma estreita região de fluxo retardado;
- Duas camadas limite na superfície do cilindro;
- Duas zonas de descolamento e aceleração do escoamento;
- Uma larga região de separação do escoamento, chamada esteira.

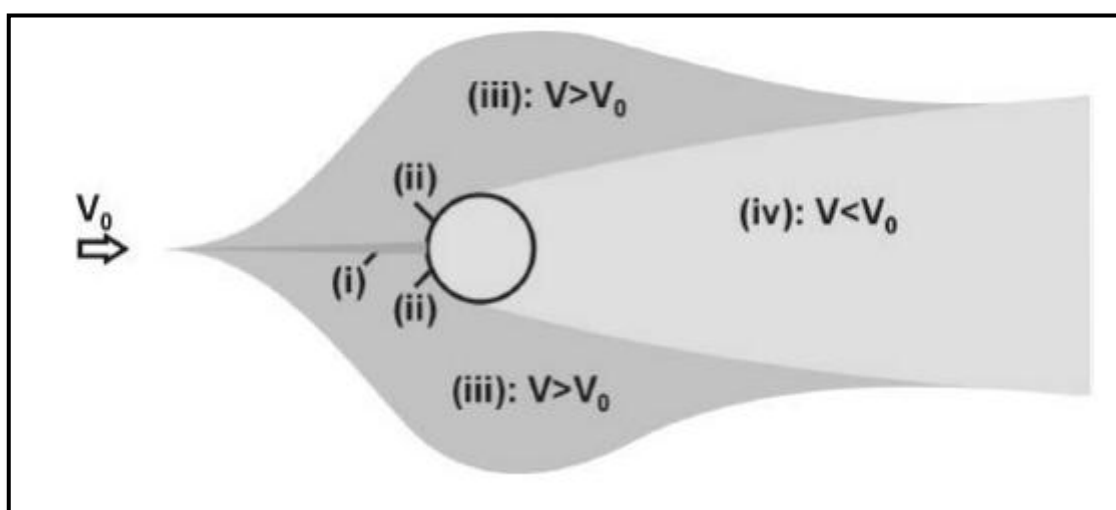


Figura 2.17 - Análise campo de escoamento, extraído de Carvalho (2003)

O mesmo autor analisa o campo de escoamento do seguinte modo:

- A região do escoamento retardado (i), localizada a montante do cilindro, não tem sido alvo de muitas pesquisas, pese embora as inesperadas flutuações de velocidade que nessa zona ocorrem;
- As camadas limite do cilindro (ii), estão sujeitas a um gradiente de pressão favorável, seguido por uma pequena região onde o gradiente de pressão é adverso, antes da separação. A separação da camada limite continua a desenvolver-se a jusante, com camadas de corte livres, inicialmente perto da esteira;
- A região do escoamento de deslocamento e aceleração (iii) é ainda menos explorada que as anteriores. A extensão dessa região pode ser afectada com grande relevância através da limitação da parede como efeito de bloqueio e o escoamento perturbado é vigorosamente influenciado pela baixa pressão na esteira;

- Na maioria dos estudos que envolvem o escoamento ao redor de cilindros, a atenção é dada em especial à região da esteira (iv), onde os fenómenos mais interessantes podem ser observados. De um modo geral, as duas camadas de corte, que se formam de ambos os lados do corpo, prolongam-se na direcção do escoamento em causa, e confinam na região da esteira. Uma vez que a zona mais interna das camadas de corte em contacto com a esteira, move-se mais lentamente do que a sua parte externa, em contacto com a corrente livre, estas camadas têm tendência a enrolarem-se em torno de si mesmas, formando vórtices discretos, cujo comportamento dinâmico dá origem a variados padrões de escoamento.

Ainda relacionado com o mecanismo de formação de vórtices, Gerrard (1966), citado em Carvalho (2003), investigou todos os mecanismos físicos que estão envolvidos no fenómeno da formação de vórtices num escoamento em torno de um cilindro, e concluiu que a interacção entre as camadas de corte, formadas devido à separação da camada limite constituem um elemento fulcral no processo de formação dos vórtices da esteira. De modo a complementar o raciocínio expresso anterior, na figura 2.18 apresenta-se um esboço as linhas de emissão instantâneas em torno de um cilindro. Segundo o mesmo autor, um vórtice ganha maior dimensão com a circulação da camada de corte a que se encontra ligado, e atrai a partir de um determinado instante, partículas do fluido, correspondentes à camada corte do lado oposto. Quando as partículas seguem um caminho na direcção do vórtice maior, estas podem obter três direcções distintas:

- A união ao vórtice em formação, no lado oposto da esteira;
- O seguimento da direcção da camada de corte oposta, que tem uma vorticidade de sinal inverso;
- Seguir em direcção ao cilindro, na região da esteira próxima.

A parcela do escoamento que segue o caminho a), mistura-se com o fluido que está a formar um vórtice na região superior da esteira. Dado que essa parte tem um vorticidade inversa ao sentido do vórtice que o fluido está a construir, esta faz com que a circulação total deste último vórtice diminua. Relativamente à parcela do escoamento b), esta tem uma importância elevada no que toca à estabilidade do escoamento. Devido ao facto de existir uma diminuição da pressão, a camada de corte que está num processo de separação do corpo, torna-se mais intensa, e conseqüentemente o próprio vórtice ganha uma maior intensidade. Devido a tal facto, uma grande parte da camada de corte oposta, irá atravessar a linha central da esteira e uma relativa parte do fluido com vorticidade de sinal contrário chocará com esta camada, provocando uma redução da intensidade do vórtice que está em crescimento. Este facto faz com que haja uma interrupção na alimentação da circulação para o vórtice e após esta interrupção, o vórtice passa a ter a sua circulação final e desprende-se

da camada de corte que lhe deu origem. Por fim, a parcela do fluido cujo caminho segue a seta (c), tem uma colaboração preponderante para a formação de um novo vórtice, desta vez, na parte inferior da esteira, terminando com o ciclo de criação e desprendimento de novos vértices. O campo de vorticidade da esteira, a pressão na região posterior do corpo e a frequência de geração de vórtices e desprendimento de vórtices coerentes, é controlado pelo balanço da massa das partículas que segue cada um dos caminhos descritos anteriormente.

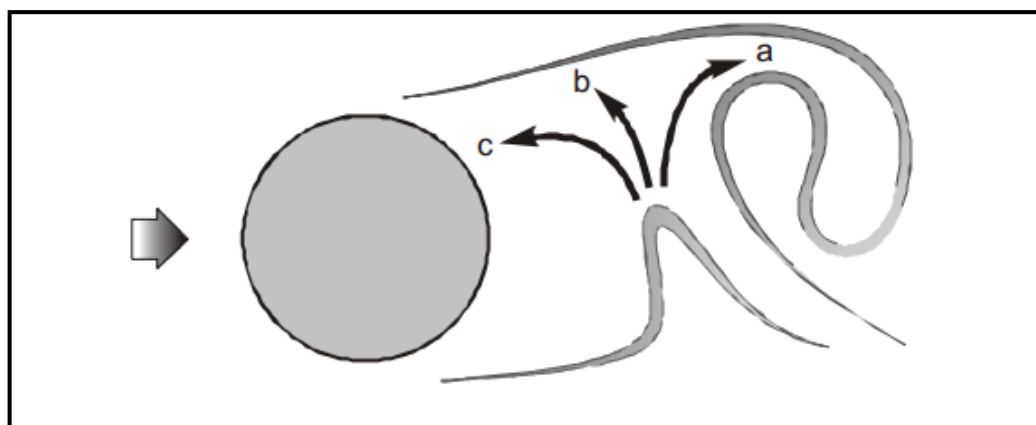


Figura 2.18 - Linhas de emissão instantâneas em torno de um cilindro, extraído de Carvalho (2003)

Como o fenômeno de geração e desprendimento de vórtices envolve uma mistura de regiões de fluido com vorticidade de sinais contrários, tem particular importância verificar que a circulação total que resultou da separação num dos lados do corpo durante o ciclo de geração, é maior que a intensidade do vórtice individual.

Por fim, Carvalho (2003) afirma que a relação da frequência de emissão de vórtices, com a dimensão característica do corpo sólido e a velocidade do escoamento pode ser feita através do número de *Strouhal*, St_t , que é definido pela expressão:

$$St = \frac{n \cdot D}{U} \quad (2.2)$$

Onde n representa a frequência de emissão de vórtices e D representa a dimensão do obstáculo.

De acordo com Sumer e Fredsoe (1997), o número de Strouhal e o número de Reynolds relacionam-se da seguinte forma:

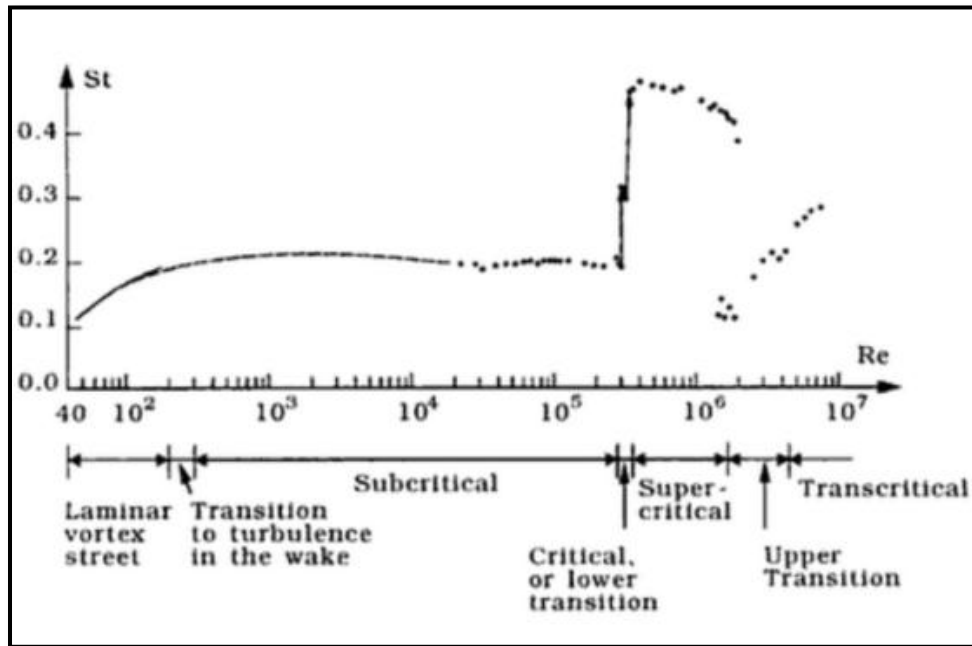


Figura 2.19 - Relação entre Re e St para uma pequena secção circular, Sumer e Fredsoe (1997)

Segundo Carvalho (2003), e através da análise da tabela 2.1, pode-se verificar que para baixo números de *Reynolds*, as linhas de corrente contornam de um modo suave o corpo sólido, sem deslocamento considerável da camada limite, tal como ocorre no escoamento invíscido. Nos regimes mais severos, estruturas turbilhonares de grande dimensão podem-se desprender periodicamente de ambos os lados do obstáculo, originando a esteira turbilhonar *Von Kármán* anteriormente referenciada. Nestas condições, as forças actuantes no cilindro passam a ter uma natureza cíclica. A formação e a extinção dos vórtices na esteira de cilindros dependem sempre do regime de escoamento, que pode ser do tipo laminar, transitório ou turbulento.

Segundo Coelho (2008), com o aparecimento de vórtices e forças entre o escoamento e obstáculo, surgem coeficientes adimensionais que relacionam essas mesmas forças que surgem no escoamento, onde se destaca:

- **Coefficiente de arrasto**

O coeficiente de arrasto é obtido através da força longitudinal que age sobre a estrutura quando esta sofre deslocamento. Esta força longitudinal que age sobre a estrutura é denominada força de arrasto, F_D , que no geral é uma componente da força total que age sobre a estrutura na direcção do escoamento. A força de arrasto surge devido ao efeito combinado da tensão na parede e da força de pressão.








Re	Regime	Características	Strouhal	Escoamento
$Re \rightarrow 0$	Re muito baixo	Regime permanente, ausência de esteira, simetria longitudinal	?	
$3 \rightarrow 4 < Re < 30 \rightarrow 40$	Vórtice duplo	Regime permanente, separação e bolha de recirculação.	?	
30 80 < Re < 40 90	Estágio incipiente da esteira de vórtices de Von Kármán	Esteira laminar e instável e presença de recirculação.	$St < 0,14$	
80 150 < Re < 90 300	Esteira de vórtices de Von Kármán plenamente desenvolvida	Esteira de vórtices de Von Kármán	$0,14 < St < 0,21$	
150 $1,0 \times 10^5$ < Re < 300 $1,3 \times 10^5$	Regime sub-crítico	Esteira de vórtices instável e escoamento laminar nas proximidades da esteira	$St = 0,21$	
$1,3 \times 10^5 < Re < 3,5 \times 10^6$	Regime crítico e pós-crítico	Separação laminar, recolamento turbulento, separação turbulenta final, esteira turbulenta	Sem periodicidade dominante	
$3,5 \times 10^6 < Re$	Regime super-crítico	Transição para a camada limite turbulenta, separação turbulenta	$0,25 < St < 0,30$	

Tabela 2.1 - Padrões de escoamentos com obstáculos cilíndricos - extraído de Carvalho (2003)

Por vezes é mais esclarecedor separar os dois efeitos e estudá-los em separado. A parte do arrasto que é devido à tensão de corte na parede é designada por **coeficiente de arrasto de fricção**, $C_{D,fricção}$, desde que isso seja causado pelos efeitos de fricção, e a parte que é devida à pressão é designada por **coeficiente de arrasto de pressão**, $C_{D,pressão}$. Estes coeficientes podem ser definidos por definidos por:

$$C_{D,fricção} = \frac{F_{D,fricção}}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (2.2)$$

$$C_{D,pressão} = \frac{F_{D,pressão}}{\frac{1}{2}\rho AV^2} \quad (2.3)$$

A força de arrasto por unidade de comprimento da estrutura pode ser expressa em termos da massa específica do fluido, do seu coeficiente de viscosidade dinâmica, velocidade de referência do escoamento, e dimensão característica da secção transversal da estrutura, sendo assim uma função do tipo:

$$F_D = f_d(D, U, \rho, \mu) \quad (2.4)$$

Utilizando o Teorema de Vaschy-Buckingham obtém-se um novo grupo adimensional, o coeficiente de arrasto, c_D , que pode ser dado pela expressão:

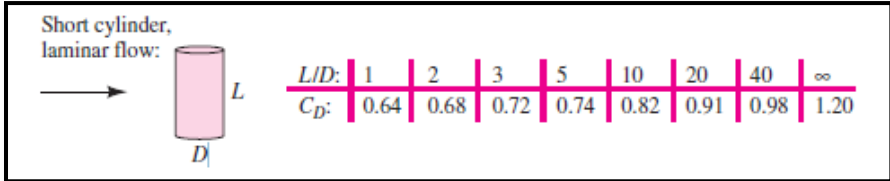
$$c_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho AV^2} = C_D(Re) \quad (2.5)$$

Onde A representa a área projectada do obstáculo na direcção perpendicular ao escoamento.

O coeficiente total de arrasto apresentado na equação 2.5, é definido pela adição dos termos do coeficiente de arrasto de pressão e do coeficiente de arrasto de fricção, do seguinte modo:

$$C_D = C_{D,fricção} + C_{D,pressão} \quad (2.6)$$

Segundo White (2011), para escoamentos cujo número de Reynolds seja maior ou igual a 10^4 , o coeficiente de arrasto para determinadas formas de peças pode também ser obtido através da relação entre dimensões da peça em questão:



Short cylinder, laminar flow:

$L/D:$	1	2	3	5	10	20	40	∞
$C_D:$	0.64	0.68	0.72	0.74	0.82	0.91	0.98	1.20

Tabela 2.2 - Relação L/D vs C_D para corpos com a forma de cilindro, extraído de White (2011)

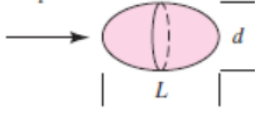
Ellipsoid:		Laminar	Turbulent
	L/d 0.75	0.5	0.2
	1	0.47	0.2
	2	0.27	0.13
	4	0.25	0.1
	8	0.2	0.08

Tabela 2.3 - Relação entre L/d vs C_D para corpos com a forma de elipse, extraído de White (2011)

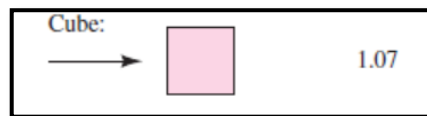


Figura 2.20 - Valor do coeficiente de arrasto para um cubo, extraído de White (2011)

No entanto, a quantificação dos valores dos coeficientes de arrasto teóricos para as mais variadas formas geométricas não é de todo uniforme, ou seja, os valores sugeridos para os coeficientes variam consoante a bibliografia consultada. Por exemplo, de acordo com Azevedo (2011), Yonis e Przulj (2006) sugerem para um escoamento turbulento em torno de um pilar com secção quadrada um coeficiente de arrasto médio de 2,199. Por sua vez, de acordo com a mesma bibliografia, Wieselsberger (1921) sugere como coeficiente de arrasto para uma secção transversal de pilar circular o valor de 1,143 e Gopalkrishanan (1993) o valor de 1,186. Resumindo, a definição dos coeficientes teóricos não é pacífica e comum a todos os autores, pelo que cabe a cada estudo, adaptar e comparar resultados com diferentes coeficientes.

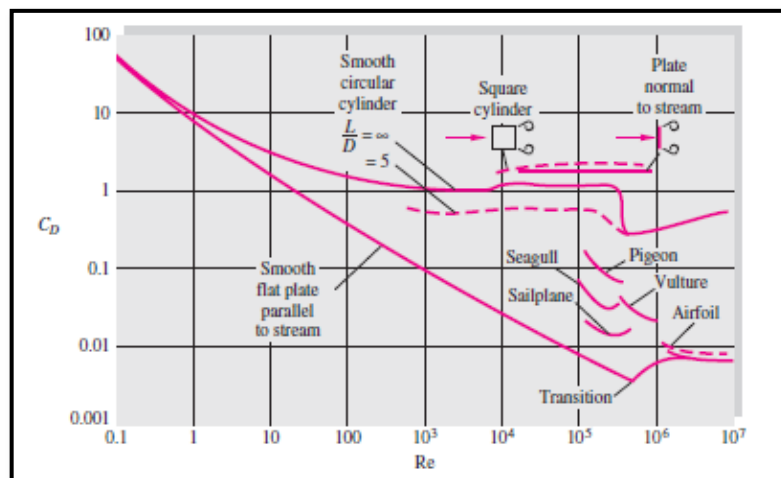


Figura 2.21 - Valor do coeficiente de arrasto vs número de Reynolds para diferentes tipos de obstáculo ao escoamento, extraído de White (2011)

Na figura 2.21, White (2011) apresenta uma relação entre o coeficiente de arrasto e o número de Reynolds do escoamento, onde se pode analisar a interacção destas duas componentes, e verificar se os valores obtidos através de simulações numéricas ou experiência laboratoriais, se encontram dentro do que é esperado e apontado na literatura.

- **Coeficiente de sustentação**

O coeficiente de sustentação é obtido através da força lateral que age sobre a estrutura no sentido perpendicular ao sentido do escoamento. Esta força lateral é denominada como força de sustentação, F_L , e é medida por unidade de comprimento da estrutura.

Utilizando de novo o Teorema da Vaschy-Buckingham obtém-se o grupo adimensional do coeficiente de arrasto que pode ser quantificado através da seguinte expressão:

$$c_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho AV^2} = C_L(Re) \quad (2.7)$$

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA DE FLUIDOS

3.1 Introdução

A modelação numérica de fluidos, ou a dinâmica de fluidos computacionais, geralmente designada por CFD, (*Computational Fluid Dynamics*) assume cada vez mais um papel importante na Engenharia Civil e com o avanço das tecnologias informáticas, torna-se uma ferramenta indispensável às investigações e projectos na área da Mecânica dos Fluidos. Este ramo é o responsável por toda a simulação de escoamentos, e todos os fenómenos que estes comportam e é transversal a diversas áreas da Engenharia, desde a Engenharia Civil passando pela Engenharia Aeronáutica, a sua versatilidade permite inúmeras e complexas análises nos mais variados cenários.

De acordo com Anderson (1995), citado por Ramos (2012), o início do trabalho no CFD teve origem a meio do século XX, em investigações na área da Aeronáutica, pois existia uma necessidade de responder a problemas de grande complexidade, em que caso não fosse possível o auxílio de programas informáticos, a sua resolução seria impossível. Esta ferramenta permite ainda o estudo de um grande número de variáveis que traduzem os fenómenos que se querem investigar.

Por sua vez, tal como foi referido anteriormente, Wendt (2009) refere que o CFD tem uma aplicabilidade muito vasta e o uso desta ferramenta tem uma enorme tendência de crescimento acompanhada do desenvolvimento da velocidade e capacidade de processamento dos computadores, ferramentas essenciais para o CFD.

Este capítulo visa o processo da modelação numérica de fluidos através do CFD e está organizado em seis subcapítulos.

No primeiro subcapítulo serão abordadas as equações governativas pelas quais se regem os programas de modelação numérica de fluidos; no segundo subcapítulo aborda-se os modelos de resolução numérica existentes nestes tipos de programas; no terceiro subcapítulo são abordados os métodos existentes de separação no espaço dos corpos para análise; no quarto e último subcapítulo são abordados os diversos tipos de malha existentes para o cálculo numérico.

A análise de todas estas componentes da modelação numérica de fluidos permitirá nos capítulos de processamento numérico a escolha dos diferentes parâmetros para as simulações.

3.2 Equações Governativas

O princípio primordial e básico do CFD é a repartição do escoamento em pequenos elementos que constituem uma malha de volumes finitos, onde é aplicado um conjunto de equações que emergem dos princípios governativos da dinâmica dos fluidos:

- Lei da Conservação da Massa ou Equação da Continuidade;
- Lei da Quantidade de Movimento (Segunda Lei de Newton);
- Lei da Conservação da Energia (Primeira Lei da Termodinâmica).

3.2.1. Conservação da massa

O princípio da conservação da massa aplicado a um volume infinitesimal de fluido num escoamento é representado pela equação da continuidade, que é descrita pela seguinte equação:

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

Sendo u_i a componente da velocidade na direcção i , t o tempo e x_i a posição da partícula na direcção i .

A equação anterior é válida em qualquer ponto do domínio do escoamento. No caso de fluidos incompressíveis, a massa volúmica não é função do tempo ou do espaço, e deste modo a equação da continuidade adopta a sua forma mais simples, susceptível de ser traduzida pela seguinte equação:

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

3.2.2. Equação da Quantidade de Movimento

A lei da Quantidade de Movimento, habitualmente denominada como a Segunda Lei de Newton, relaciona o conjunto das forças externas com as grandezas de massa e de aceleração do seu movimento $\vec{a} = \frac{D\vec{u}}{Dt}$. Ao se substituir o tensor das tensões viscosas pela relação constitutiva entre a tensão e a taxa de deformação para fluidos Newtonianos e isotrópicos, onde as propriedades físicas são independentes da direcção considerada, obtém-se a equação de Navier-Stokes para um fluido de viscosidade dinâmica μ :

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

Esta equação representa a taxa de variação da quantidade de movimento e o conjunto das forças a que a mesma se encontra sujeita. No processo de cálculo, o número de equações é inferior ao número de incógnitas, e desse modo o programa recorre a expressões com elevado grau empírico, para que as novas incógnitas se relacionem com as variáveis de escoamento médio. Estas relações referidas anteriormente, são geralmente denominadas como modelos de turbulência.

Tal como foi referido anteriormente, Ramos (2012) refere que com esta evolução tecnológica a nível computacional, o futuro destes problemas passará sempre por estes métodos, mas com a diferença do tempo utilizado para obtenção da sua solução a ser cada vez mais reduzido. Apesar desta evolução tecnológica dos últimos anos, a simulação directa de *Navier-Stokes* (*DNS - Direct Numerical Simulation*) tem-se mantido como uma tarefa bastante complexa e lenta, aliado à sua limitação de aplicação apenas a escoamentos com número de *Reynolds* bastante reduzido. Quando o número de *Reynolds* é bastante elevado, ou seja, para escoamentos turbulentos, cujo cenário é o mais comum, a resolução directa da equação de *Navier-Stokes* não é possível, o que levou a que se desenvolvessem outros métodos que permitissem essa mesma resolução.

3.2.3 Variáveis características da turbulência

Segundo Azevedo (2011), a turbulência apresenta diversas variáveis características:

- Intensidade da turbulência

$$I = \frac{u'}{U} \quad (3.4)$$

Onde I é a intensidade da turbulência, u' é a flutuação da velocidade e U a velocidade média do escoamento num ponto.

- Comprimento característico da turbulência

$$l = C_\mu \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

Onde l é o comprimento característico da turbulência, C_μ uma constante empírica especificada no modelo de turbulência, que toma o valor de aproximadamente 0,09 no caso do modelo k - ε padrão, k é a energia cinética turbulenta e ε a taxa de dissipação turbulenta.

- Energia cinética turbulenta

$$k = \frac{3}{2}(U \times I)^2 \quad (3.6)$$

- Taxa de dissipação turbulenta

A partir da energia cinética turbulenta e da viscosidade cinemática turbulenta, ν_t , a taxa de dissipação turbulenta, ε , é possível de calcular através da expressão:

$$\varepsilon = \frac{C_\mu k^2}{\nu_t} \quad (3.7)$$

- Taxa de dissipação específica

Através da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação turbulenta, pode-se obter a taxa de dissipação específica, ω , através da seguinte expressão:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k} \quad (3.8)$$

- Viscosidade cinemática turbulenta

$$\nu_t = 0,22 \times \nu \times I \times Re \quad (3.9)$$

3.3 Modelos de resolução numérica

3.3.1 Introdução

Existem diversos métodos para que seja possível uma resolução numérica das equações de *Navier-Stokes*. Segundo Wendt (2009), podem ser divididos em três grandes grupos:

- Modelos Baseados nas Equações Médias de *Reynolds* (*RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes*);
- Método da Simulação das Grandes Escalas de Turbulência (*LES - Large Eddy Simulation*);
- Solução Numérica Directa (*DNS - Direct Numerical Solution*).

Estes modelos devem ser utilizados de forma a que seja possível representar os fenómenos físicos adequados com a realidade do problema em causa.

3.3.2 Modelos baseados nas equações RANS

Segundo Wendt (2009), os problemas cujo escoamento seja turbulento, apresentam características ímpares, e podem ser resolvidos pela aplicação directa das equações de *Navier-Stokes*, que fornecem uma informação bastante verosímil de todos os fenómenos que ocorrem nesse mesmo escoamento, apesar de que este processo pode ser muito dispendioso e moroso. Para evitar que tal acontecesse, as equações foram melhoradas, e deram origem a

um novo grupo de equações, as *Reynolds Averaged Navier-Stokes*, que abriram a perspectiva de poder simular mais escalas de turbulência. Para a definição da equação de *Navier-Stokes* para o escoamento médio, novas incógnitas foram introduzidas no sistema da equação quantidade de movimento, mas sem a introdução de novas equações. Estas novas incógnitas são as tensões de *Reynolds*, que podem ser escritas em coordenadas cartesianas da seguinte forma:

$$\text{Conservação da massa:} \quad \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.10)$$

$$\text{Quantidade de movimento:} \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (3.11)$$

Azevedo (2011) afirma que este grupo de equações surge a partir da média temporal das equações de *Navier-Stokes*.

Para Wendt (2009), a variação de quantidade média de movimento do fluido, é representada pela parte inicial da equação 3.12, e é afectada por vários tipos de forças, pela variação de pressão, variação de tensões viscosas e ainda pelas variações de tensão aparente $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$, que surgem devido ao campo de velocidade flutuante. É a estas tensões que vulgarmente são apelidadas de tensões de *Reynolds*.

De acordo com Ramos (2012), os modelos cuja base são as RANS, não têm capacidade para resolver a totalidade das escalas de turbulência. Para contrariar tal facto, a solução adoptada é a modelação de todas as escalas como uma única escala média, que representa toda a turbulência. São vários os modelos com classificações quanto ao modo como se obtêm as tensões de *Reynolds*, no entanto, os mais utilizados são os modelos lineares de viscosidade turbulenta de duas equações. O grande objectivo destes modelos é o cálculo das tensões de *Reynolds*, a partir das equações RANS.

Para Azevedo (2011), nestes modelos, resolvem-se as equações da energia cinética de turbulência, de transporte de quantidade de movimento e da dissipação de energia cinética de turbulência (modelo k-ε).

Caso seja a resolução da equação da dissipação específica, o modelo é vulgarmente conhecido como modelo k-ω. Para estes modelos, as tensões de *Reynolds* são obtidas através da seguinte expressão:

$$(-\rho \overline{u'_i u'_j}) = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.12)$$

$$\text{Onde:} \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.13)$$

$$\delta_{ij} = 1, \text{ se } i = j \text{ e } \delta_{ij} = 0, \text{ se } i \neq j \quad (3.14)$$

Em que S_{ij} representa o tensor de deformações e δ_{ij} o delta de *Kronecker*. Todos os modelos de cálculo têm o objectivo comum da determinação da viscosidade turbulenta, sendo apenas diferentes no modo como chegam a essa solução.

3.3.2.1 Modelo *standard k-ε*

Segundo Azevedo (2011), este é um modelo semi-empírico cuja base é um modelo de duas equações: a equação de transporte para energia cinética de turbulência e a equação da taxa de dissipação. A representação das propriedades turbulentas do escoamento é conseguida através da resolução das duas equações de transporte adicionais, e a partir daí, consegue-se determinar a viscosidade turbulenta.

De acordo com Ramos (2012), este modelo apenas é válido para escoamentos totalmente turbulentos, onde os efeitos viscosos moleculares podem ser minimizados. Numa análise geral poder-se-á afirmar que este modelo apresenta um bom rendimento em termos de constituição e aproximação. Porém, para certos casos este modelo não é o mais correcto, pois em escoamentos com separação da camada limite, com mudanças repentinas nas taxas de estrangulamento, em fluidos rotativos ou superfícies curvas, este modelo não apresenta resultados totalmente fidedignos.

3.3.2.2 Modelo *k-ω*

Segundo Ramos (2012), na década de oitenta, Saffman e Wilcox, em 1988, apresentaram uma versão desse modelo, onde a taxa de dissipação específica da energia cinética é substituída por $\omega = \frac{\varepsilon}{k}$, onde é suposto a viscosidade turbulenta estar associada à energia cinética turbulenta, k , e à taxa de dissipação específica, ω , através da equação seguinte:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (3.15)$$

Este modelo, é bem mais coeso e exacto próximo das superfícies, em relação ao modelo *standard k-ε*, porém também possui limitações nas regiões mais afastadas da zona da parede. Para contrariar tal facto, é necessário utilizar uma combinação de equações do modelo *k-ω* para as regiões próximas da parede, e utilizar equações do modelo *standard k-ε* para regiões mais afastadas da parede.

Desde modo, surgiu a necessidade de reformular o modelo de turbulência, surgindo o *Shear-Stress Transport (SST)*.

3.3.2.3 Shear Stress Transport k- ω

De acordo com Ramos (2012), este modelo, bem mais recente, que o modelo *standard* k- ϵ , ou o modelo k- ω , surge como uma conjunção destes dois modelos, e foi formulado por *Menter*, na década de noventa.

Segundo Blasek (2001), como este modelo não é um “novo modelo” mas sim a conjunção de dois modelos anteriores, este não apresenta nenhum novo conjunto de equações, mas sim dois conjuntos de equações de transporte, um utilizado para as regiões mais próximas da parede e outro para as zonas mais afastadas.

Para Ramos (2012), com o aparecimento desta nova formulação, surge a possibilidade de se prever com uma melhor precisão o início e o tamanho de separação de escoamento sob gradientes de pressão em condições desfavoráveis, fruto do envolvimento dos efeitos de transporte na enunciação do modelo de viscosidade turbulento. Tal como já foi referido anteriormente, este modelo surge na sequência do modelo k- ω apresentar determinadas carências, o que faz com que a utilização do modelo SST seja preferível nesses casos. No entanto, também é de referir que nos escoamentos onde o número de *Reynolds* seja consideravelmente baixo, o tratamento da simulação na zona da parede deve ser feito através do modelo k- ω .

3.3.3 Large Eddy Simulation - LES

De acordo com Bonoa *et al.* (2011), este modelo tem como principal característica, a suposição de que os movimentos nas escalas mais reduzidas têm tendência para serem mais homogêneos e isotrópicos, ou seja, não sofrem alterações pelas condições de fronteira como acontece com escalas de maior dimensão. Esta suposição faz com que a modelação destas escalas tenha um carácter universal e constante em condições locais, sendo por isso uma grande vantagem.

Conforme Ramos (2012), este modelo não ficou esquecido com o passar dos anos, ele passou a ter muito mais popularidade e passou a ser uma técnica fidedigna para a previsão de escoamentos turbulentos, devido aos desenvolvimentos da classe dos modelos dinâmicos de tensões residuais. Quando comparado com o DNS, o LES tem a vantagem por poder ser aplicado a números de *Reynolds* elevados, pois resolve as equações de *Navier-Stokes* para as escalas maiores.

Segundo Azevedo (2011), o LES não necessita de tantos recursos computacionais como o DNS, pois não tem necessidade de resolver os vórtices menores do campo de escoamento, no entanto, os recursos necessários dependem sempre da percentagem da energia cinética da turbulência.

Porém, este modelo não apresenta apenas vantagens, por exemplo, tem a desvantagem de necessitar de uma malha mais refinada e com uma considerável resolução na zona próxima das paredes.

3.3.4 Direct Numerical Simulation - DNS

De acordo com Azevedo (2011), este modelo, tem por base a resolução das equações de *Navier-Stokes*, sem usar médias ou aproximações, que não sejam as resultantes da separação numérica, pois o seu erro pode ser estimado e até controlado. Neste modelo as equações governativas são calculadas numericamente, sem qualquer tipo de auxílio a um modelo de turbulência, ou seja, os movimentos inerentes ao escoamento são resolvidos na sua totalidade, provocando que o processo se torne mais demorado e dispendioso.

Para Berwaldt (2009), uma simulação para que seja válida, deve ter a capacidade de resolver toda a dissipação da energia cinética. No entanto, os escoamentos turbulentos apresentam todos eles, um largo espectro de energia, o que torna as simulações de escalas de turbulência muito mais difíceis, fazendo com que o modelo DNS seja apenas aplicável em escoamentos cujo número de *Reynolds* seja moderado, ou seja, é aplicável a muito poucos escoamentos, pois a sua maioria, tem elevados números de *Reynolds*.

3.4 Métodos para a separação no espaço

Segundo Gonçalves (2007), ao se adoptar o princípio da continuidade como um princípio fundamental da modelação, assume-se que toda a matéria é um meio contínuo, sem qualquer vazio interior, ou seja, sem considerar a estrutura molecular da matéria em causa. Porém existe formas de contrariar estas suposições iniciais, tal como nas derivadas matemáticas no cálculo infinitesimal, o conceito *continuum* permite que haja uma representação do ponto geométrico por um limite matemático. Deste modo, o problema da estrutura molecular da matéria em causa, deixa de ter significado, pois são considerados de uma forma macroscópica, através de equações constitutivas do material.

Assim sendo, e para Blasek (2001), como todo este processo segue uma determinada matriz e complexidade, após a escolha do método de resolução numérica, é também necessário escolher um método de separação espacial do corpo em estudo, ou seja, é necessário permitir que as equações governativas se aproximem de um sistema de equações algébricas para as variáveis do problema que serão conseguidas em localizações separadas no tempo e no espaço. São vários os métodos numéricos de resolução das equações governativas em causa, de onde se destacam os seguintes:

- Método dos Elementos Finitos;
- Método das Diferenças Finitas;

- Método dos Volumes Finitos;
- Método dos Elementos Fronteira.

De acordo com Gonçalves (2007), em termos teóricos, o que é realmente importante é a qualidade da malha em causa para o problema, pois supostamente os resultados obtidos para qualquer um dos métodos utilizados, serão sempre iguais entre si, apesar de alguns serem mais apropriados para certos tipos de problemas específicos.

O *software* usado nesta dissertação, utiliza o Método dos Volumes Finitos, pelo que será este mesmo método abordado já no próximo subcapítulo.

3.4.1 Métodos dos volumes finitos

Segundo Eymard *et al.* (2006), o Método dos Volumes Finitos, é um método de discretização adequado para diversos tipos de simulações numéricas de leis de conservação, e com uma aplicação vasta na Engenharia, em particular dentro da área da Mecânica dos Fluidos. Ainda segundo os autores, grande parte das características essenciais deste método, são comuns ao Método dos Elementos Finitos, e pode ser usado em diversas geometrias, utilizando malhas estruturadas ou não-estruturadas, o que leva a esquemas robustos. Uma característica especial é o facto deste método conservar o fluxo numérico de uma célula para uma outra célula vizinha desta, tornando-o num método bastante importante para a modelação de problemas onde o fluxo assume particular relevância. Segundo o Guia do Utilizador do programa *Ansys Workbench*, no Método dos Volumes Finitos, a variável de interesse está localizada no centróide do volume de controlo, o elemento da malha em que se transformou o domínio da solução, à qual se aplica o conceito de continuidade. Por fim, de referir que este método, incorpora a forma diferencial das equações governativas ao longo de cada volume de controlo, aplicando o Teorema de Gauss.

3.5 Malhas

Segundo Gonçalves (2007), uma malha computacional para um cálculo numérico, não é mais do que uma representação do domínio físico através de pontos e linhas, com o objectivo de dividir o corpo em estudo em elementos de uma dimensão muito mais reduzida. As malhas serão mais objectivas, quanto menor dimensão tiver cada elemento constituinte, e terão consequentemente menores erros numéricos. Nos escoamentos turbulentos, a precisão é ainda mais necessária, pois este tipo de escoamento exige um maior processo de cálculo e de equações, e por isso mesmo, a malha a adoptar para este tipo de problemas deve ser muito mais exigente e refinada.

Existem diversos tipos de malhas computacionais, onde se destacam os seguintes grupos:

- Malhas Ortogonais:

1. *Malha Estruturada*

- Malhas Não Ortogonais:

1. *Malhas Estruturadas*

2. *Malhas Não Estruturadas*

Uma malha estruturada é caracterizada por cada volume interno constituinte, ter o mesmo número de vizinhos com uma sequência dos mesmos. Porém, estas malhas têm o grave problema de apenas poderem ser aplicadas a corpos com geometrias não demasiado complexas, e da distribuição dos pontos na malha não ser fácil, ou seja, pode existir um desperdício de recursos pois se uma zona da malha é bastante refinada, devido a razões de precisão, existirão outras zonas da malha o espaçamento será necessariamente menor. Esta questão é sem dúvida a questão de maior relevo nos problemas tridimensionais. No que toca a malhas estruturadas, a sua grande vantagem prende-se com o facto de não necessitar de grandes recursos de memória computacional, dado que a arrumação dos seus volumes internos, é muito mais ordenada. Assim sendo, apresentasse nas seguintes figura exemplos de uma malha ortogonal, não ortogonal, estruturada e não estruturada.

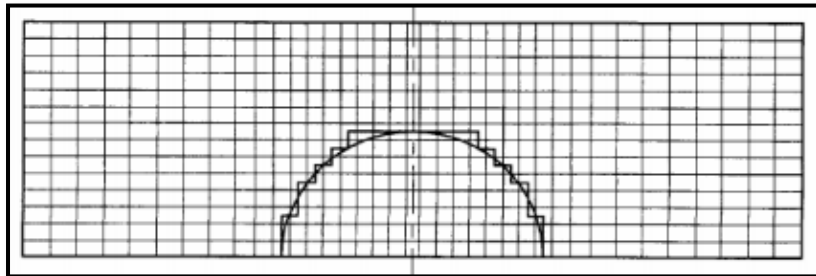


Figura 3.1 - Exemplo de malha ortogonal, extraído de Gonçalves (2007)

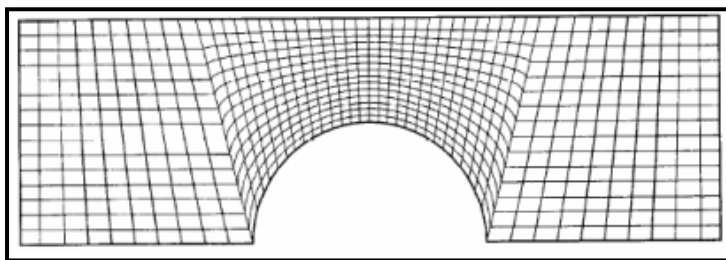


Figura 3.2 - Exemplo de malha não ortogonal, extraído de Gonçalves (2007)

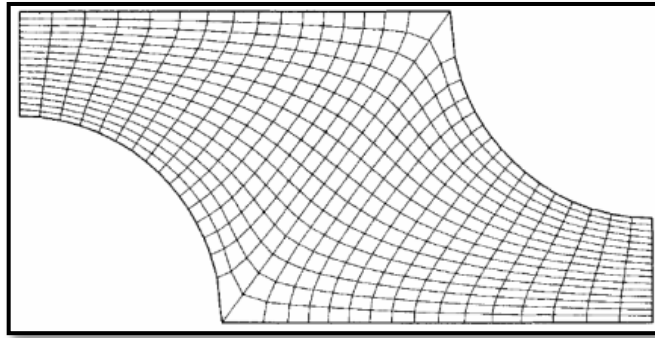


Figura 3.3 - Exemplo de malha estruturada, extraído de Gonçalves (2007)

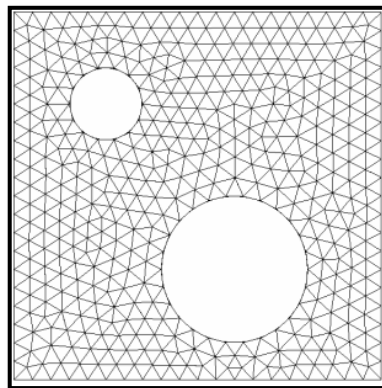


Figura 3.4 - Exemplo de malha não estruturada, extraído de Gonçalves (2007)

Face ao exposto, é óbvio que quando os problemas têm geometrias de relativa complexidade, a tipo de malha a usar deve ser o mais flexível possível, com capacidade de adaptação às limitações impostas por condições de fronteira, ou seja, o ideal será uma malha não estruturada. Este tipo de malha é o ideal para a utilização de métodos de cálculo, como o Método dos Volumes Finitos, onde os volumes de controlo podem ter qualquer forma, sem restrição do número de vizinhos. Porém esta malha provoca uma irregularidade da estrutura dos dados e um aumento de complexidade, pois os algoritmos que resolvem este tipo de equações algébricas são muito mais lentos que os algoritmos das malhas estruturadas.

4. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

4.1 Introdução

Este capítulo centra-se no procedimento utilizado nas simulações numéricas, dado que os modelos numéricos requerem uma quantidade relativamente grande de informações, e está organizado em dois subcapítulos.

No primeiro subcapítulo abordam-se as características gerais do processo de simulação, com particular destaque para as características do computador utilizado, bem como todos os passos necessários para a realização das simulações; no segundo subcapítulo são abordadas todas as etapas necessárias para uma simulação.

4.2 Características gerais do processo de simulação

Este trabalho centra-se, no estudo da interacção do campo de escoamento tridimensional em torno de um pilar. O estudo deste fenómeno pode ser realizado pela simulação numérica em 3D. Para as simulações realizadas no âmbito desta dissertação foi utilizado um computador com um processador Intel Core Duo com 2.0 GHz de processamento, com 3 Gb de memória RAM e com uma capacidade de armazenamento de 200 GB de dados. As simulações requerem computadores com grande capacidade de processamento de dados, e tal facto ainda é mais agravado quando se trata de escoamentos turbulentos e de modelações tridimensionais.

Para a realização das simulações, optou-se pela utilização de um programa do grupo ANSYS, que tem utilização em diversos ramos da engenharia e ciência e comporta um vasto conjunto de ferramentas essenciais para este trabalho. O programa adoptado foi o *Ansys Workbench* que se mostrou uma excelente ferramenta de trabalho, com alguma simplicidade. A grande vantagem desta plataforma de trabalho prende-se com o facto de associar um ficheiro a cada etapa necessária para a simulação, ou seja, é a própria plataforma do programa que indica o que está feito ou não, se há erros em cada uma das etapas, e a ordem a seguir, como se pode verificar na figura 4.1.

Segundo Anderson (1995), o procedimento de todo o processo numérico, resume-se aos seguintes passos, que serão os próximos subcapítulos abordados neste trabalho:

- Concepção da geometria da modelação;
- Geração da malha;
- Selecção do modelo de turbulência do escoamento;
- Condições de fronteira;
- Selecção do método de solução;

- Concretização do cálculo numérico;
- Recolha e análise dos resultados obtidos.

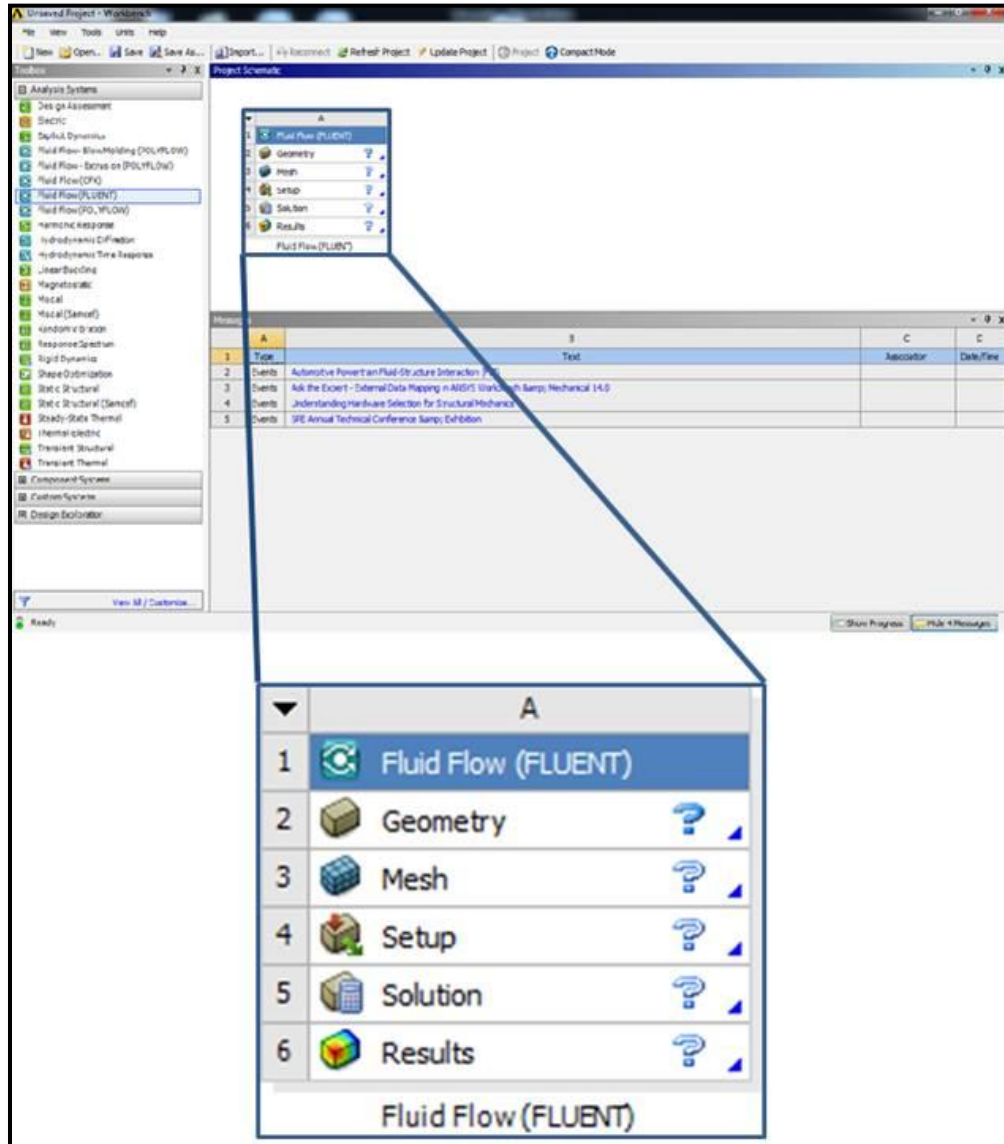


Figura 4.1 - Menu geral do Ansys Workbench

4.3 Procedimento da simulação

4.3.1 Conceção da geometria da simulação

A concepção da geometria da simulação é realizada a partir do modelo físico que se pretende avaliar. Neste caso, as dimensões do domínio computacional são definidas num modelo

geométrico em forma de paralelepípedo, no interior do qual se insere um orifício que representa o pilar em estudo. A figura 4.2 representa um exemplo de um modelo geométrico, com 4,0 m de comprimento, 1,5 m de largura e 0,50 m de altura, representativo de um escoamento sob um pilar.

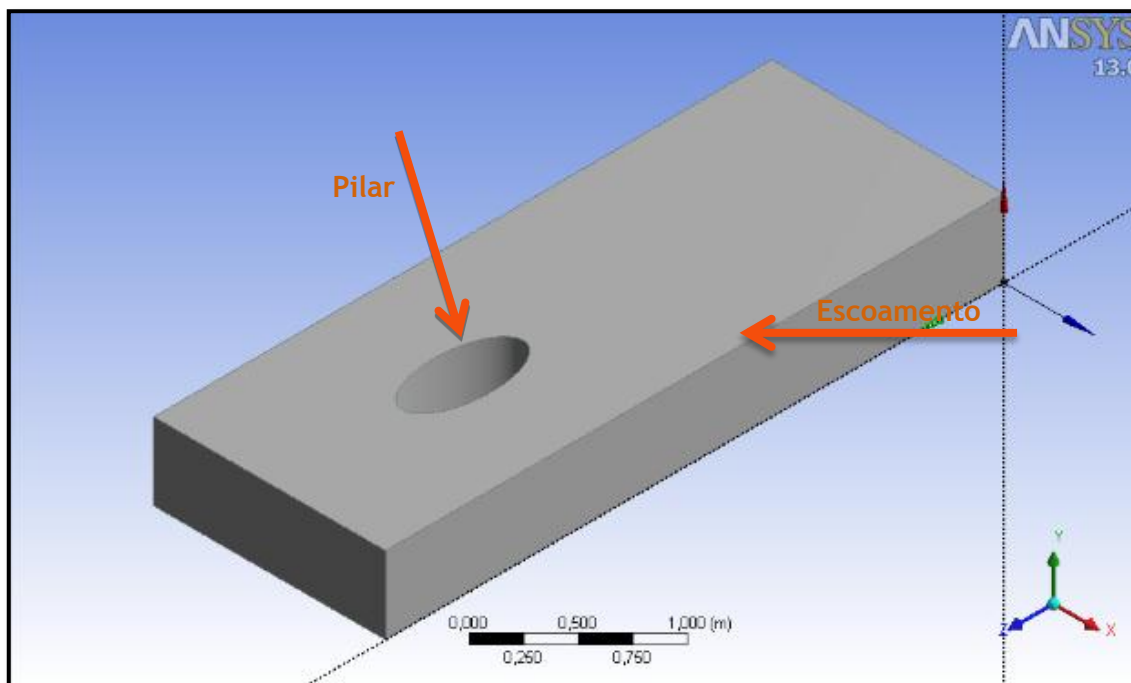


Figura 4.2 - Exemplo de uma geometria possível para uma simulação

4.3.2 Geração da malha

Para o processo de geração da malha são vários os métodos possíveis de serem aplicados. Por exemplo, através da introdução de coordenadas específicas permitindo o traçado de linhas que formarão a malha, ou seja, a geração manual da malha, ou ainda a geração automática da malha, feita com o auxílio do *software* ANSYS.

De acordo com Ramos (2012), é devido a todas as condições inerentes a este tipo de simulações, em particular da capacidade do computador em resolver este problema, que é necessário rentabilizar ao máximo o tempo de processamento do problema. No entanto, a qualidade dos resultados obtidos deve ser a melhor possível, ou seja, é necessário que haja uma boa relação entre o tempo de processamento e exactidão e qualidade dos resultados, o que nos leva a que não se faça um refinamento total de toda a malha, mas sim, nas zonas onde ocorrem grandes variações dos parâmetros em estudo. Posto isto, torna-se evidente que há uma necessidade de efectuar um refinamento da malha na zona próxima do pilar, a zona que mais interessa a este estudo, e também, por necessidade dos métodos de cálculo, um refinamento na zona das paredes, para o bom funcionamento do *Large Eddy Simulation*, tal

como foi referido no último capítulo. Para que todas estas condições possam ser alcançadas e a qualidade da malha garantida, se utilize as ferramentas disponíveis no *ANSYS Meshing*, através do menu *Sizing*, trabalhando todas as suas componentes, como se pode verificar na figura 4.3.

Sizing	
Use Advanced Si...	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Nor...	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Proximity Acc...	0,5
<input type="checkbox"/> Num Cells Acr...	Default (3)
<input type="checkbox"/> Min Size	2,1439e-002 m
<input type="checkbox"/> Max Face Size	0,90 m
<input type="checkbox"/> Max Size	0,90 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,0
Minimum Edge L...	0,471240 m

Figura 4.3 - Menu da formulação da malha - *Sizing Ansys Meshing*

Tendo por base os elementos apresentados, é possível gerar uma malha, como pode ser observado na figura 4.4, sendo possível ainda obter no *ANSYS Meshing* um relatório sobre as malhas, nomeadamente o volume do maior e do menor elemento bem como o volume total.

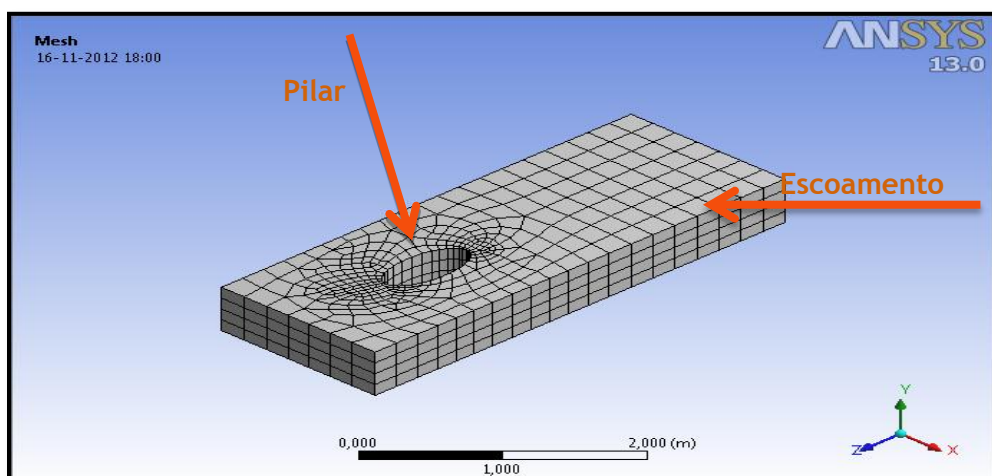


Figura 4.4 - Exemplo de uma malha - vista isométrica

4.3.3 Selecção do modelo de turbulência do escoamento

A escolha do modelo de turbulência do escoamento é feita após a modelação da geometria do problema e a consequente geração da malha. Após estes dois passos descritos anteriormente, a simulação entra no passo da resolução numérica, e para isso foi utilizado o *Fluent*, um *software* que permite simular os mais variados escoamentos, através da definição de inúmeras condições necessárias à simulação, entre as quais, a escolha do modelo de turbulência do escoamento. O *Fluent* utiliza uma discretização numérica também denominada como *método dos volumes finitos*. Os códigos de CFD contêm algoritmos numéricos que resolvem um conjunto de equações, que no caso do *Fluent*, são as equações de Navier-Stokes e as variáveis são definidas no centro de cada volume de controlo.

Este *software* resolve o sistema de equações resultante dos parâmetros introduzidos, e permite uma análise posterior dos resultados obtidos através de várias ferramentas ao dispor do utilizador, como gráficos, vídeos, histogramas, relatórios, etc.

Para se iniciar a simulação no *Fluent*, é necessário definir as opções de processamento da simulação. Este passo deve ser abordado tendo em conta as características do computador onde se realizam as simulações, pois esse factor pode originar que a simulação não seja feita dentro do tempo estimado pelo utilizador.

Segundo Ramos (2012), este *software* permite explorar a máxima capacidade do computador, e tirar partido da tecnologia *Multi Core*, que permite usar mais do que um processador em simultâneo, que permite executar o dobro dos cálculos por segundo. A ferramenta do *software* que permite este uso é o *Parallel Processing*, que pode ser activado no *Fluent Launcher*, a primeira etapa do *Fluent* onde as opções de processamento são definidas, como se pode observar na figura 4.5.

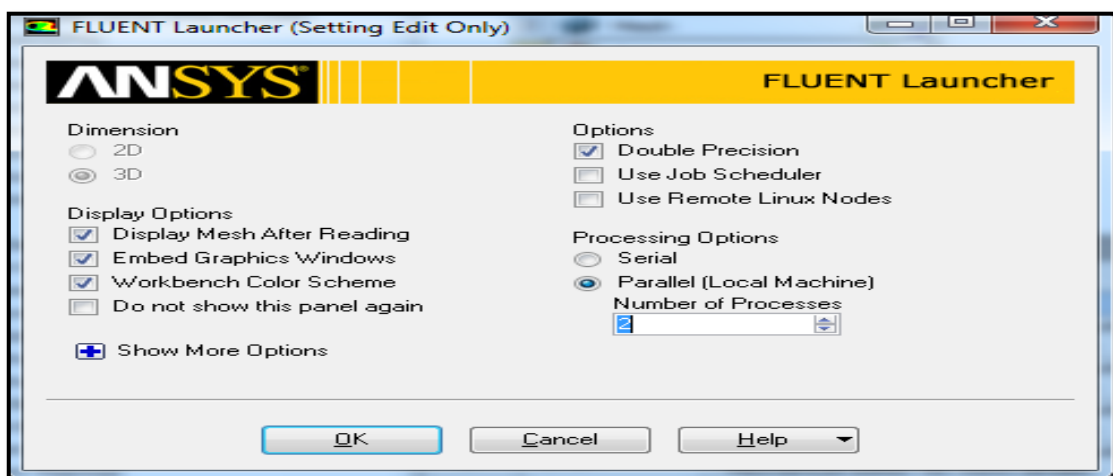


Figura 4.5 - *Fluent Launcher*

Após a definição das opções de processamento, surge a necessidade de configurar todos os componentes do cálculo da simulação. Deste modo, o passo seguinte será configurar as opções básicas, no menu geral, onde são definidas algumas características da simulação, como por exemplo, a escala da geometria, a verificação da qualidade da malha ou o tipo do método de solução. A resolução numérica do sistema de equações no *Fluent* pode ser realizada através de dois modos: um baseado na pressão e outro baseado na massa volúmica.

Segundo Ramos (2012), o modo baseado na pressão é mais direccionado para escoamentos incompressíveis ou quase incompressíveis, e por isso é o modelo que melhor se adapta ao presente estudo. De forma genérica o escoamento é não permanente, ou seja, a sua pressão e velocidade dependem das coordenadas respectivas e do tempo. As equações governativas que dão origem a este sistema de equações que são resolvidas no *Fluent* são transformadas nesse mesmo sistema de equações, através do método dos volumes finitos, tal como foi referido no capítulo anterior. Neste menu é ainda possível definir o tipo de escoamento, tal como se pode observar na figura 4.6.

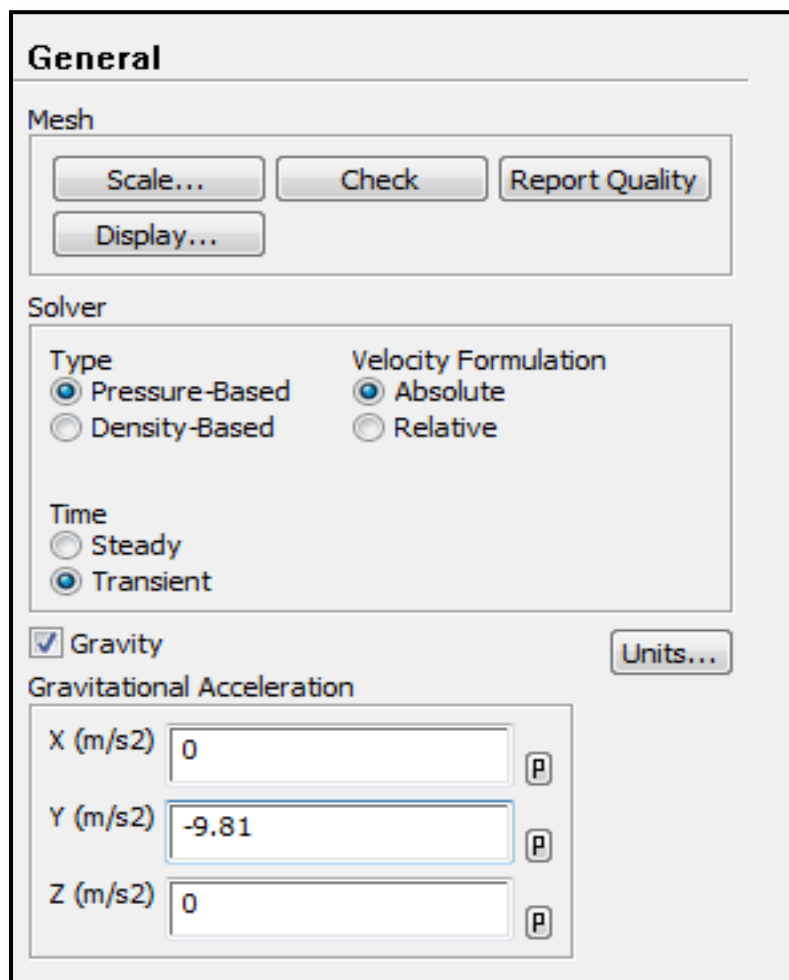


Figura 4.6 - Menu Geral

Tal como já foi referido no último capítulo, os modelos numéricos considerados assumem grande importância na simulação, pois, é a partir destes que todos os cálculos são efectuados e que os resultados são obtidos, e o *Fluent* oferece diversas hipóteses para o utilizador, entre modelos e submodelos. Os métodos com maior precisão são o modelo LES e DNS. No entanto, este trabalho tem o objectivo de simular um escoamento com um elevado número de Reynolds, pelo que a hipótese de optar pelo DNS, como modelo de turbulência do escoamento, é afastada e em geral se opta pelo modelo LES. Em seguida, apresenta-se na figura 4.7 como exemplo, na janela de escolha do modelo de turbulência da solução, a escolha do modelo LES.

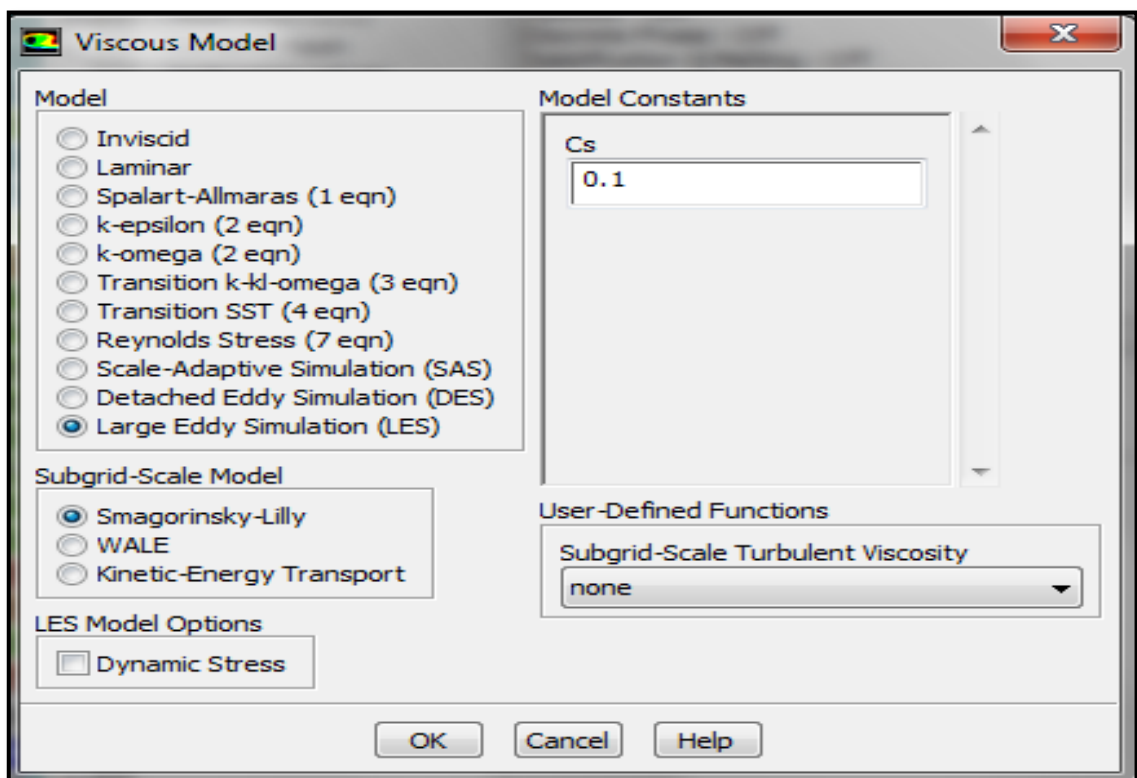


Figura 4.7 - Escolha do modelo de turbulência

4.3.4 Condições de fronteira

Para que seja possível definir as condições de fronteira do problema, é necessário definir igualmente os materiais presentes na simulação e que compõem essas condições de fronteira. Assim sendo, o *Fluent* apresenta a hipótese de criar ou editar os materiais constituintes da simulação em causa, sendo eles sólidos ou líquidos, tal como se apresenta na figura 4.8, o material água líquida, criado a partir da base de dados que o próprio programa dispõe.

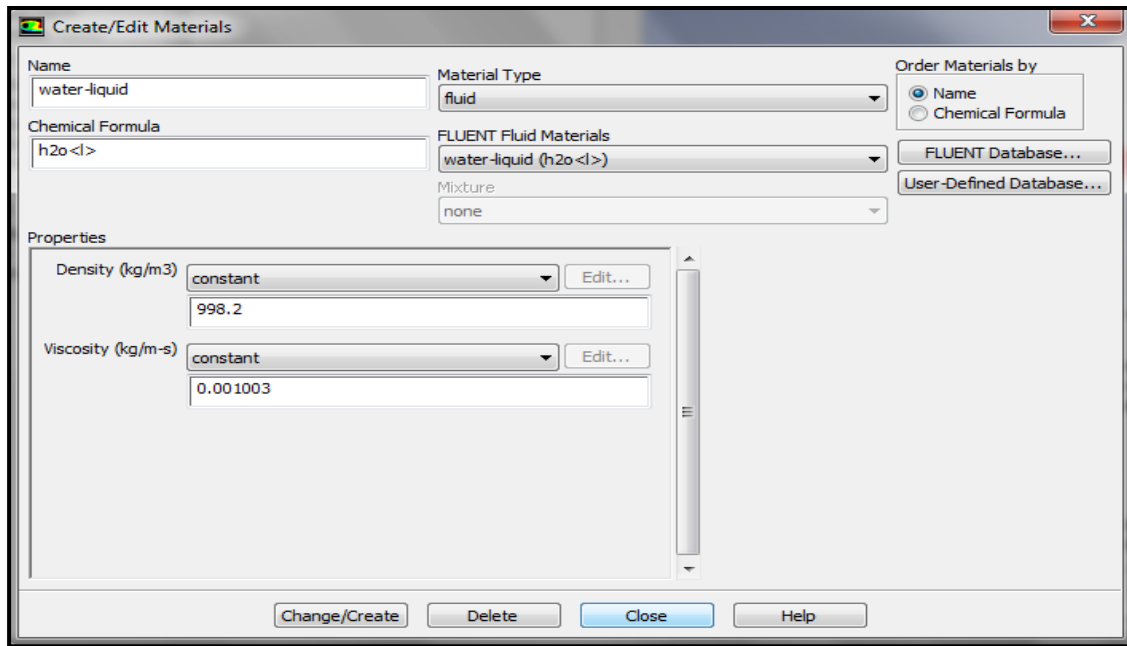


Figura 4.8 - Definição das propriedades dos materiais

A definição das condições de fronteira mais adequadas para simular matematicamente o sistema em análise é uma etapa crucial no processo de modelação numérica, pois dela depende o conhecimento pormenorizado do sistema a ser simulado e das especificidades matemáticas do modelo escolhido. As condições de fronteira especificam o valor das variáveis nas fronteiras do domínio físico em estudo.

No processo de modelação é numérica, após a definição dos materiais constituintes, é necessário definir todas as fronteiras e as suas respectivas condições, tal como se exemplifica na figura 4.9 a definição de uma condição de fronteira, *mass-flow-inlet*, um código do *Fluent* que permite definir numa determinada zona o caudal que passa nessa entra nessa mesma secção.

Na maioria das simulações de escoamentos reais, a superfície do escoamento é considerada como superfície livre, e para isso é necessário definir a condição de fronteira dessa zona do escoamento. Assim sendo, e segundo Ramos (2012), pode-se assumir a superfície livre como uma parede sem atrito com a pressão como nula nessa fronteira, simulando deste modo a superfície livre à pressão atmosférica. Esta simplificação surge pelo facto de que com esta decisão poupa-se bastante tempo de processamento da simulação e os resultados continuam a ser fidedignos, apesar de se desprezar a deformação da superfície livre. O mesmo autor refere ainda que certos autores aconselham o uso do *Volum of Fluid* para escoamentos com superfície livre, onde a simulação passa também a ter preocupações com a relação do escoamento e a sua interacção com o ar, aumentando as necessidades de cálculo e tempo de

processamento, e por isso não foi considerado neste trabalho. Deste modo, apresenta-se na figura 4.10, um exemplo da definição de uma condição de fronteira, como superfície livre.

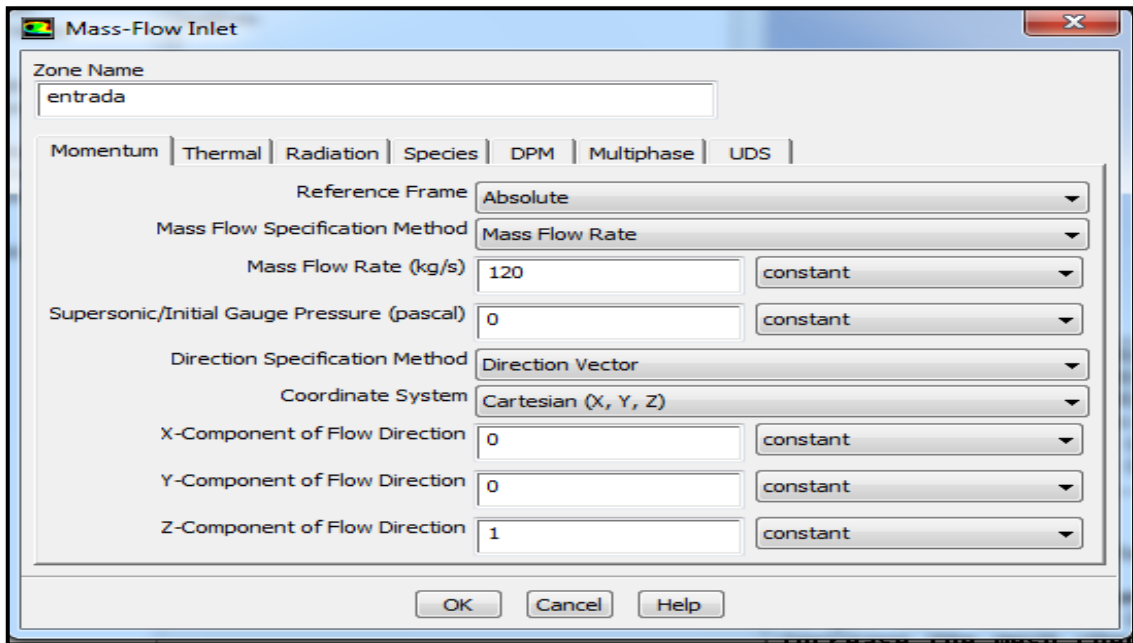


Figura 4.9 - Condição de fronteira da secção “entrada”

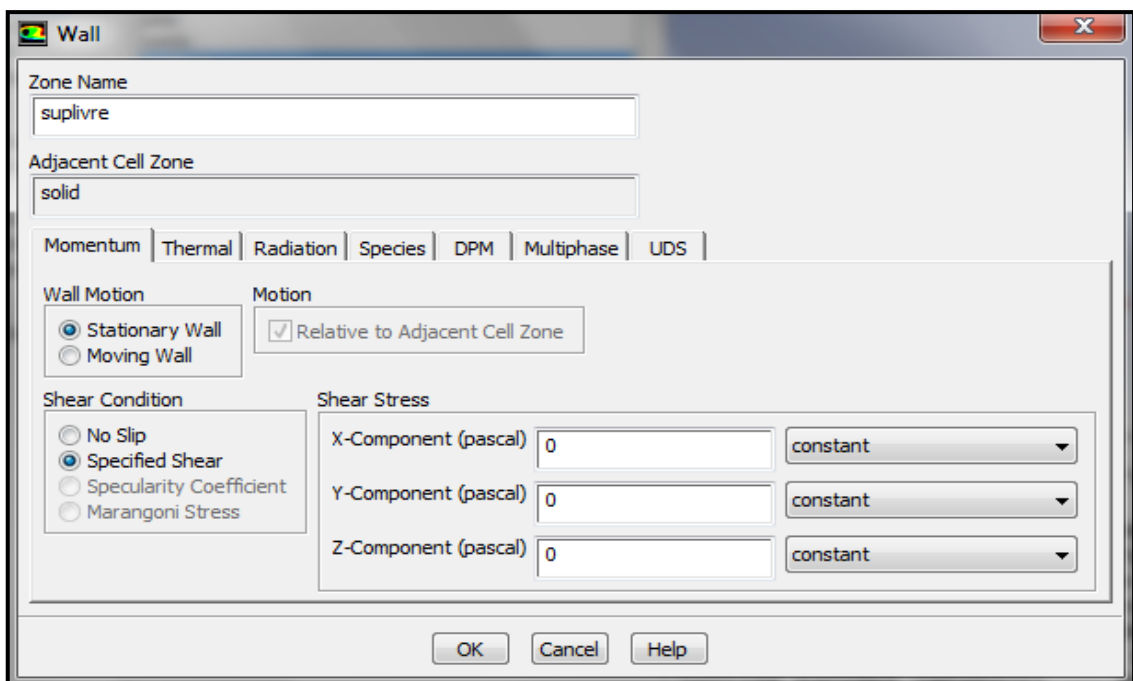


Figura 4.10 - Características da superfície livre

4.3.5 Selecção do método de solução

De acordo com Ramos (2012), o programa em causa apresenta alguns métodos de solução, modelos de separação e algumas variáveis que podem de algum modo afectar a convergência da simulação e o seu respectivo resultado. São três os mecanismos que o programa oferece para a melhoria da convergência da solução:

- SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*);
- SIMPLEC (*SIMPLE-Consistent*);
- PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*).

O SIMPLE é um algoritmo de iterações onde o campo de pressões é estimado para que seja possível a determinação das componentes da velocidade. A correcção da pressão é feita através da dedução das equações da quantidade de movimento e das equações de continuidade. Este passo é repetido continuamente, e só termina quando a solução converge.

O SIMPLEC atinge a convergência de um modo mais rápido que o SIMPLE. Este algoritmo difere do SIMPLE no modo de cálculo dos fluxos que atravessam uma face da malha. O problema comum de ambos é a limitação relacionada com a equação da quantidade de movimento.

O esquema PISO realiza dois cálculos adicionais relacionados com a correcção da pressão, onde considera a qualidade de cada elemento da malha de cálculo, ou seja, este esquema permite atingir a convergência com uma maior rapidez e eficiência, reduzindo o tempo de processamento da simulação. De seguida, apresenta-se na figura 4.11 um exemplo da janela de escolha do método de solução de uma simulação, onde, neste caso se optou pelo PISO. O valor de *Skewness Correction* adoptado é um, o valor padrão aconselhado pelo *Ansys Workbench User's Guide*, para este factor que permite a correcção da assimetria para malhas distorcidas. O valor de *Neighbor Correction* adoptado também é um, pois também este é o valor sugerido pelo *Ansys Workbench User's Guide* para a correcção da vizinhança dos elementos das malhas, para simulações onde o número de iterações é maior que zero.

Ainda na fase de processamento da simulação, é necessário analisar o controlo da solução. Deste modo, o guia de utilização do *Fluent* sugere que se utilize como critério de convergência, a garantia de que o valor total dos resíduos seja inferior a 1×10^{-6} . Deste modo, apresenta-se na figura 4.12 um exemplo de uma imagem dos resíduos resultantes do cálculo de uma simulação, onde as diferentes cores representam a continuidade em função dos respectivos eixos.

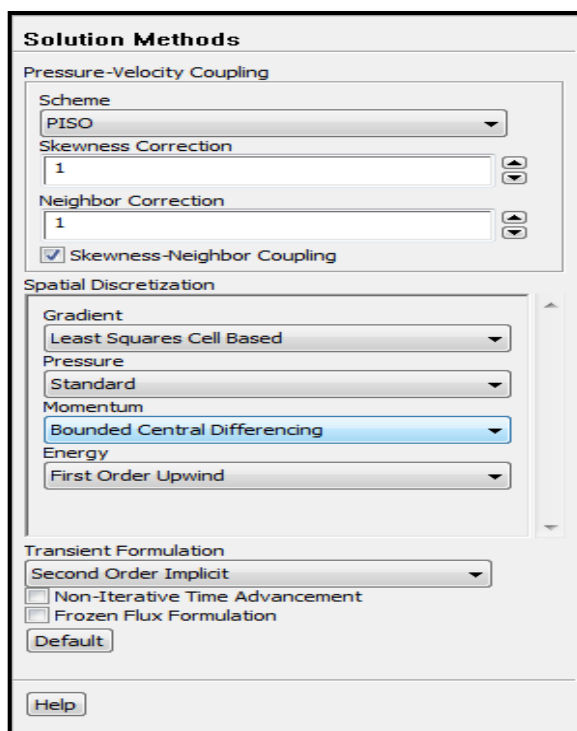


Figura 4.11 - Exemplo da escolha do modelo da solução

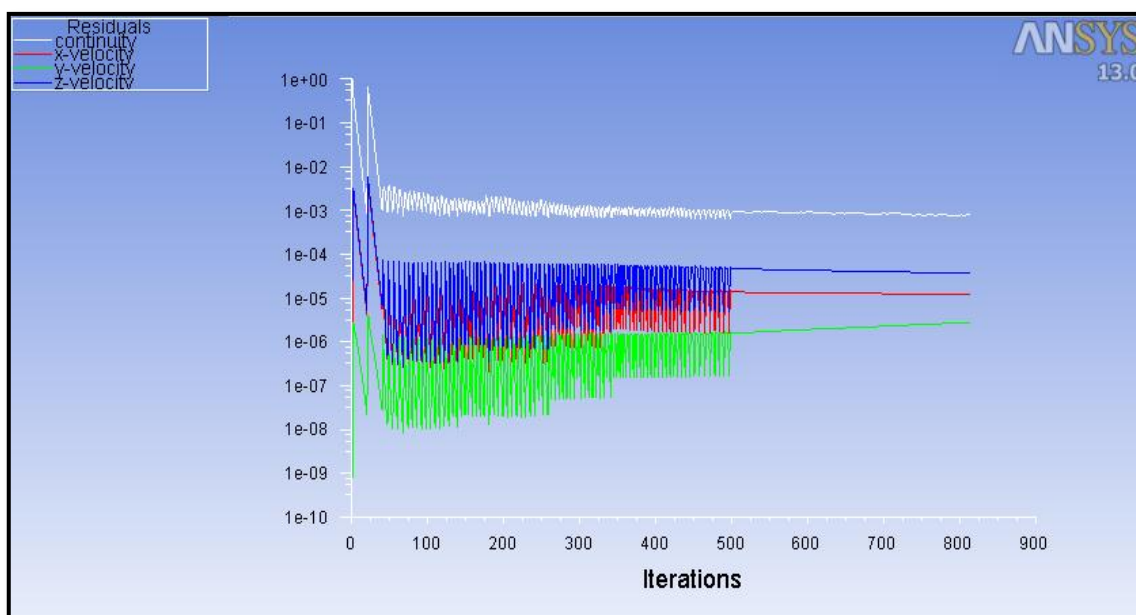


Figura 4.12 - Resíduos resultantes das iterações do processo de cálculo

4.3.6 Concretização do cálculo numérico

Na concretização do cálculo numérico são fornecidas ao programa informações relativas ao tempo e espaço.

Segundo Ramos (2012), o tempo de simulação depende do número de *Courant*, CFL, que relaciona a dimensão do intervalo de tempo da fracção de volume calculada e as características espaciais de cada célula do domínio do corpo, ou seja, o tempo de simulação depende deste parâmetro. Assim, o número de *Courant* pode ser definido por:

$$CFL = \frac{\Delta t}{x_{célula}/U} \quad (4.1)$$

Onde $x_{célula}$ representa a distância que um elemento do fluido percorre através de um volume de controlo a uma velocidade U e Δt representa o intervalo de tempo da fracção de volume calculada.

Nas simulações, o Δt , assume particular importância, pois quanto menor for, mais exacta será a solução da simulação. No entanto, um valor de *time step* bastante reduzido implicará um maior esforço e um conseqüente aumento do tempo de simulação, pelo que, este valor deverá ser adequado para ter uma boa exactidão de resultados, mas também não implicar um grande tempo de processamento. Deste modo, apresenta-se na figura 4.13 um exemplo do menu *Run Calculation*, onde todos estes parâmetros relacionados com a concretização do cálculo numérico são ilustrados.

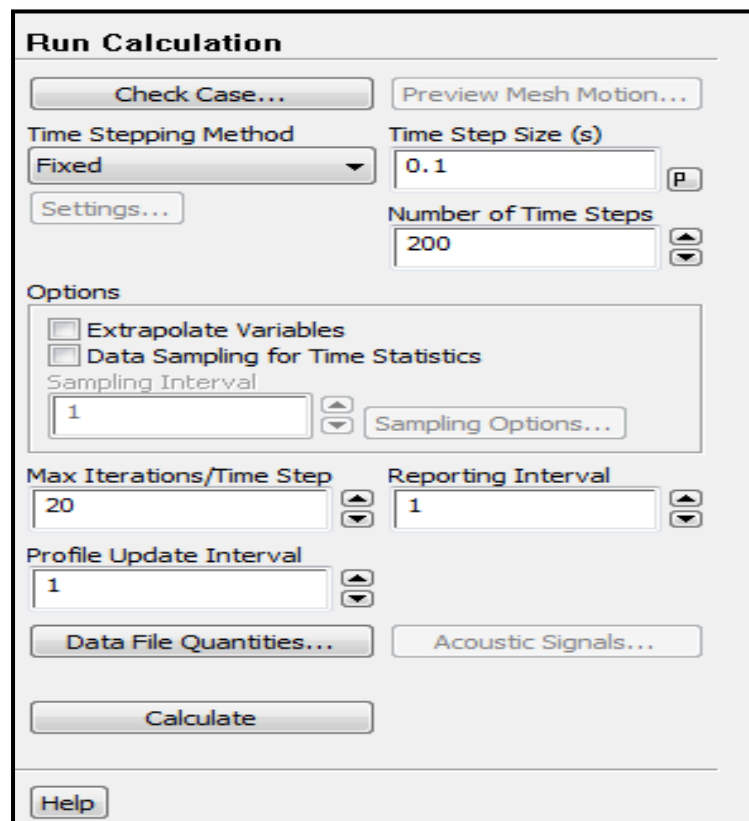


Figura 4.13 - Exemplo do menu *Run Calculation*

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados numéricos das simulações realizadas no *Ansys Workbench* para esta dissertação.

No primeiro subcapítulo são especificadas as características gerais comuns a todas as simulações, onde se destaca as dimensões da geometria, os dados relativos à qualidade das malhas em questão, a escolha dos materiais constituintes das simulações e respectivas condições de fronteira, a escolha do modelo de turbulência e a escolha do método de solução. Nos restantes subcapítulos são apresentados os resultados das simulações realizadas, através de *outputs* que o próprio programa fornece ao utilizador após a realização dos cálculos necessários. As imagens apresentadas das diversas simulações são relativas a vários parâmetros do escoamento, tais como a pressão ou velocidade, e que mostram a vasta possibilidade de pesquisa e análise que este programa oferece, porém, o valor que mais importa a este trabalho é a força de arrasto que actua no pilar de cada simulação. A grande diferença entre as simulações resulta da geometria do corpo simulado, mais concretamente na secção transversal de cada pilar, à excepção das três primeiras simulações, onde a única diferença que se observa é a variação dos elementos constituintes da malha, para que os resultados finais destas três primeiras simulações possam ser comparados e se adopte uma malha com um determinado número de elementos para as restantes simulações. As simulações cujas secções transversais dos pilares são circular e quadrada, foram realizadas tendo por objectivo validar a simulação numérica através deste programa, e neste sentido foram consideradas secções de pilares típicas, de modo a poder comparar os valores obtidos nas simulações com os valores fornecidos pela literatura apresentada no capítulo 2.

5.2 Características gerais das simulações

Nas simulações realizadas nesta dissertação, vários parâmetros constituintes das mesmas, são comuns a todas. Deste modo, este capítulo serve para apresentar as características das simulações que são transversais, e introduzir todos os factores que influenciam os resultados obtidos nos subcapítulos seguintes.

Em relação à geometria das simulações, esta é idêntica para todas as simulações, à excepção da secção transversal dos pilares. Assim sendo, a geometria dos escoamentos assemelha-se a um paralelepípedo, com 8,0 m de comprimento, 3,0 m de largura e 0,5 m de altura. Segundo Azevedo (2011) a definição das dimensões da geometria do escoamento, ou seja, o domínio de cálculo, deve ser próxima dos valores genéricos apresentados na figura 5.1.

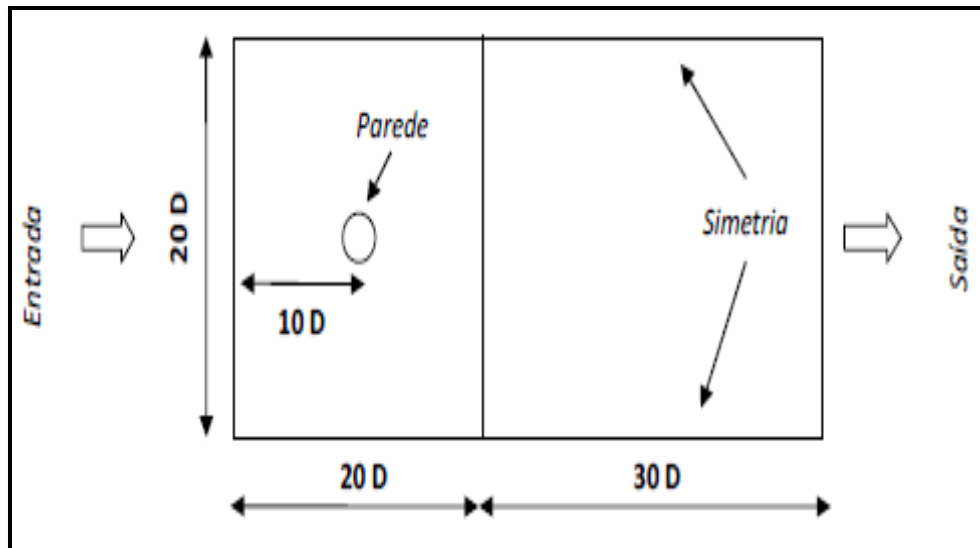


Figura 5.1 - Sugestão das dimensões do domínio de cálculo, extraído de Azevedo (2011)

Deste modo, para todas as simulações realizadas, os parâmetros do domínio de cálculo situam-se próximos dos parâmetros utilizados por Azevedo (2011), tal como pode ser observado através da figura 5.2:

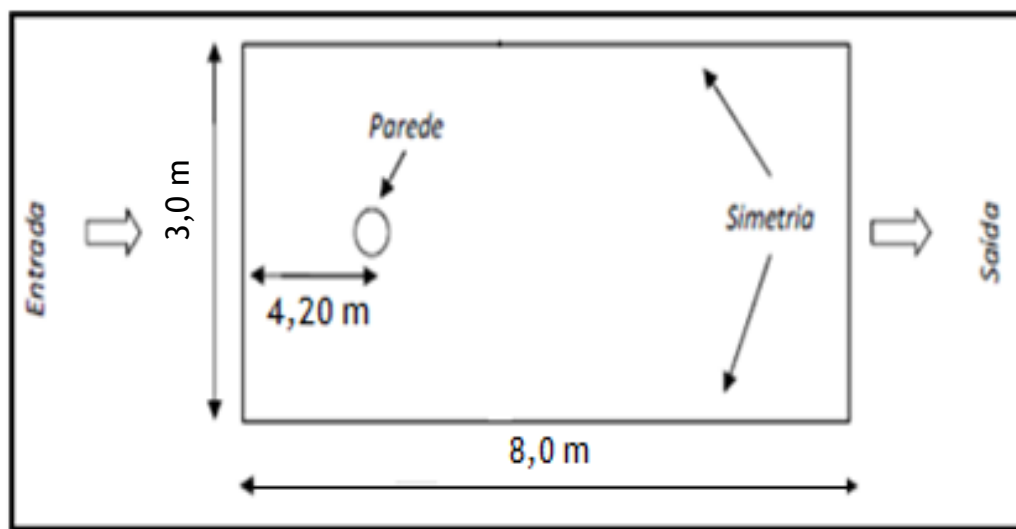


Figura 5.2 - Dimensões do domínio de cálculo

As dimensões das secções transversais dos pilares utilizadas nas simulações ao longo deste trabalho foram adoptadas de modo a que contribuam para a definição de um critério de dimensionamento que permita relacionar a dimensão da secção transversal dos pilares com a força de arrasto. Deste modo, na tabela 5.1, apresentam-se as diferentes secções transversais utilizadas nas simulações realizadas:

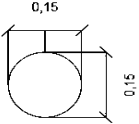
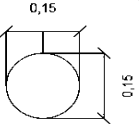
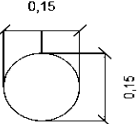
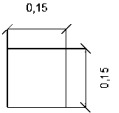
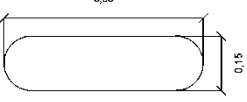
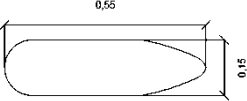
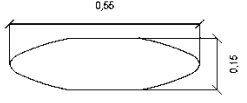
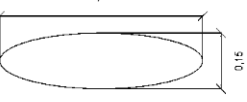
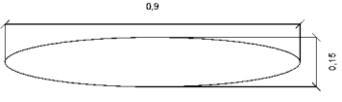
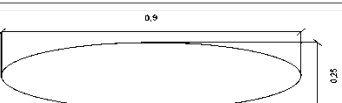
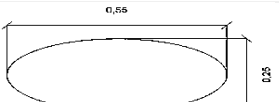
Simulação	Geometria da secção transversal	Largura [m]	Comprimento [m]
1-Circular		0,15	0,15
2-Circular		0,15	0,15
3-Circular		0,15	0,15
4-Quadrado		0,15	0,15
5-Oblongo		0,15	0,55
6-Lenticula-oblonga		0,15	0,55
7-Lenticula-oblonga		0,15	0,55
8-Lenticula		0,15	0,55
9-Lenticula		0,15	0,90
10-Lenticula		0,25	0,90
11-Lenticula		0,25	0,55

Tabela 5.1 - Geometria das secções transversais dos pilares simulados

Relativamente à concepção da malha de cada simulação, esta foi feita com base no processo apresentado no último capítulo. As três primeiras simulações são com domínios de cálculo idênticos, incluindo a secção transversal do pilar, e têm como objectivo a validação da malha a utilizar nas restantes simulações, ou seja, avaliar a sensibilidade da malha em relação aos resultados finais. A diferença entre estas simulações prende-se com o número de elementos constituintes da malha. Entre a simulação 1 e 2 o número de elementos da malha varia dez vezes mais, e relativamente à simulação 3, o objectivo era de que também apresentasse 10 vezes mais o número de elementos constituintes da malha em comparação à simulação que a sucede, no entanto, e como os resíduos de cálculo da simulação não convergiram, apresentase na simulação 3 os resultados com uma malha 5 vezes maior do que a malha utilizada na simulação 2. Deste procedimento resultam diferentes valores para os volumes dos elementos constituintes de cada malha, conforme pode ser observado na tabela 5.2.

Simulação	Volume do maior elemento [m ³]	Volume do menor elemento [m ³]	Volume total [m ³]
1-Circular 1	$1,64 \times 10^{-3}$	$4,17 \times 10^{-4}$	11,99
2-Circular 2	$2,05 \times 10^{-4}$	$7,86 \times 10^{-5}$	11,99
3-Circular 3	$1,95 \times 10^{-5}$	$4,54 \times 10^{-6}$	11,99
4-Quadrado	$1,7 \times 10^{-4}$	$3,23 \times 10^{-5}$	11,99
5-Oblongo	$2,18 \times 10^{-4}$	$1,02 \times 10^{-5}$	11,96
6-Lenticula-oblonga	$1,7 \times 10^{-4}$	$2,83 \times 10^{-5}$	11,96
7-Lenticula-oblonga	$1,54 \times 10^{-4}$	$2,97 \times 10^{-6}$	11,97
8-Lenticula	$1,71 \times 10^{-4}$	$2,63 \times 10^{-5}$	11,97
9-Lenticula	$1,63 \times 10^{-4}$	$2,77 \times 10^{-5}$	11,95
10-Lenticula	$1,63 \times 10^{-4}$	$2,65 \times 10^{-5}$	11,95
11-Lenticula	$1,57 \times 10^{-4}$	$2,57 \times 10^{-5}$	11,95

Tabela 5.2 - Volume dos elementos da malha de cada simulação

Por sua vez, os parâmetros relacionados com a simulação no *Fluent* são transversais a todas as simulações realizadas. Tendo por base o apresentado no capítulo anterior, pode-se afirmar que relativamente ao modelo de turbulência adoptado para todas as simulações, a escolha recaiu no modelo LES. Em relação aos materiais constituintes, e tal como foi abordado no último capítulo, os materiais inerentes a todas as simulações são a água (*water liquid*) como material de fluido, conforme foi apresentado na figura 4.8, e o PVC, Cloreto de Polivinila, como material sólido. A água tem como características definidas no programa a massa volúmica de $998,2 \text{ kg/m}^3$ e a viscosidade dinâmica de $1,003 \times 10^{-3}$. Este é definido com base na sua massa volúmica, onde se adoptou o valor de 1400 kg/m^3 , definindo assim um novo

material para a simulação. As condições de fronteira, são idênticas a todas as simulações e no presente estudo existem cinco tipos de fronteira: entrada, saída, superfície livre, superfície sólida e simetria. Nesta simulação, e tal como foi abordado no anterior capítulo, o escoamento em causa é em superfície livre, e as suas características, relativas à condição de fronteira, foram definidas tal como o apresentado na figura 4.10. Na secção de entrada, identificou-se esta condição de fronteira no código *Fluent* como *mass-flow-inlet*, uma zona onde se define o caudal que passa naquele espaço, neste caso de 240 l/s e percorre todo o comprimento do escoamento, e onde as pressões totais do escoamento não estão fixas e podem tomar os valores necessários para garantir a distribuição da velocidade imposta. Tendo em conta o valor do caudal inserido nas secções de entrada, é de esperar que o valor da velocidade das partículas do escoamento se situe em 0,16 m/s. Deste modo, e tendo em conta as dimensões do escoamento e utilizando a equação 2.1, pode-se afirmar que o número de Reynolds é de aproximadamente 24000, ou seja, um escoamento turbulento. Nos pilares em causa, definiu-se a condição fronteira de *wall*, parede, o que torna todas as componentes de velocidade nulas, transformando-se num obstáculo ao escoamento, ou seja, a parte essencial do escoamento. Na secção de saída do canal, utilizou-se a condição de saída livre, definida no código do *Fluent* como *outflow*, a partir do interior do domínio, sem ser necessário impor qualquer valor a qualquer variável. Relativamente ao fundo do escoamento esta fronteira foi definida como *wall*, à semelhança da definição da fronteira para o pilar, onde se assume que são fronteiras rígidas e cujas componentes da velocidade são nulas. Por sua vez, as condições de fronteira laterais, simetria, foram definidas como *symmetry*, uma condição de fronteira de simetria que força as variáveis do escoamento a serem imagens espelhadas em relação ao plano de simetria. A escolha desta condição de fronteira para as paredes laterais, teve como objectivo garantir a ausência de efeitos de parede no escoamento. Em relação ao método de solução escolhido para todas as simulações, o adoptado foi o PISO, devido às especificações abordadas no capítulo anterior. Por fim, referir que o escoamento nas simulações ocorre segundo o eixo Z.

Em suma, todas as características descritas neste subcapítulo, são transversais a todas as simulações realizadas neste trabalho, pelo que nas descrições dos subcapítulos seguintes apenas se aborda as características diferentes entre cada uma delas.

5.3 Simulação 1 - Secção transversal circular 1

Nesta simulação, foram simulados 20 segundos de escoamento que obrigou a cerca de 10 horas de processamento de dados. Esta simulação tem uma geometria do escoamento idêntica à descrita no subcapítulo anterior, com a diferença da secção do pilar, que é circular com 0,15 m de diâmetro, centrada na largura da peça e a 3,20 m da extremidade mais próxima, tal como se pode observar na figura 5.3.

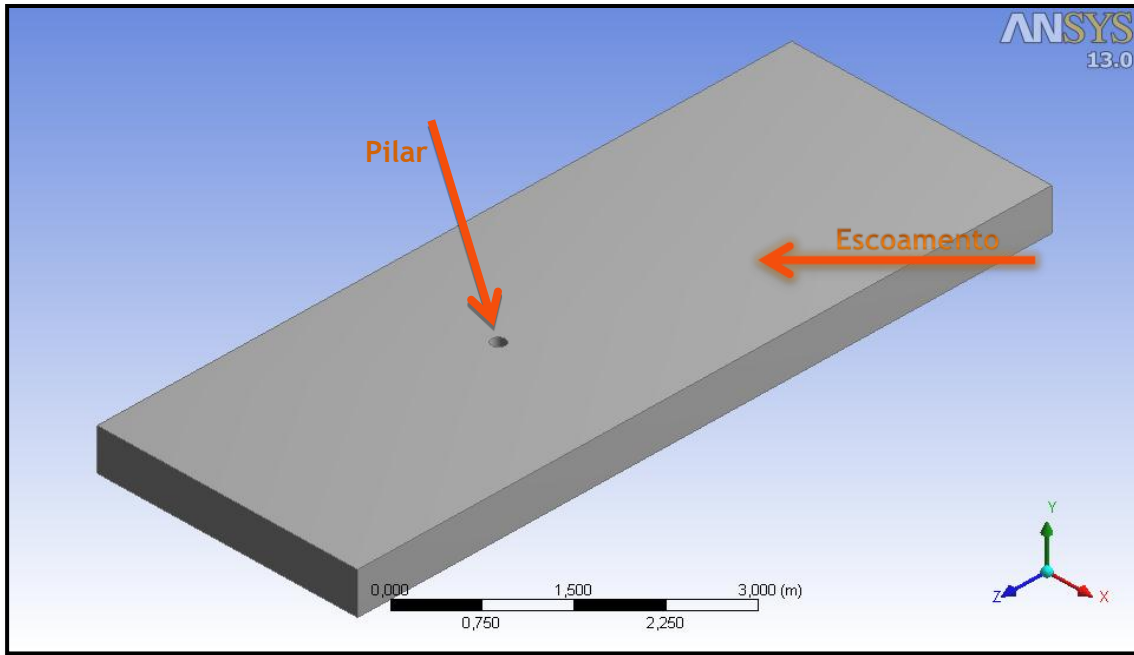


Figura 5.3 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 1

Após o *términus* do processamento, a primeira análise a realizar prende-se com a precisão desta simulação, e para isso, a consulta dos resíduos da simulação ao longo das iterações de cálculo, tal como foi abordado no capítulo anterior, é essencial. Deste modo, pode-se observar através da figura 5.4, que tal como o imposto no capítulo anterior, o valor dos resíduos das iterações de cálculo praticamente alcançam o valor imposto anteriormente.

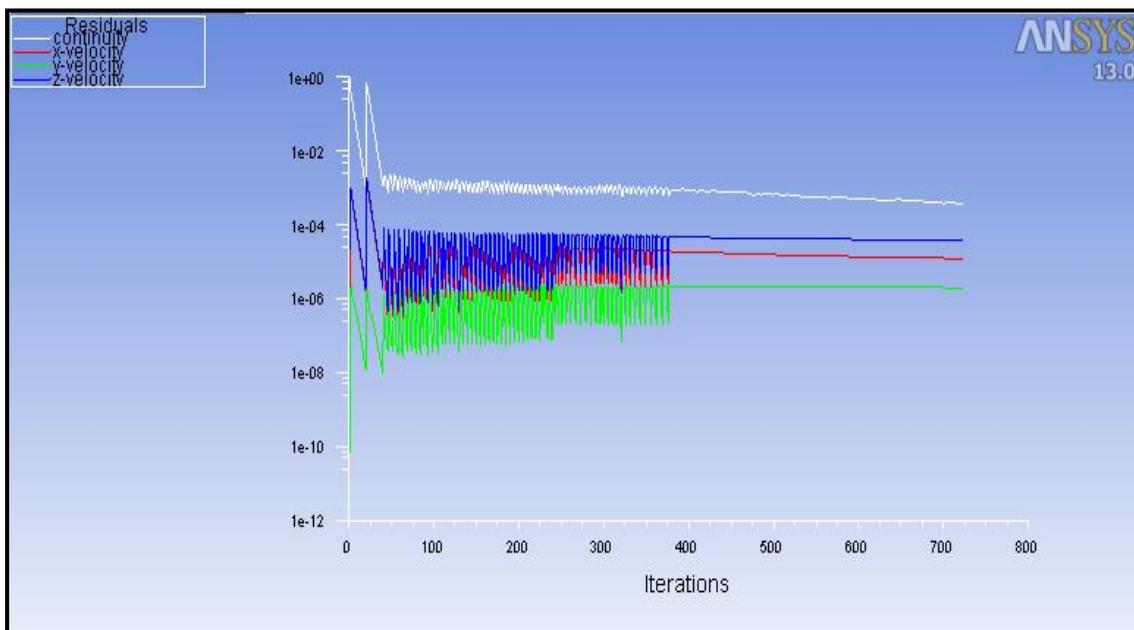


Figura 5.4 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 1

Num escoamento onde existe a presença de um obstáculo, as perturbações a esse escoamento são visíveis através da análise do seu campo de velocidades, como se pode verificar através da figura 5.5.

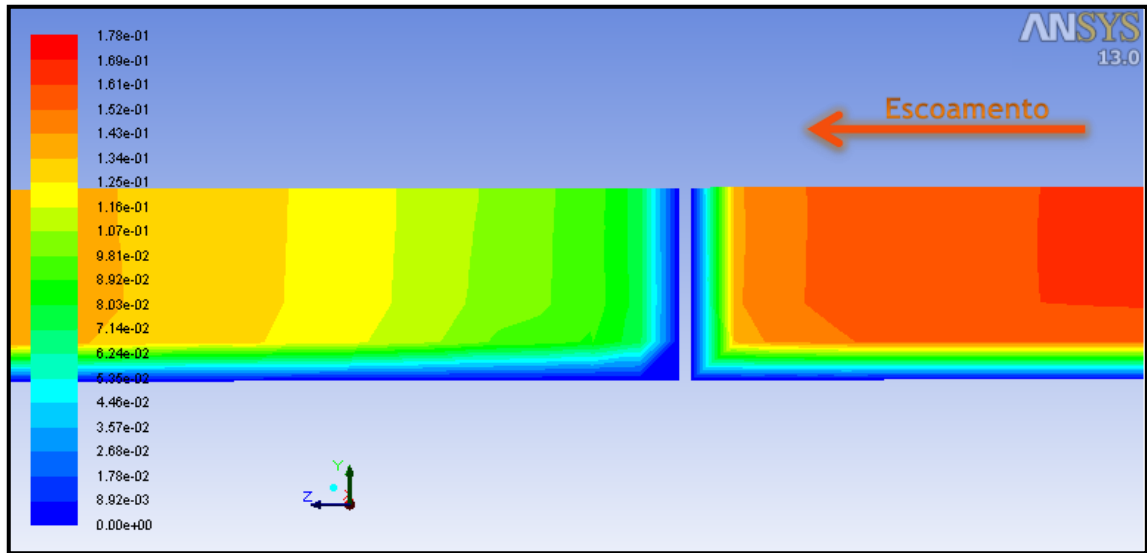


Figura 5.5 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 1

A introdução de um obstáculo no escoamento faz com que a velocidade das suas partículas se altere, como mostra a seguinte figura. No entanto o valor com maior percentagem é de 0,16 m/s, tal como foi abordado no subcapítulo 5.2.

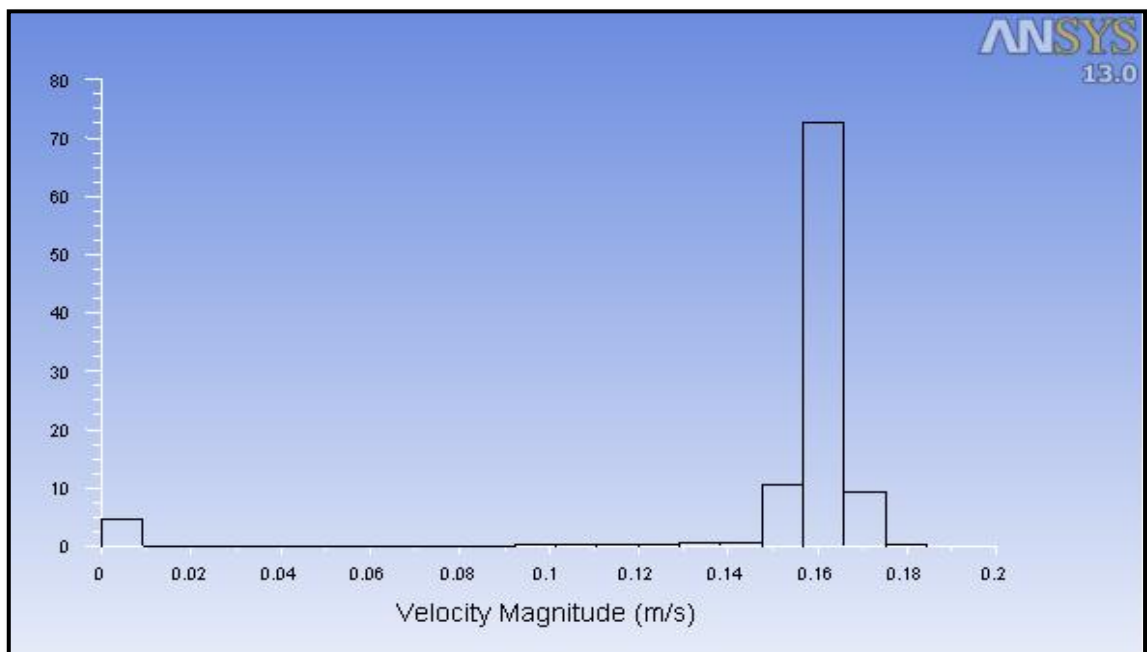


Figura 5.6 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação 1

O *Fluent* permite ter uma perspectiva geral, neste caso através da vista isométrica, da velocidade do escoamento, tal como se pode verificar na figura 5.7.

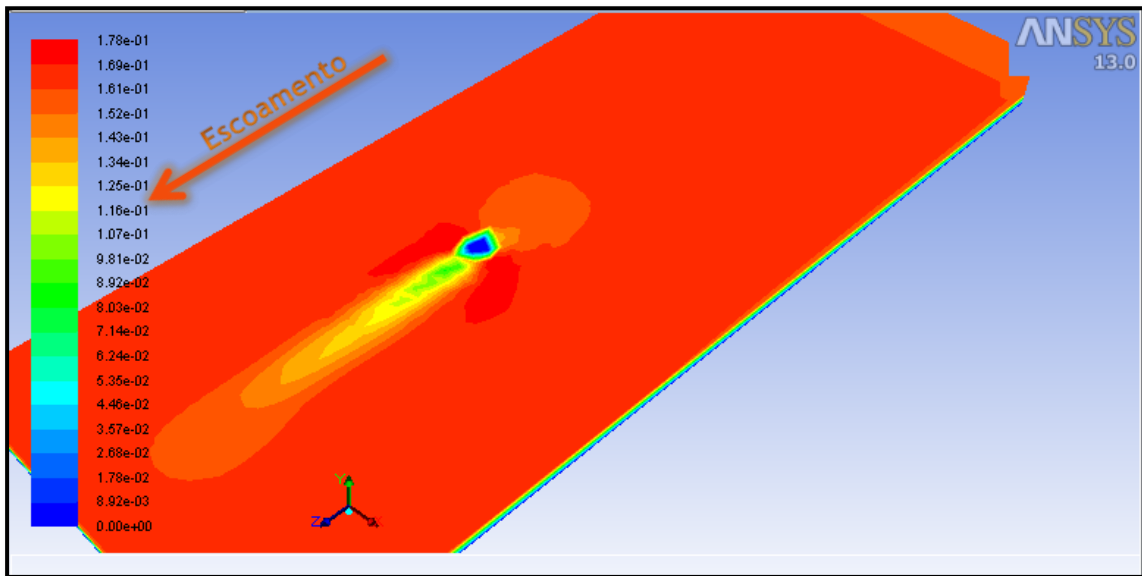


Figura 5.7 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 1

Relativamente às pressões do escoamento o *software* utilizado nas simulações permite, tal como nas velocidades, observar como variam as pressões no escoamento. Deste modo, é possível observar a pressão total e até as pressões estáticas e dinâmicas. A figura 5.8 mostra a variação da pressão total do escoamento na vista de planta.

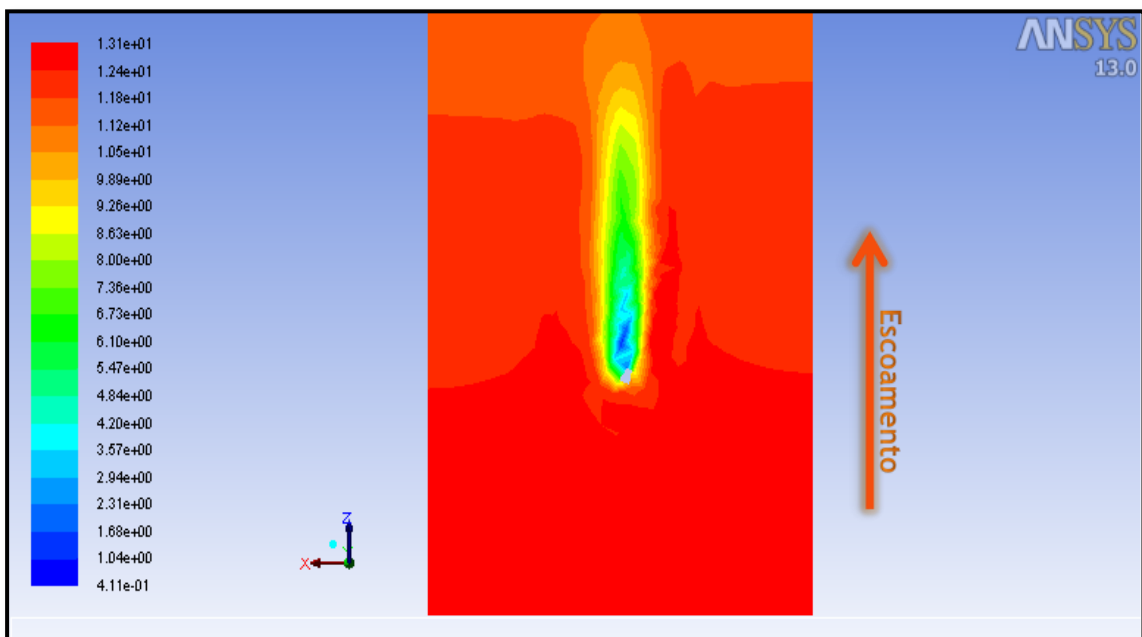


Figura 5.8 - Pressão total - Vista planta - simulação 1

Através da figura 5.9 e 5.10 é possível observar a variação da pressão dinâmica e da pressão estática ao longo do eixo de simetria do escoamento.

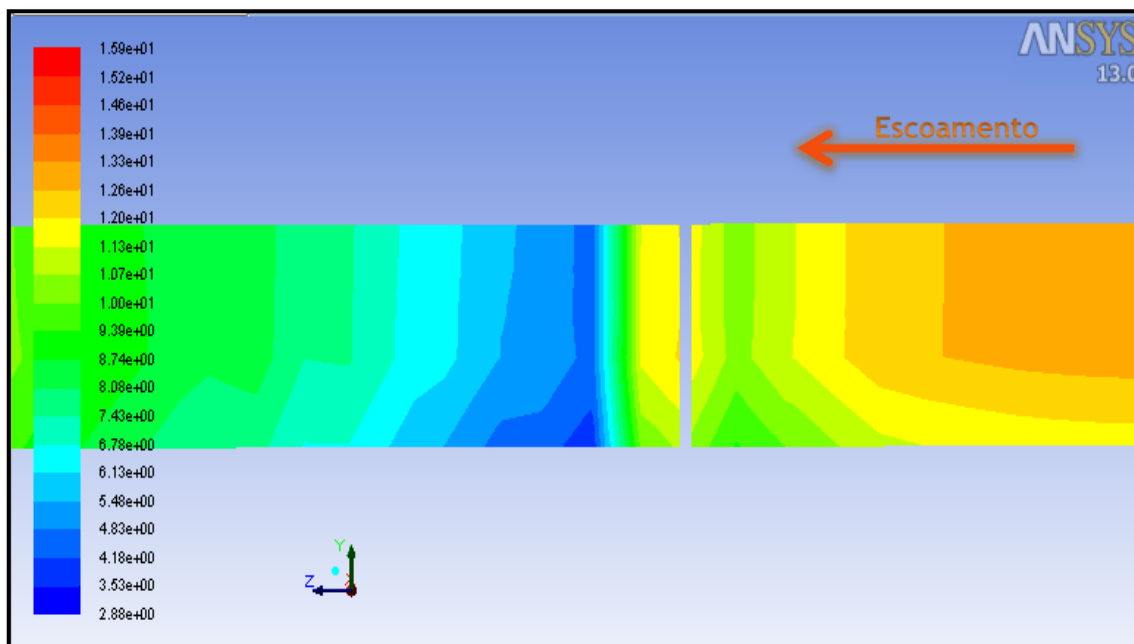


Figura 5.9 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 1

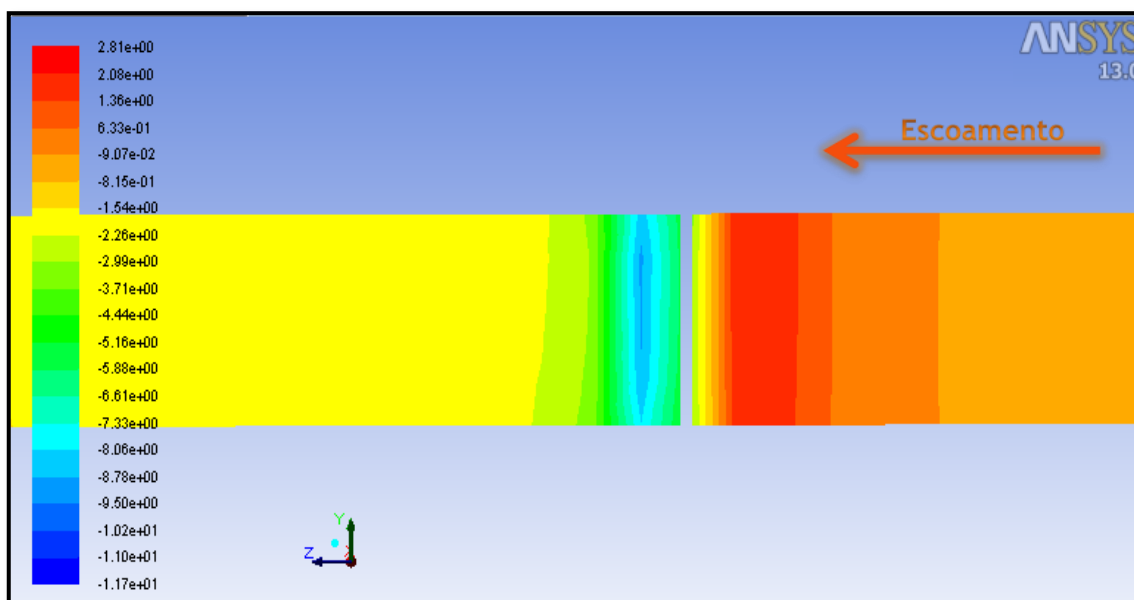


Figura 5.10 - Pressão Estática - eixo de simetria - simulação 1

Na figura 5.11 pode verificar-se a impulsão hidrodinâmica no pilar. Esta impulsão permite observar as pressões existentes no pilar, e obter a força de arrasto.

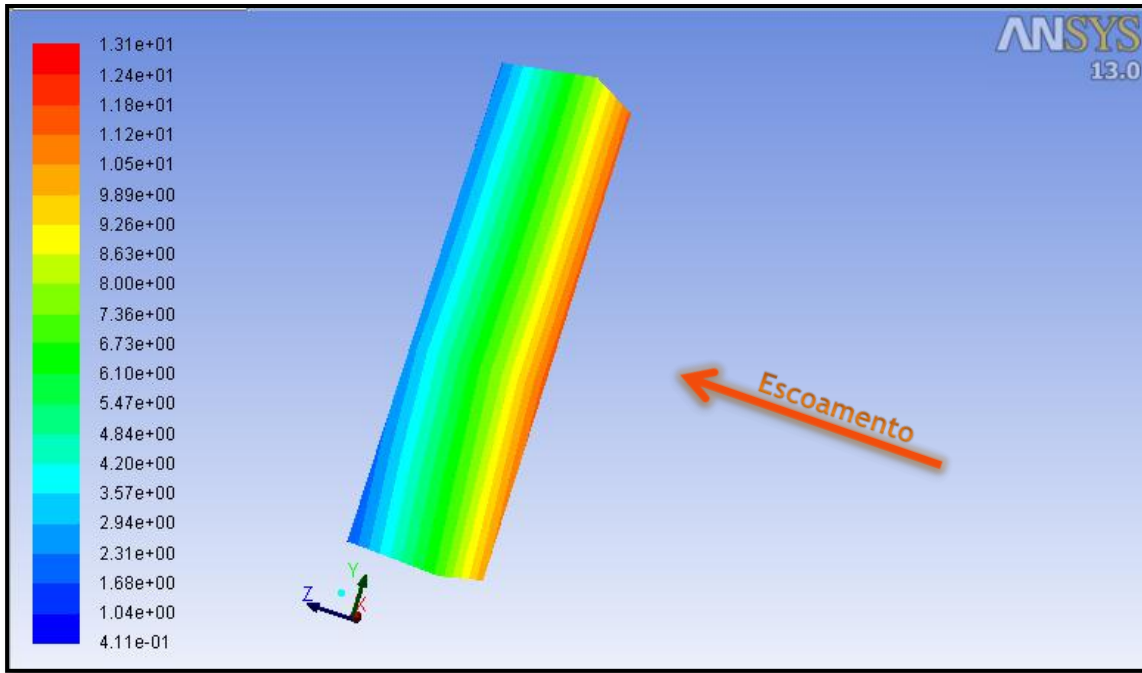


Figura 5.11 - Pressão total no pilar - simulação 1

Os valores obtidos na simulação são os apresentados na figura 5.12, onde se pode verificar que a força de arrasto é de 1,05 N.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Force (n)	Viscous	Total
pilar	1.0456587	0.0059865852	1.0516453

Net	1.0456587	0.0059865852	1.0516453

Figura 5.12 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 1

O valor da mesma grandeza em termos teóricos, e recorrendo à tabela 2.2, vem dado por:

$$\frac{L}{D} = \frac{0,5}{0,15} = 3,333 \Leftrightarrow C_D = 0,72$$

$$0,72 = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \times 1000 \times 0,16^2 \times (0,5 \times 0,15)} \Leftrightarrow F_D = 0,6912 \text{ N}$$

Em sùmula, a força de arrasto que a simulação apresenta é de 1,05 N, o que difere do cálculo da força de arrasto teórica que se situou em 0,69 N. O desvio verificado entre estes dois valores é de 34%.

5.4 Simulação 2 - Secção transversal circular 2

Nesta simulação, foram simulados 20 segundos de escoamento que obrigou a cerca de 20 horas de processamento de dados. Esta simulação tem uma geometria do escoamento idêntica à descrita no subcapítulo anterior, incluindo a secção do pilar, que é circular com 0,15 m de diâmetro, centrada na largura da peça e a 3,20 m da extremidade mais próxima, tal como se pode observar na figura 5.13.

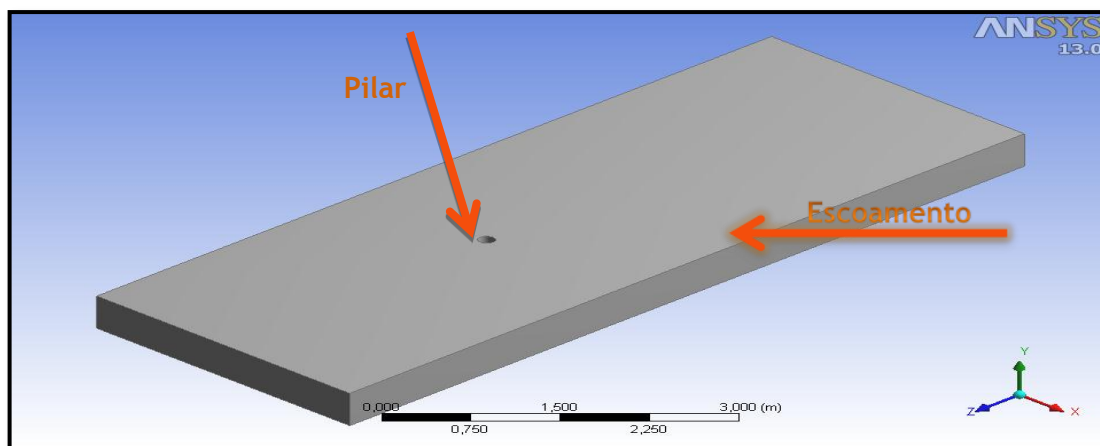


Figura 5.13 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 2

Após o *términus* do processamento, a primeira análise a realizar prende-se com a precisão desta simulação, e para isso, a consulta dos resíduos da simulação ao longo das iterações de cálculo, tal como foi abordado no capítulo anterior, é essencial. Deste modo, pode-se observar através da figura 5.14, que tal como o imposto no capítulo anterior, o valor dos resíduos das iterações de cálculo praticamente alcançam o valor imposto anteriormente.

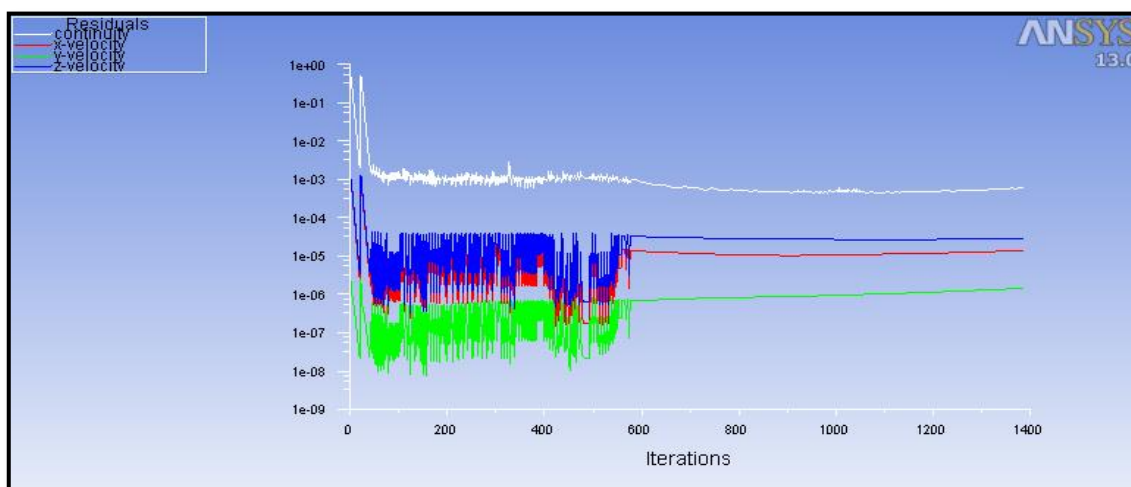


Figura 5.14 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 2

Num escoamento onde existe a presença de um obstáculo, as perturbações a esse escoamento são visíveis através da análise do seu campo de velocidades, como se pode verificar através da figura 5.15.

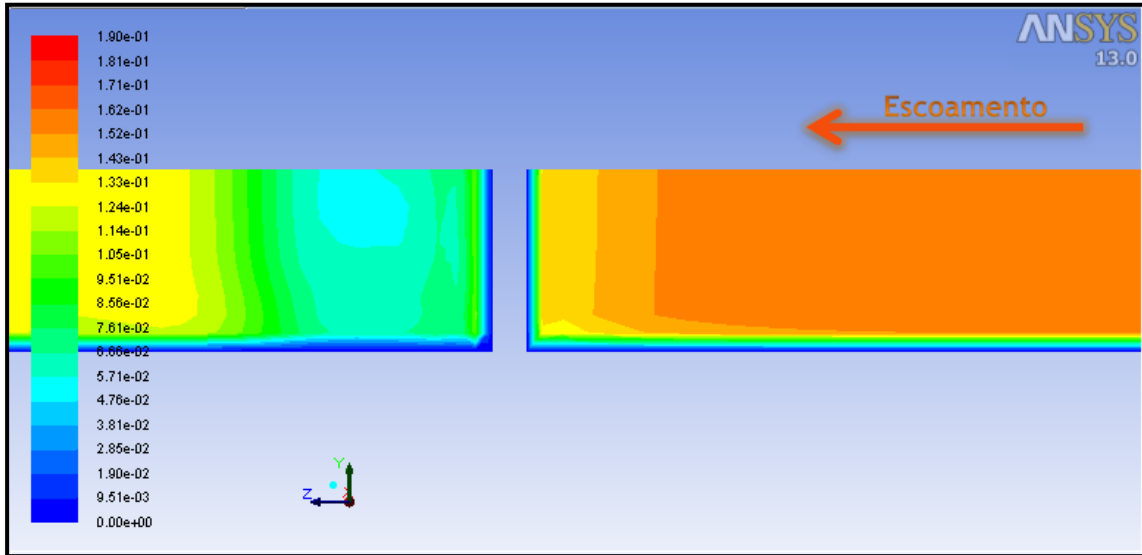


Figura 5.15 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 2

A introdução de um obstáculo no escoamento faz com que a velocidade das suas partículas se altere, como mostra a seguinte figura. No entanto o valor com maior percentagem é de 0,16 m/s, tal como foi abordado no subcapítulo 5.2.

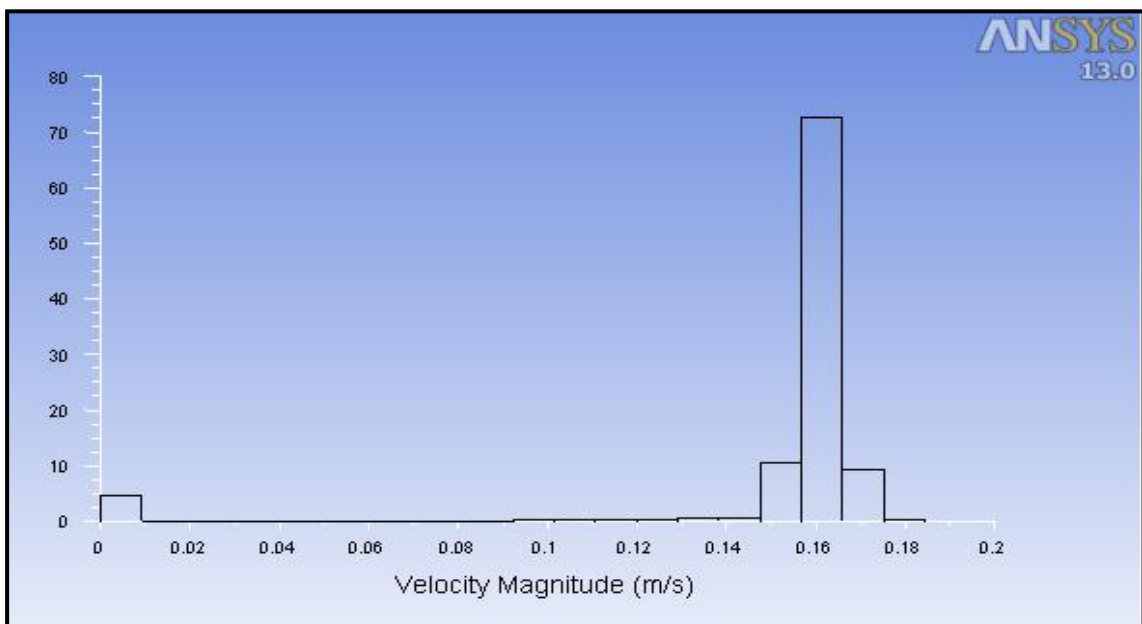


Figura 5.16 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação

O *Fluent* permite ter uma perspectiva geral, neste caso através da vista isométrica, da velocidade do escoamento, tal como se pode verificar na figura 5.17.

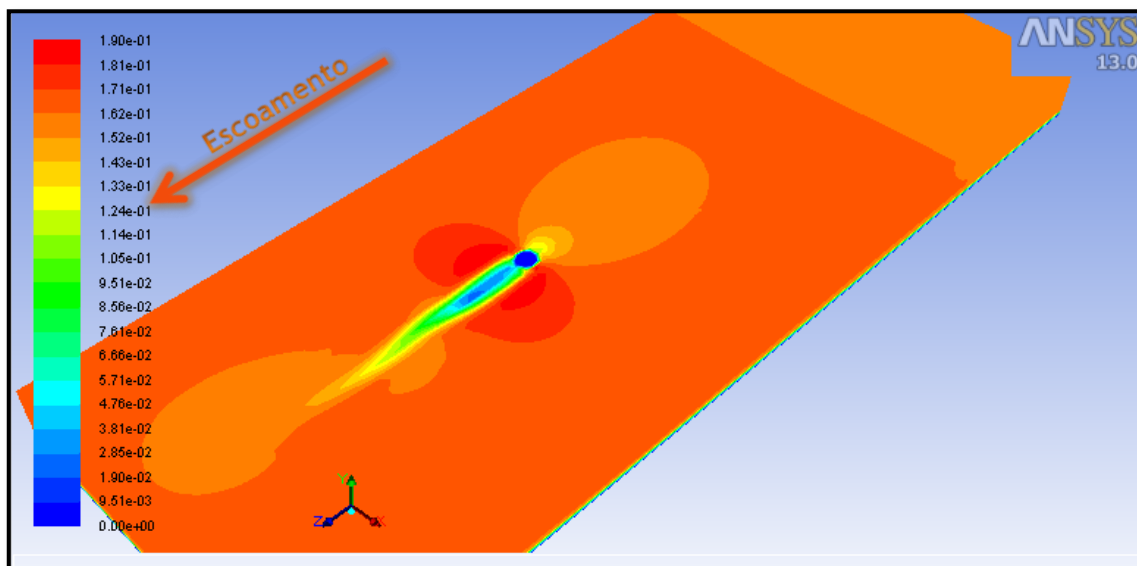


Figura 5.17 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 2

Relativamente às pressões do escoamento o *software* utilizado nas simulações permite, tal como nas velocidades, observar como variam as pressões no escoamento. Deste modo, é possível observar a pressão total e até as pressões estáticas e dinâmicas. A figura 5.18 mostra a variação da pressão total do escoamento na vista de planta.

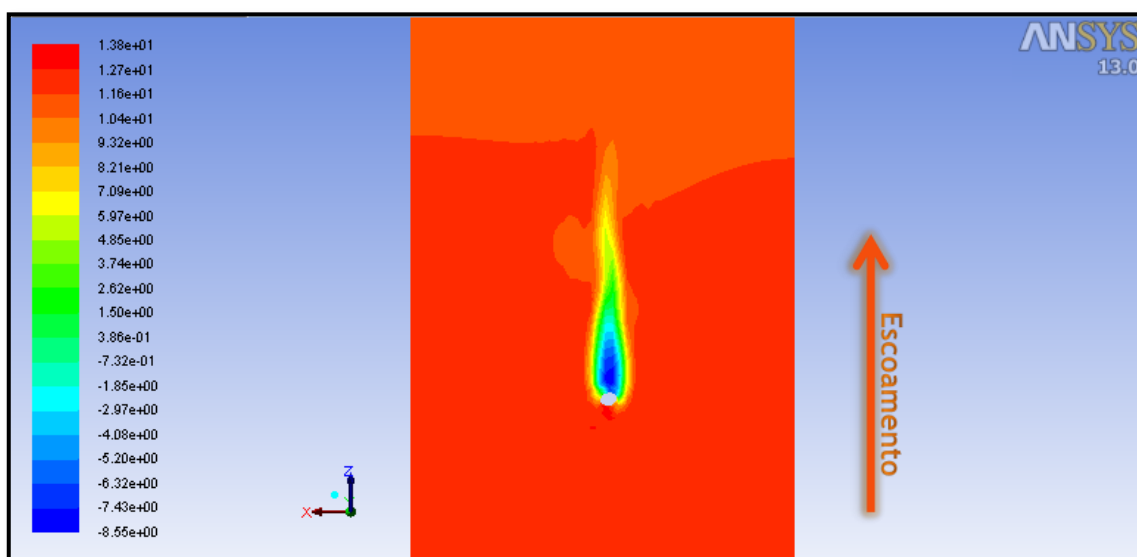


Figura 5.18 - Pressão total - Vista planta - simulação 2

Através da figura 5.19 e 5.20 é possível observar a variação da pressão dinâmica e da pressão estática ao longo do eixo de simetria do escoamento.

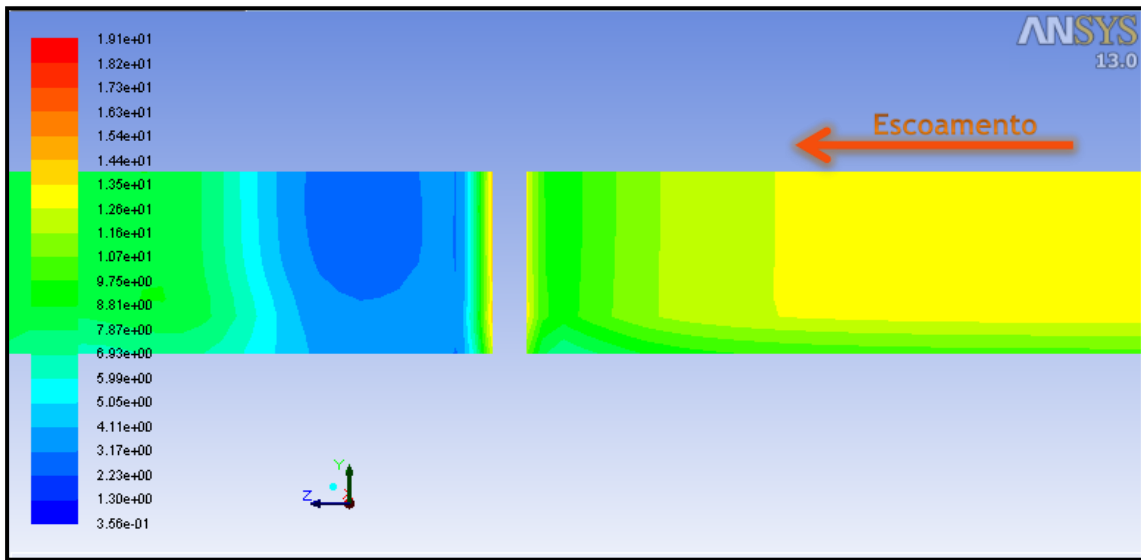


Figura 5.19 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 2

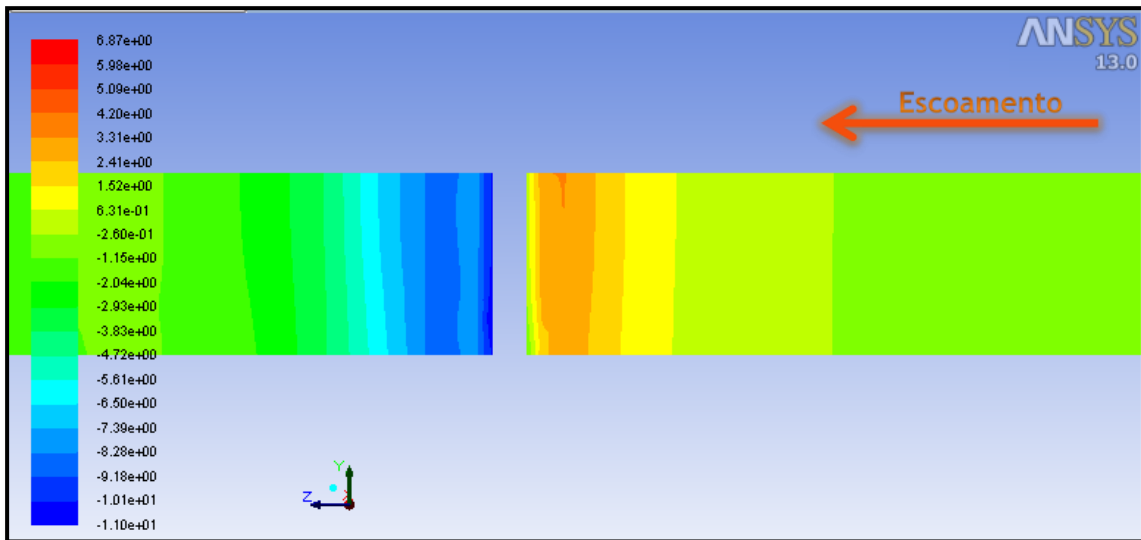


Figura 5.20 - Pressão Estática - eixo de simetria - simulação 2

Na figura 5.21 pode verificar-se a impulsão hidrodinâmica no pilar. Esta impulsão permite observar as pressões existentes no pilar, e obter a força de arrasto.

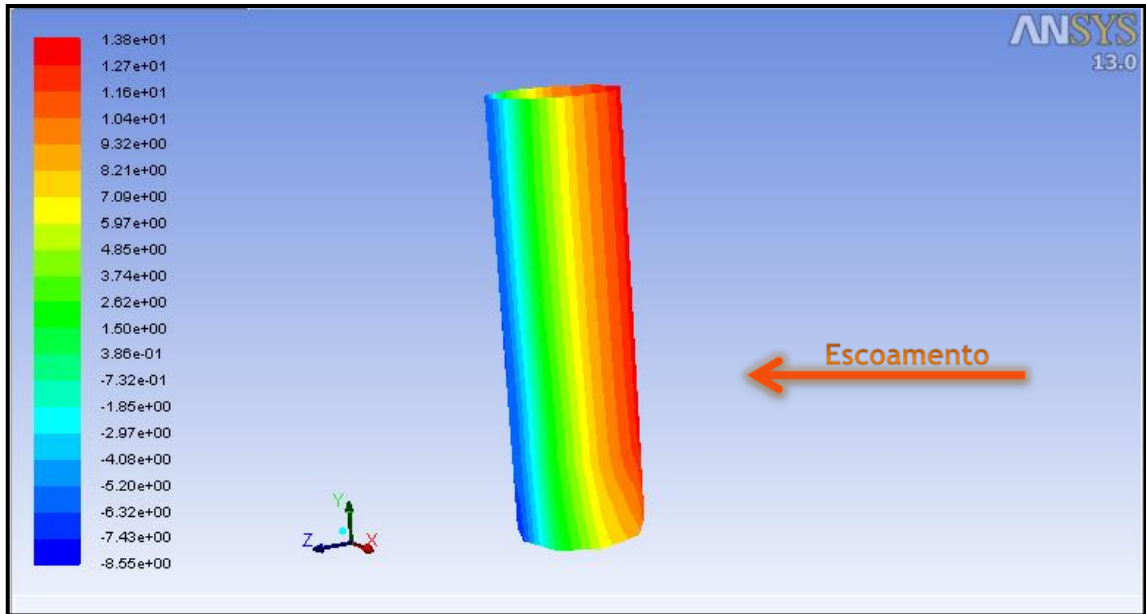


Figura 5.21 - Pressão total no pilar - simulação 2

Os valores obtidos na simulação são os apresentados na figura 5.22, onde se pode verificar que a força de arrasto é de aproximadamente 1,0 N.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
pilar	0.98682086	0.0084472888	0.99526815
Net	0.98682086	0.0084472888	0.99526815

Figura 5.22 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 2

O valor da mesma grandeza em termos teóricos, e recorrendo à tabela 2.2, vem dado por:

$$\frac{L}{D} = \frac{0,5}{0,15} = 3,333 \Leftrightarrow C_D = 0,72$$

$$0,72 = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \times 1000 \times 0,16^2 \times (0,5 \times 0,15)} \Leftrightarrow F_D = 0,6912 \text{ N}$$

Em sùmula, a força de arrasto que a simulação apresenta é de 0,85 N, o que difere do cálculo da força de arrasto teórica que se situou em 0,69 N. O desvio verificado entre estes dois valores é de 31%.

5.5 Simulação 3 - Secção transversal circular 3

Nesta simulação, foram simulados 20 segundos de escoamento que obrigou a cerca de 30 horas de processamento de dados. Esta simulação tem uma geometria do escoamento idêntica à descrita no subcapítulo anterior, com a secção do pilar circular, com 0,15 m de diâmetro, centrada na largura da peça e a 3,20 m da extremidade mais próxima, tal como se pode observar na figura 5.23.

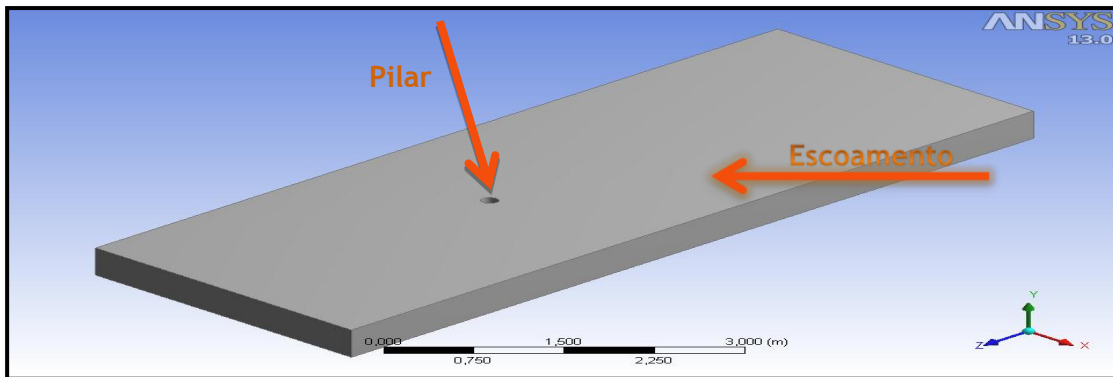


Figura 5.23 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 3

Após o *términus* do processamento, a primeira análise a realizar prende-se com a precisão desta simulação, e para isso, a consulta dos resíduos da simulação ao longo das iterações de cálculo, tal como foi abordado no capítulo anterior, é essencial. Deste modo, pode-se observar através da figura 5.24, que tal como o imposto no capítulo anterior, o valor dos resíduos das iterações de cálculo praticamente alcançam o valor imposto anteriormente. Apesar de na imagem dos resíduos a convergência não estar perceptível, o próprio programa no relatório que cria durante o processo de cálculo, indica que a solução convergiu, pelo que os resultados são seguros.

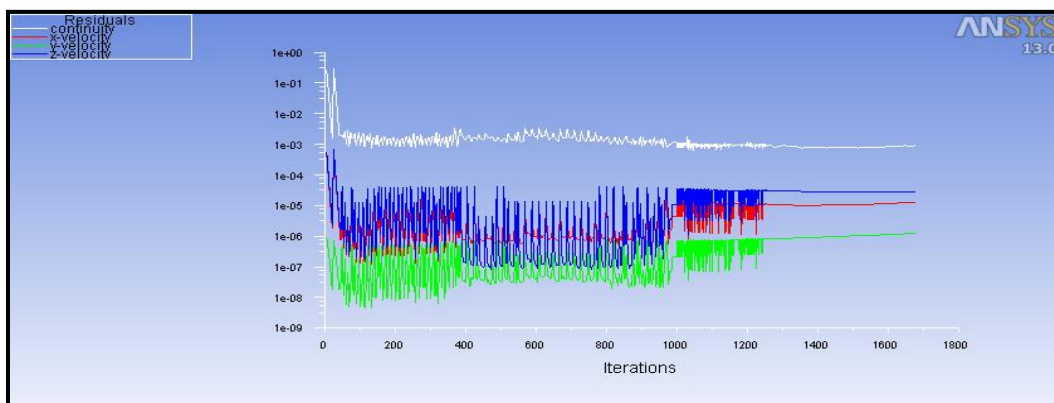


Figura 5.24 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 3

Num escoamento onde existe a presença de um obstáculo, as perturbações a esse escoamento são visíveis através da análise do seu campo de velocidades, como se pode verificar através da figura 5.25.

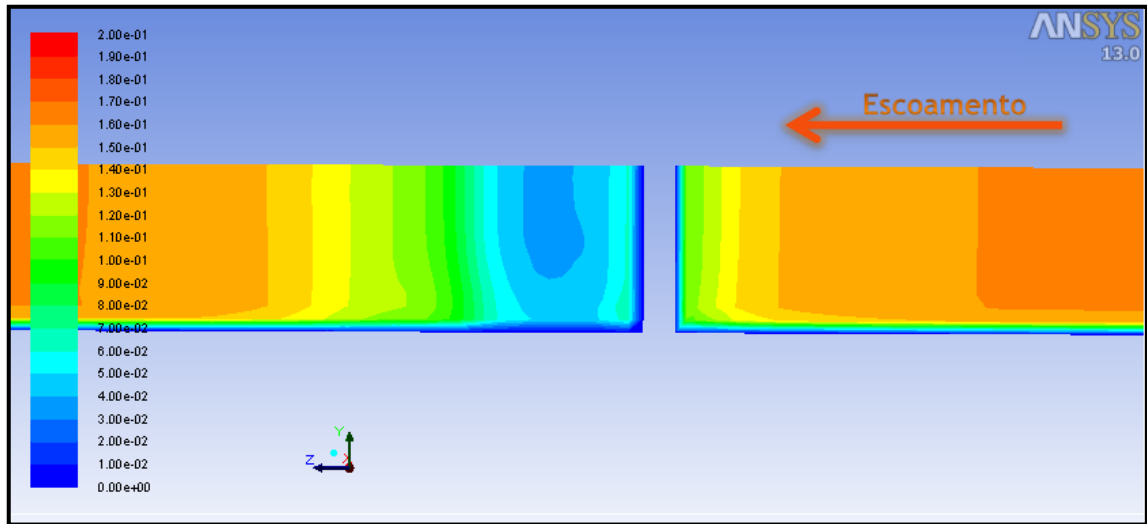


Figura 5.25 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 3

A introdução de um obstáculo no escoamento faz com que a velocidade das suas partículas se altere, como mostra a seguinte figura. No entanto o valor com maior percentagem é de 0,16 m/s, tal como foi abordado no subcapítulo 5.2.

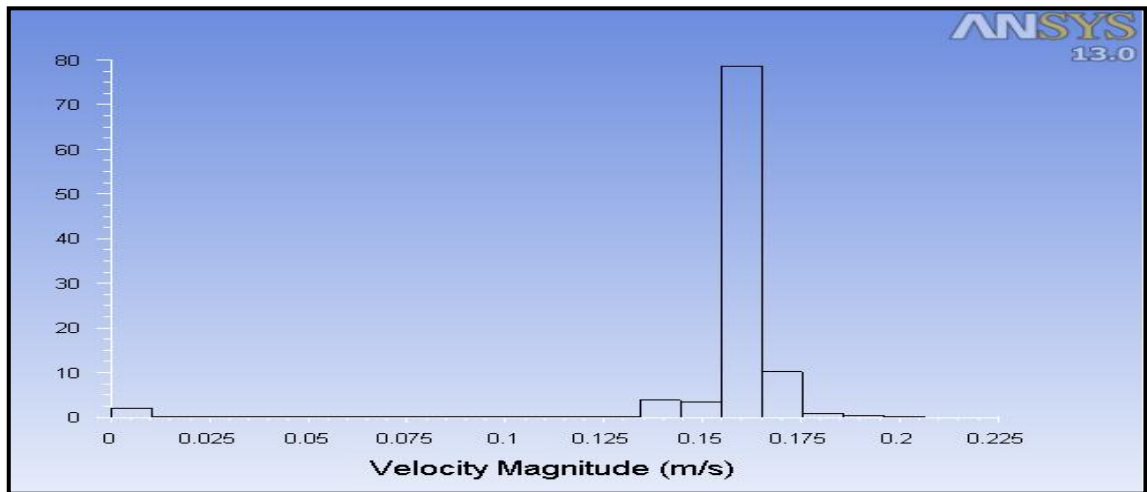


Figura 5.26 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação

3

O *Fluent* permite ter uma perspectiva geral, neste caso através da vista isométrica, da velocidade do escoamento, tal como se pode verificar na figura 5.27.

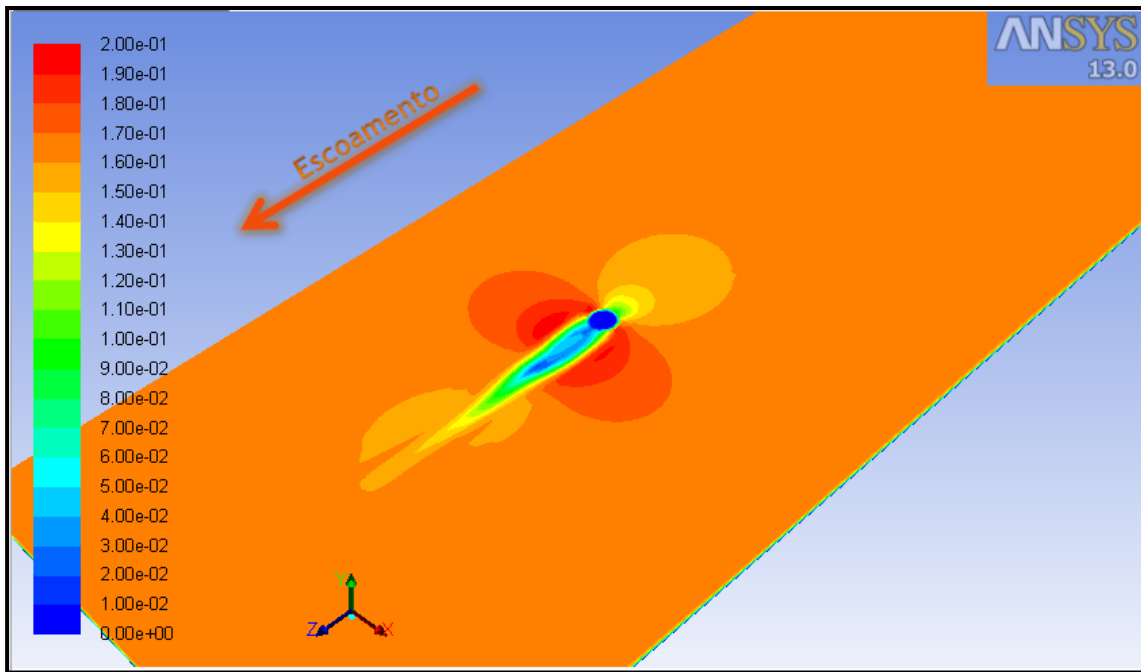


Figura 5.27 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 3

Relativamente às pressões do escoamento o *software* utilizado nas simulações permite, tal como nas velocidades, observar como variam as pressões no escoamento. Deste modo, é possível observar a pressão total e até as pressões estáticas e dinâmicas. A figura 5.28 mostra a variação da pressão total do escoamento na vista de planta.

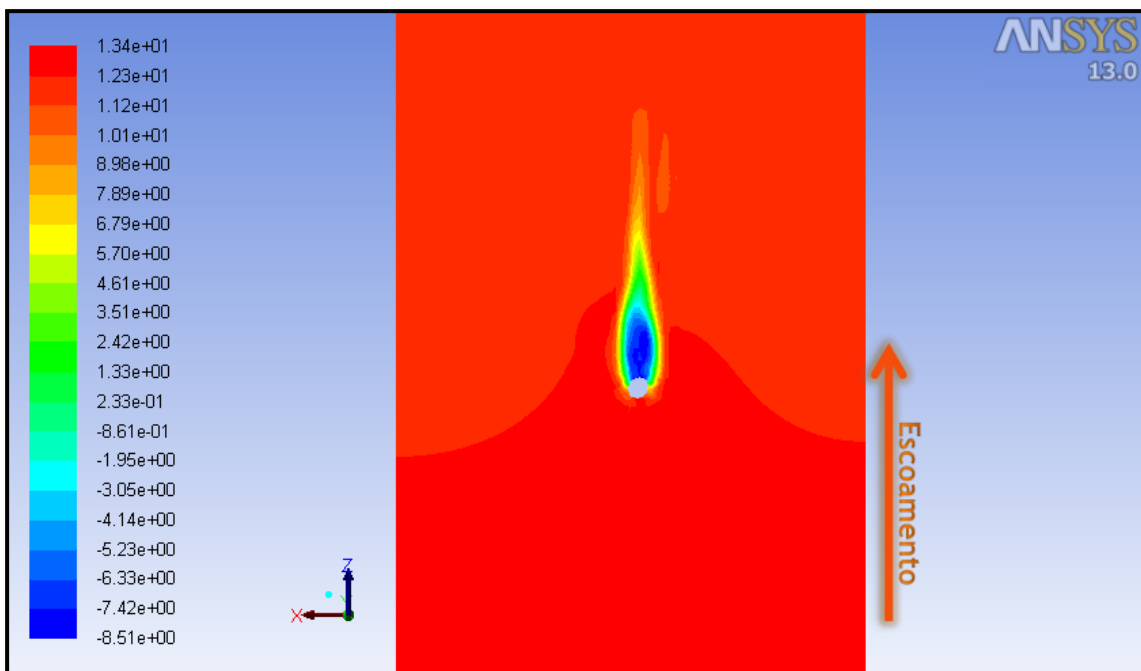


Figura 5.28 - Pressão total - Vista planta - simulação 3

Através da figura 5.29 e 5.30 é possível observar a variação da pressão dinâmica e da pressão estática ao longo do eixo de simetria do escoamento.

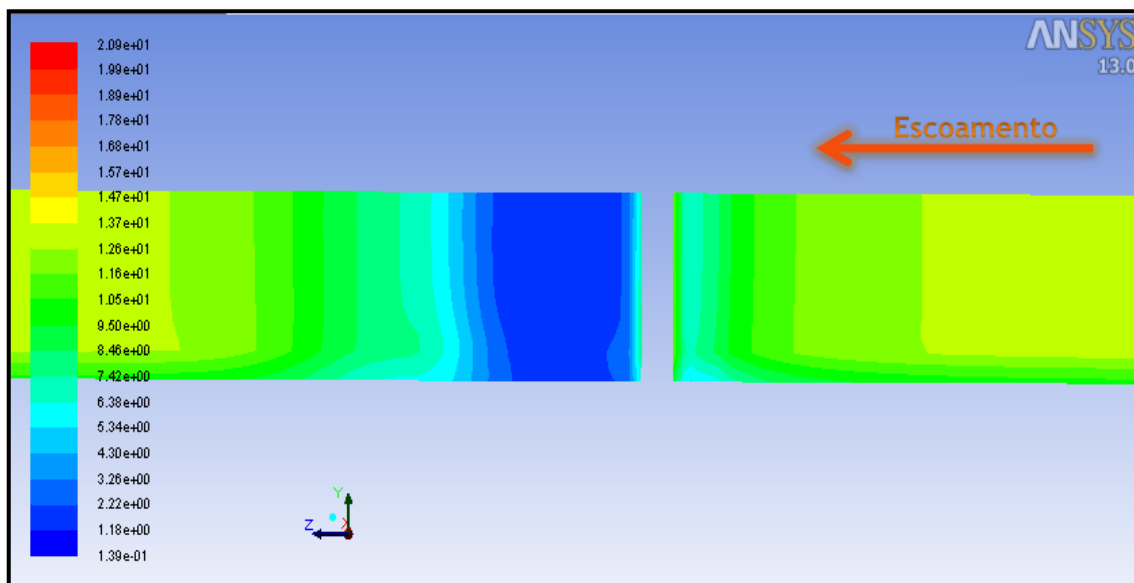


Figura 5.29 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 3

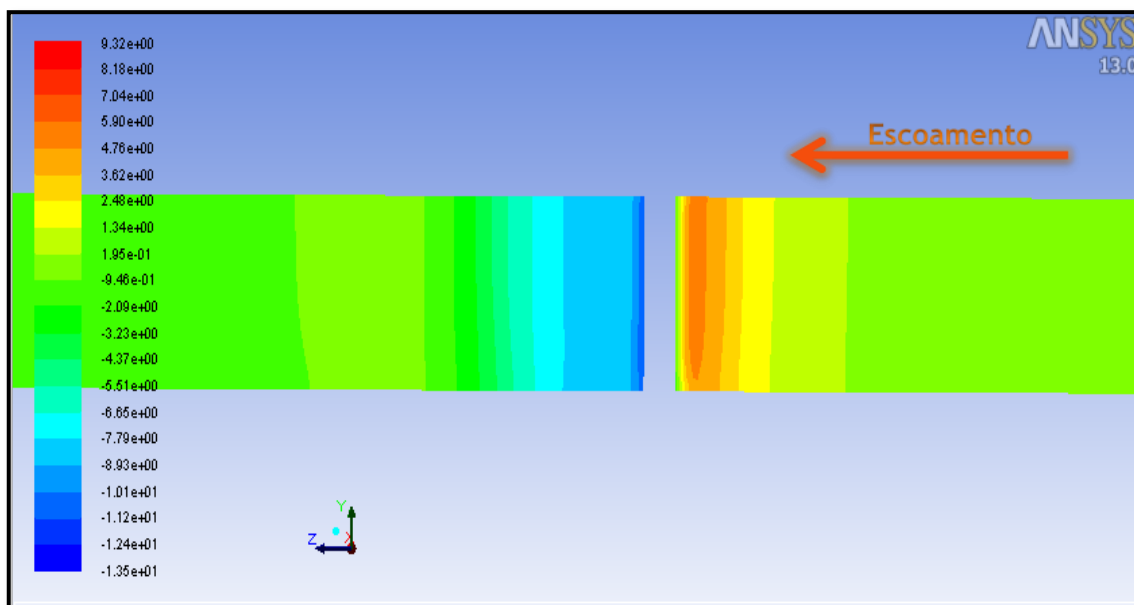


Figura 5.30 - Pressão Estática - eixo de simetria - simulação 3

Na figura 5.31 pode verificar-se a impulsão hidrodinâmica no pilar. Esta impulsão permite observar as pressões existentes no pilar, e obter a força de arrasto.

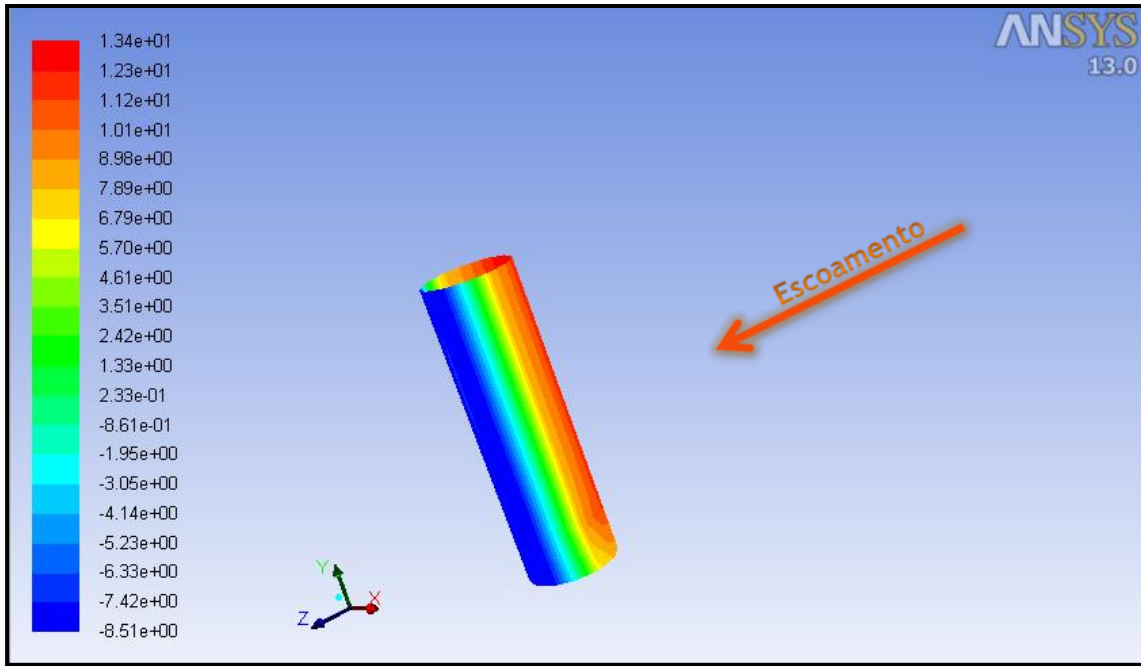


Figura 5.31 - Pressão total no pilar - simulação 3

Os valores obtidos na simulação são os apresentados na figura 5.32, onde se pode verificar que a força de arrasto é de aproximadamente 1,05 N.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Forces (n)		
pilar	Pressure	Viscous	Total
	1.102641	0.011385047	1.1140261

Net	1.102641	0.011385047	1.1140261

Figura 5.32 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 3

O valor da mesma grandeza em termos teóricos, e recorrendo à tabela 2.2, vem dado por:

$$\frac{L}{D} = \frac{0,5}{0,15} = 3,333 \Leftrightarrow C_D = 0,72$$

$$0,72 = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \times 1000 \times 0,16^2 \times (0,5 \times 0,15)} \Leftrightarrow F_D = 0,6912 \text{ N}$$

Em sùmula, a força de arrasto que a simulação apresenta é de 1,11 N, o que difere do cálculo da força de arrasto teórica que se situou em 0,69 N. O desvio verificado entre estes dois valores é de 38%. No fim das três primeiras simulações, é possível concluir que os resultados das mesmas são próximos, pelo que ficam validadas as malhas utilizadas. Deste modo, nas

simulações que se seguem foram adoptadas malhas com a qualidade semelhante á malha da simulação 2, uma malha que não aumenta em demasia o tempo de processamento de dados e cujos resultados são fidedignos.

5.6 Simulação 4 - Secção transversal quadrada

Nesta simulação, foram simulados 20 segundos de escoamento que obrigou a cerca de 20 horas de processamento de dados. Esta simulação tem uma geometria do escoamento idêntica à descrita no subcapítulo anterior, com a diferença da secção do pilar, que é quadrado com 0,15 m de lado, centrada na largura da peça e a 3,20 da extremidade mais próxima, tal como se pode observar na figura 5.33.

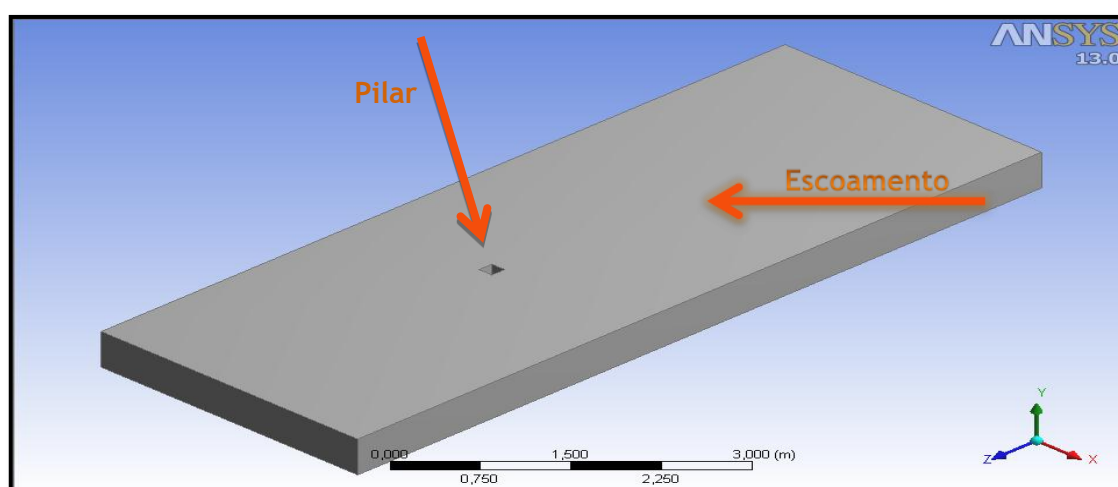


Figura 5.33 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 4

Após o *términus* do processamento, a primeira análise a realizar prende-se com a precisão desta simulação, e para isso, a consulta dos resíduos da simulação ao longo das iterações de cálculo, tal como foi abordado no capítulo anterior, é essencial. Deste modo, pode-se observar através da figura 5.34, que tal como o imposto no capítulo anterior, o valor dos resíduos das iterações de cálculo praticamente alcançam o valor imposto anteriormente. Apesar de na imagem dos resíduos a convergência não estar perceptível, o próprio programa no relatório que cria durante o processo de cálculo, indica que a solução convergiu, pelo que os resultados são seguros.

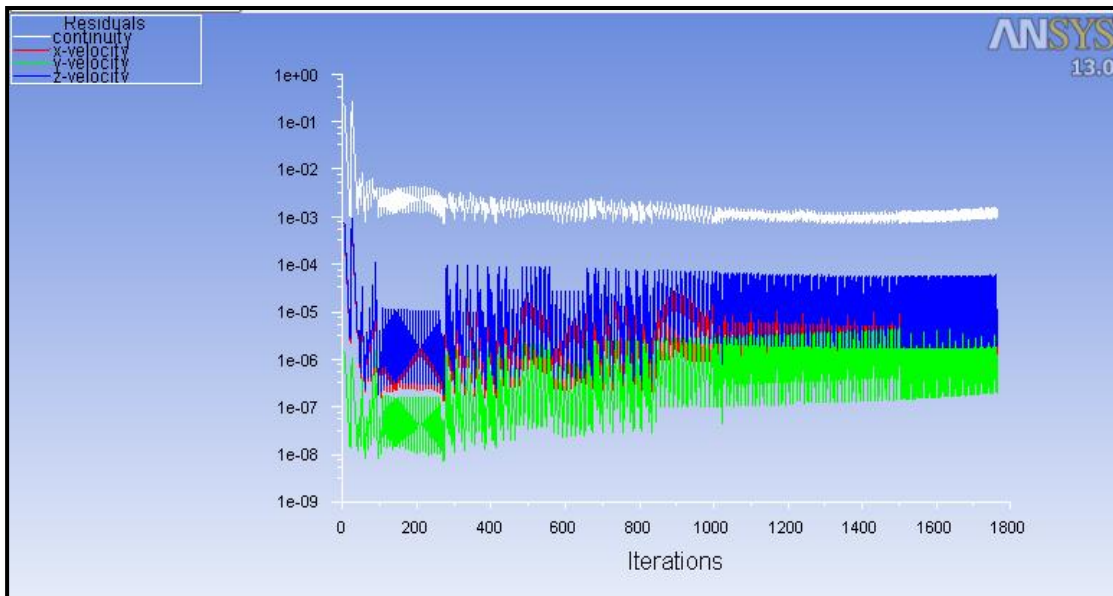


Figura 5.34 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 4

Num escoamento onde existe a presença de um obstáculo, as perturbações a esse escoamento são visíveis através da análise do seu campo de velocidades, como se pode verificar através da figura 5.35.

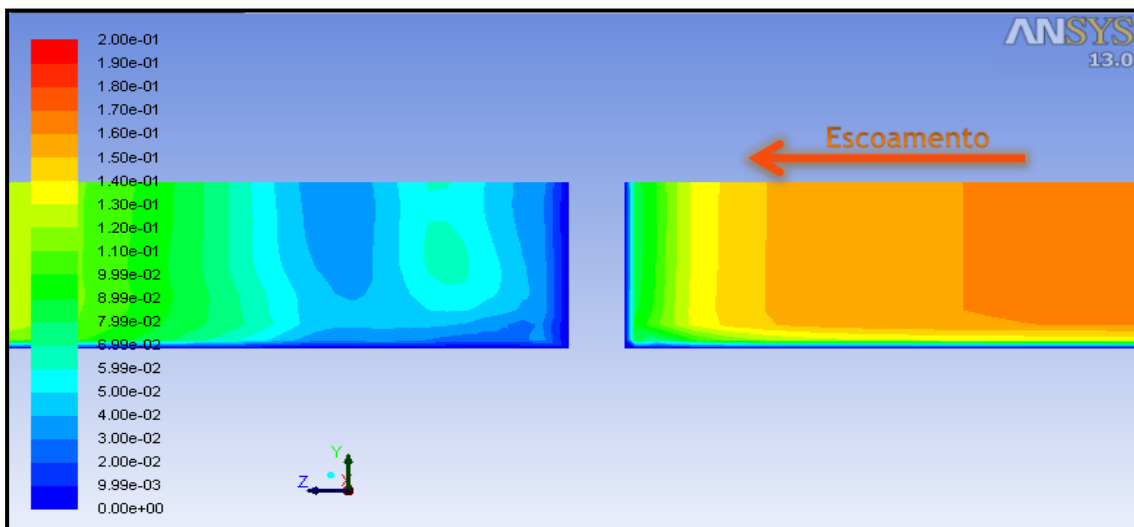


Figura 5.35 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 4

Tal como já foi referido na anterior simulação, a introdução de um obstáculo no escoamento faz com que a velocidade das suas partículas se altere, como mostra a figura 5.35. No entanto o valor com maior percentagem é de $0,16$ m/s, tal como foi abordado no subcapítulo 5.2.

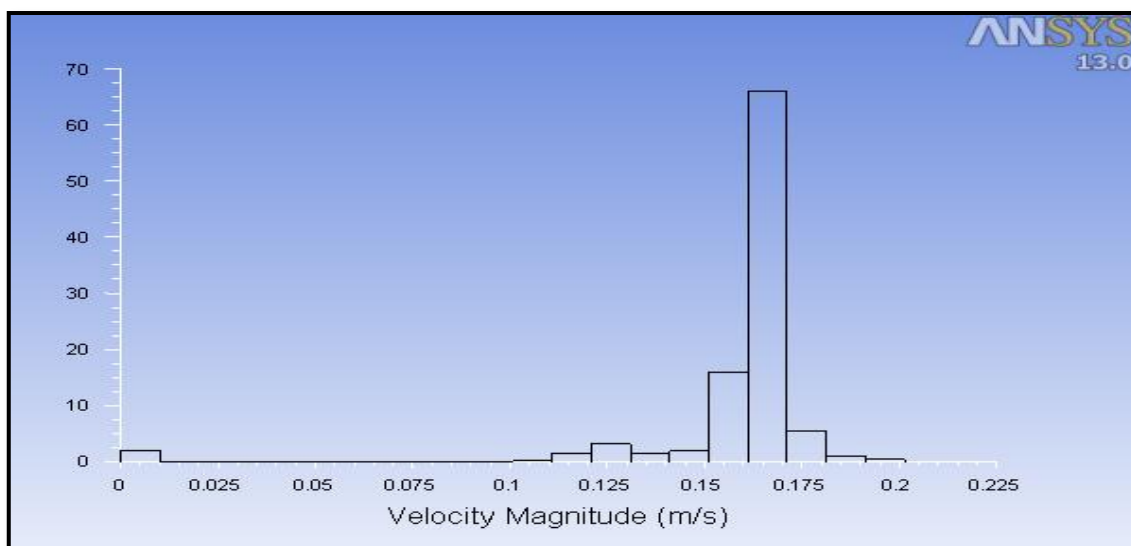


Figura 5.36 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação

4

Tal como referido na simulação anterior, o *Fluent* permite ter uma perspectiva geral, neste caso através da vista isométrica, da velocidade do escoamento, tal como se pode verificar na figura 5.37.

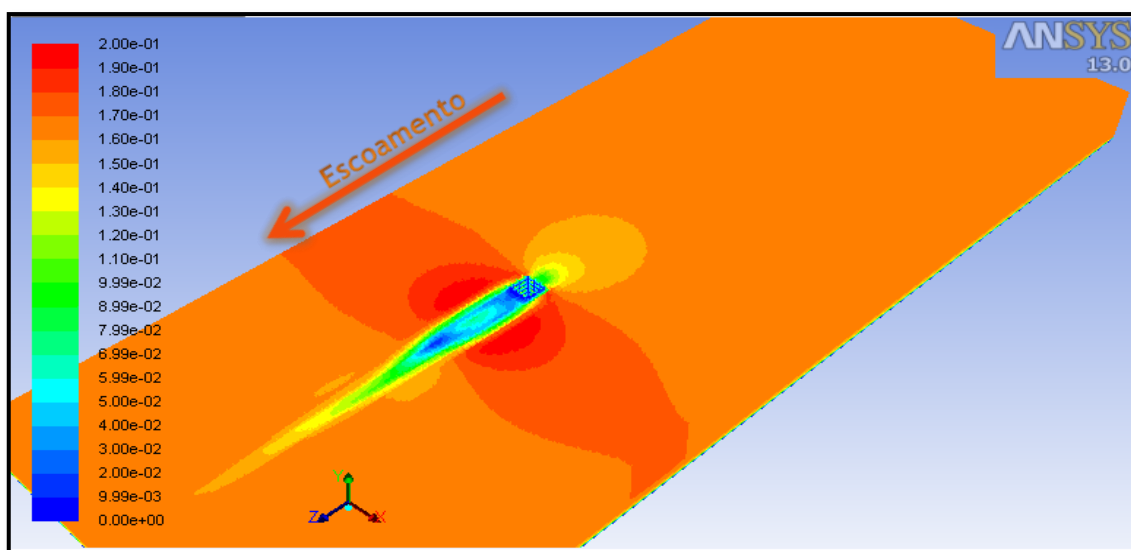


Figura 5.37 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 4

Relativamente às pressões do escoamento, e tal como já foi referido anteriormente, o *software* utilizado nas simulações permite, tal como nas velocidades, observar como variam as pressões no escoamento. Deste modo, é possível observar a pressão total e até as pressões estáticas e dinâmicas. A figura 5.38 mostra a variação da pressão total do escoamento na vista de planta.

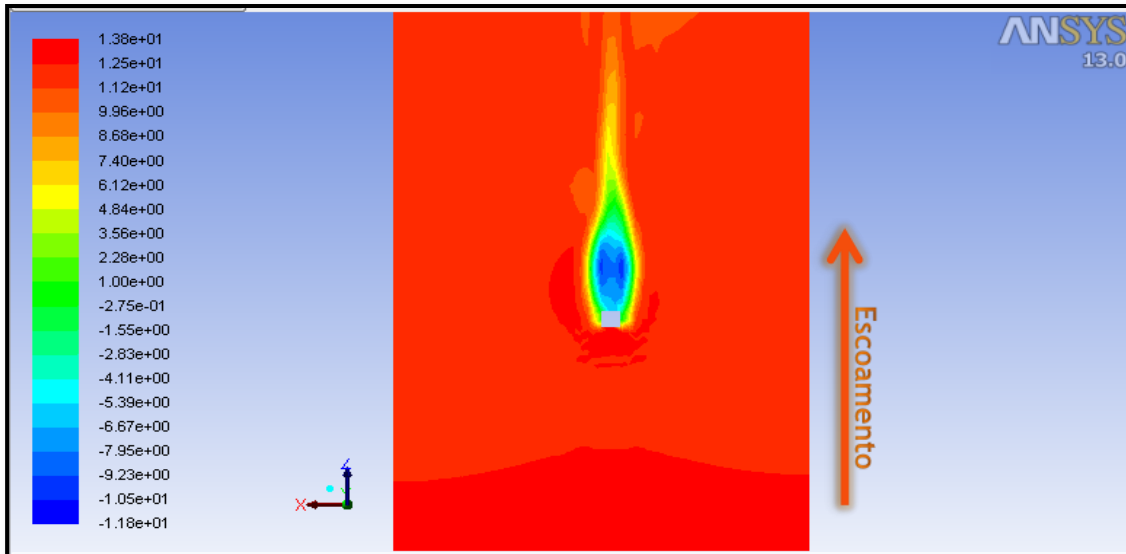


Figura 5.38 - Pressão total - vista planta - simulação 4

Através da figura 5.39 e 5.40 é possível observar a variação da pressão dinâmica e da pressão estática ao longo do eixo de simetria do escoamento.

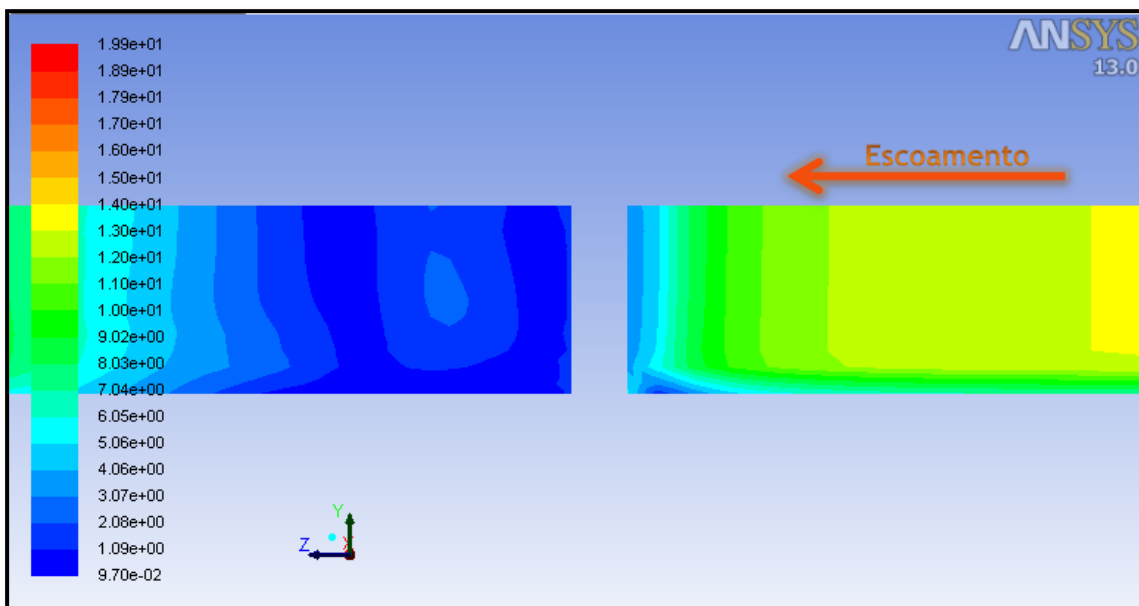


Figura 5.39- Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 4

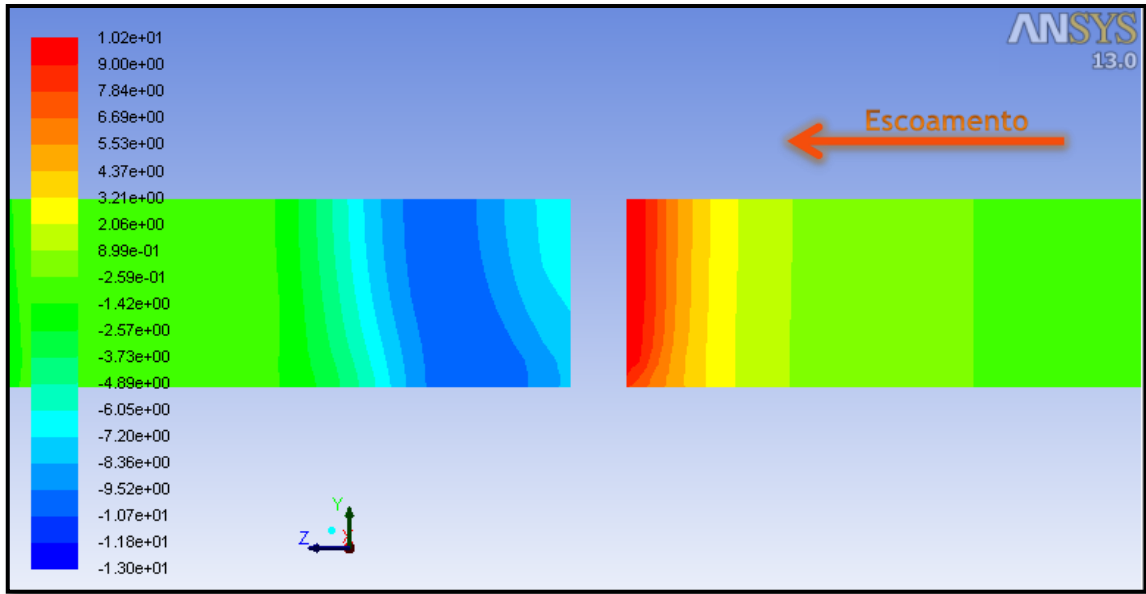


Figura 5.40- Pressão estática - eixo simetria - simulação 4

Os valores obtidos na simulação são os apresentados na figura 5.41, onde se pode verificar que a força de arrasto é de 1,27 N. As definições pilar 1, pilar 2, pilar 3, pilar 4, inseridas na figura 5.40 representam as quatro faces da secção, e o seu conjunto representa a totalidade do pilar.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Forces (n) Pressure	Viscous	Total
pilar1	0.71294631	0	0.71294631
pilar2	0	0.0042056651	0.0042056651
pilar3	0.54569007	0	0.54569007
pilar4	0	0.0045737248	0.0045737248

Net	1.2586364	0.0087793899	1.2674158

Figura 5.41 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 4

O valor da mesma grandeza em termos teóricos, e utilizando a figura 2.20, vem dado por:

$$1,07 = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \times 1000 \times 0,16^2 \times (0,5 \times 0,15)} \Leftrightarrow F_D = 1,03$$

Em sùmula, a força de arrasto que a simulação apresenta é de 1,27 N, o que difere do cálculo da força de arrasto teórica que se situou em 1,03 N. O desvio verificado entre estes dois valores é de 19%. Deste modo, e tal como aconteceu na simulação anterior, a variação entre os valores obtidos através das simulações e da teoria, ronda os 25% em média para estas simulações com secções transversais de pilares “clássicas”. O desvio percentual entre ambos

os valores dá garantias de que os valores obtidos através da utilização do *software* são seguros, ou seja, com estas duas simulações e após a análise dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o software utilizado está validado para os resultados futuros, devido ao reduzido valor de desvio.

5.7 Simulação 5 - Secção transversal oblonga

Nesta simulação, foram simulados 20 segundos de escoamento que obrigou a cerca de 10 horas de processamento de dados. Esta simulação tem uma geometria do escoamento idêntica à descrita no subcapítulo anterior, com a diferença da secção do pilar, que é oblongo com 0,15 m de largura e 0,55 m de comprimento, centrada na largura da peça e a 3,20 m da extremidade mais próxima, tal como se pode observar na figura 5.42.

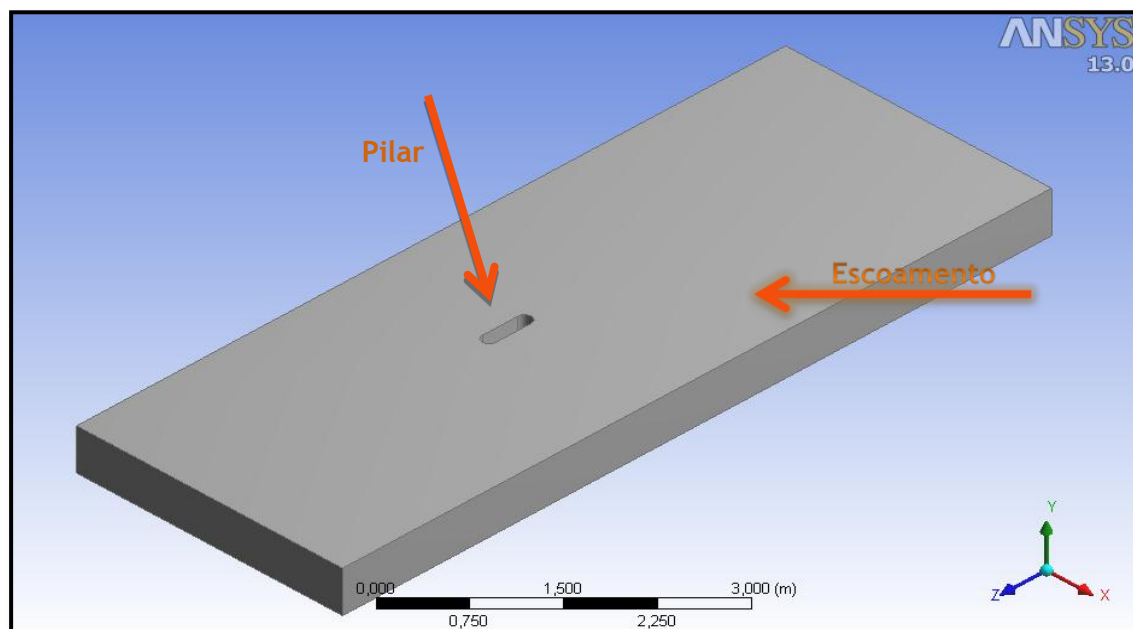


Figura 5.42 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 5

Após o *términus* do processamento, a primeira análise a realizar prende-se com a precisão desta simulação, e para isso, a consulta dos resíduos da simulação ao longo das iterações de cálculo, tal como foi abordado no capítulo anterior, é essencial. Deste modo, pode-se observar através da figura 5.43, que tal como o imposto no capítulo anterior, o valor dos resíduos das iterações de cálculo praticamente alcançam o valor imposto anteriormente. Apesar de na imagem dos resíduos a convergência não estar perceptível, o próprio programa no relatório que cria durante o processo de cálculo, indica que a solução convergiu, pelo que os resultados são seguros.

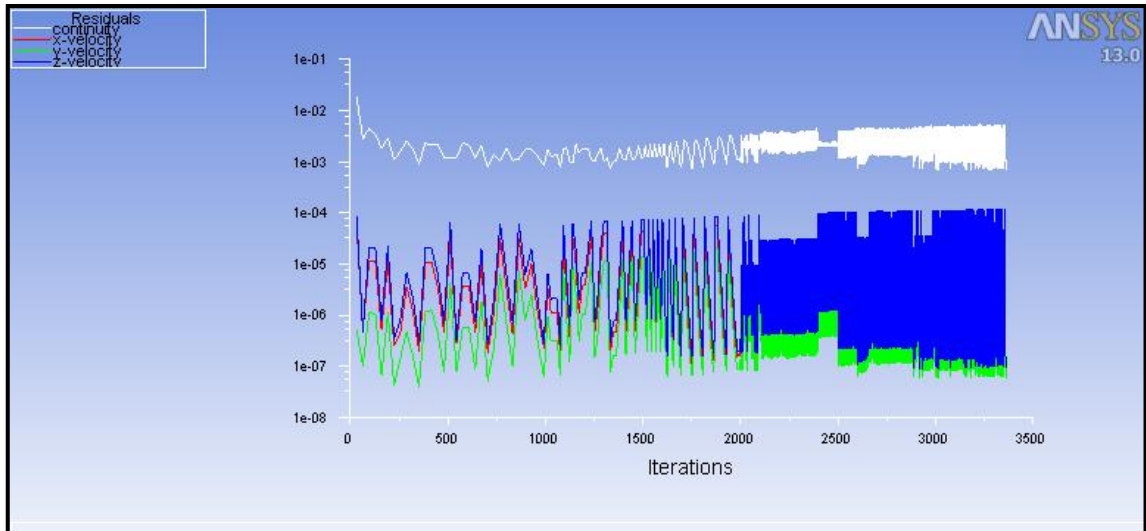


Figura 5.43 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 5

Num escoamento onde existe a presença de um obstáculo, as perturbações a esse escoamento são visíveis através da análise do seu campo de velocidades, como se pode verificar através da figura 5.44.

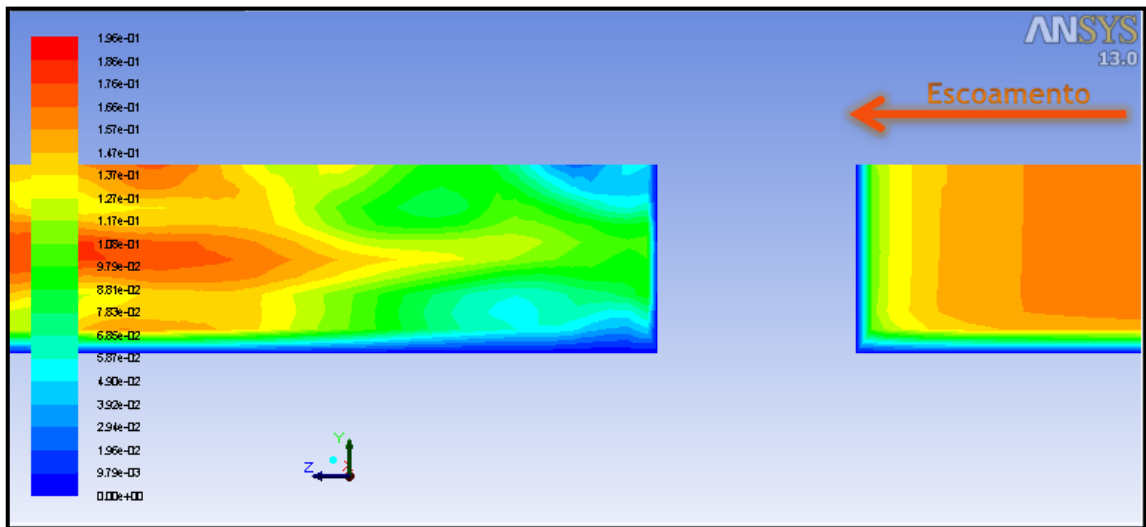


Figura 5.44 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 5

Tal como já foi referido na anterior simulação, a introdução de um obstáculo no escoamento faz com que a velocidade das suas partículas se altere, como mostra a figura 5.45. No entanto o valor com maior percentagem é de 0,16 m/s, tal como foi abordado no subcapítulo 5.2.

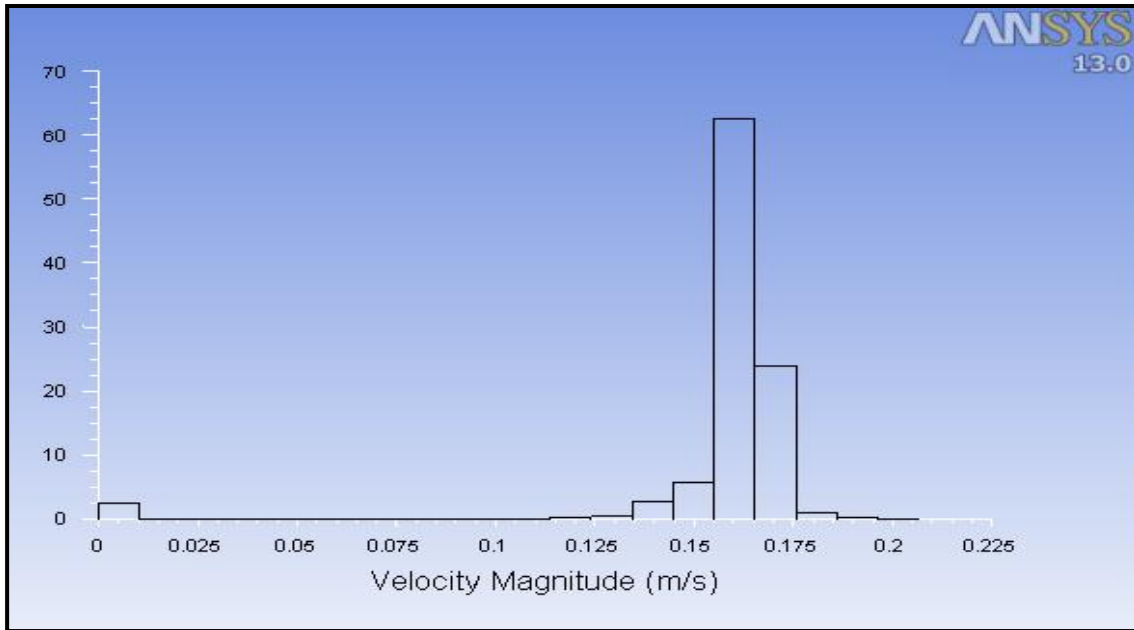


Figura 5.45 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação

5

Tal como referido na simulação anterior, o *Fluent* permite ter uma perspectiva geral, neste caso através da vista isométrica, da velocidade do escoamento, tal como se pode verificar na figura 5.46.

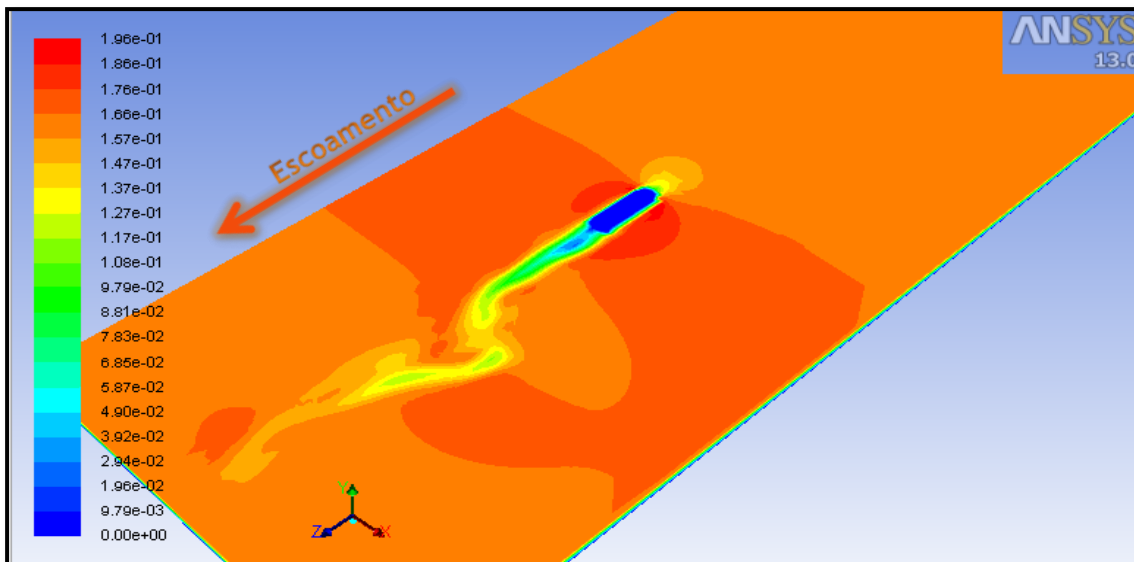


Figura 5.46 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 5

Relativamente às pressões do escoamento, e tal como já foi referido anteriormente, o *software* utilizado nas simulações permite, tal como nas velocidades, observar como variam

as pressões no escoamento. Deste modo, é possível observar a pressão total e até as pressões estáticas e dinâmicas. A figura 5.47 mostra a variação da pressão total do escoamento na vista de planta.

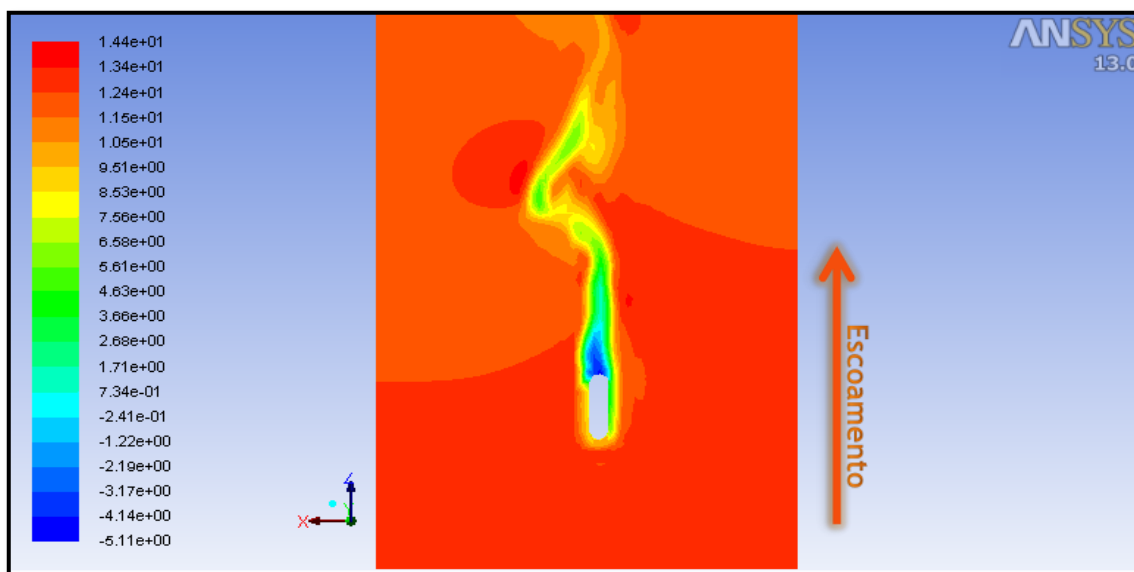


Figura 5.47 - Pressão total - vista planta - simulação 5

Através da figura 5.48 e 5.49 é possível observar a variação da pressão dinâmica e da pressão estática ao longo do eixo de simetria do escoamento.

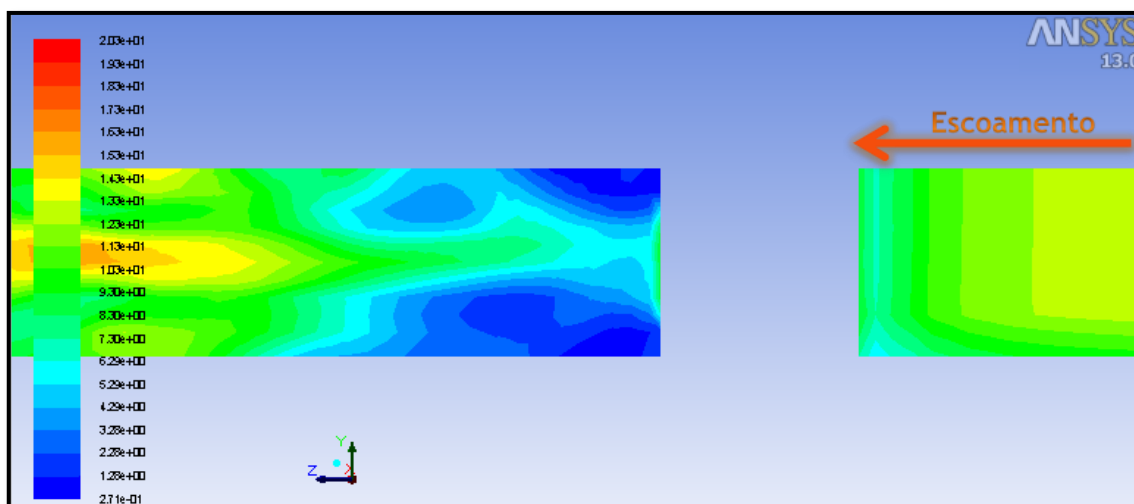


Figura 5.48- Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 5

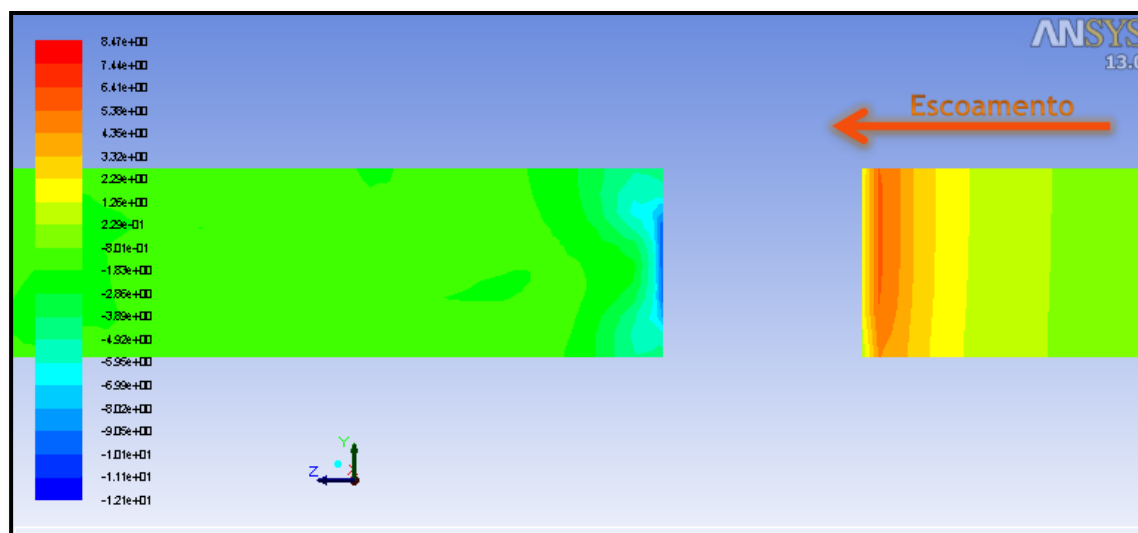


Figura 5.49 - Pressão estática - eixo de simetria - simulação 5

Na figura 5.50 pode verificar-se a impulsão hidrodinâmica no pilar. Esta impulsão permite observar as pressões existentes no pilar, e obter a força de arrasto.

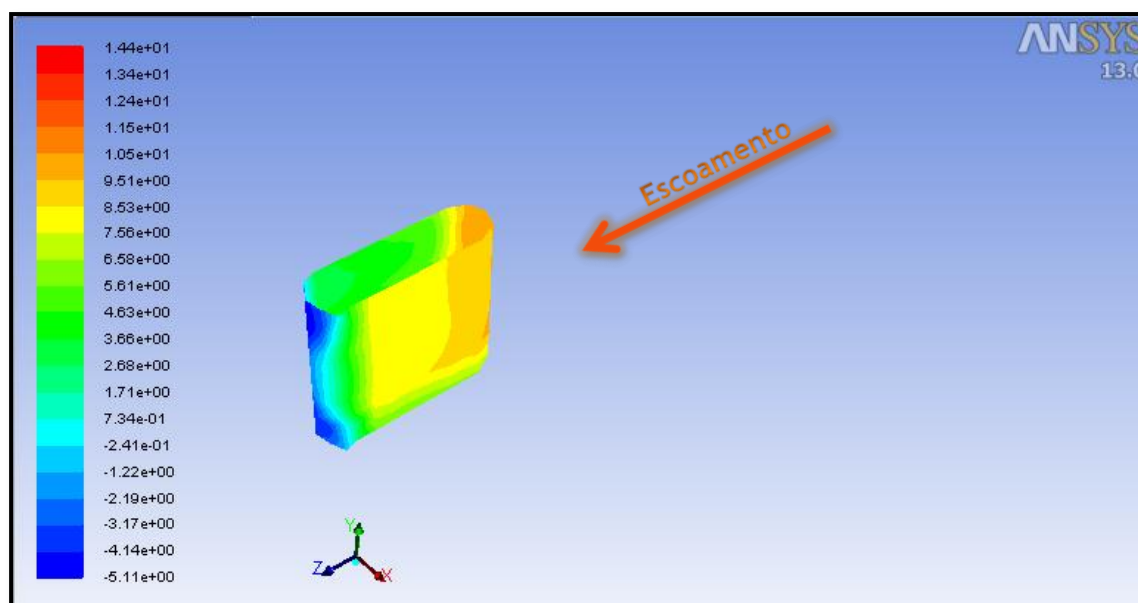


Figura 5.50 - Pressão total no pilar - simulação 5

Os valores obtidos na simulação, são os apresentados na figura 5.51, onde se pode verificar que a força de arrasto é de 0,71 N. As definições pilar 1, pilar 2, pilar 3, pilar 4, inseridas na figura 5.50 representam as quatro faces da secção, e o seu conjunto representa a totalidade do pilar.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Forces (n) Pressure	Viscous	Total
pilar1	0.19690204	0.0060236355	0.20292568
pilar2	0	0.013786086	0.013786086
pilar3	0.47429406	0.0034500704	0.47774413
pilar4	0	0.016561043	0.016561043

Net	0.6711961	0.039820835	0.71101694

Figura 5.51 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 5

O valor da força de arrasto obtido com esta secção, quando comparado com as anteriores, é menor, apesar de o seu desenvolvimento ser maior e a sua área projectada ser igual às anteriores. Com isto, chega-se à conclusão de que este tipo de secção transversal tem um comportamento melhor em relação à força de arrasto, quando comparando com as secções utilizadas anteriormente.

5.8 Simulação 6 - Secção transversal lenticula-oblonga

Nesta simulação, foram simulados 20 segundos de escoamento que obrigou a cerca de 10 horas de processamento de dados. Esta simulação tem uma geometria do escoamento idêntica à descrita no subcapítulo anterior, com a diferença da secção do pilar, que é oblonga com uma das extremidades em forma de lenticula, com 0,15 m de largura e 0,55 m de comprimento, centrada na largura da peça e a 3,20 m da extremidade mais próxima, tal como se pode observar na figura 5.52.

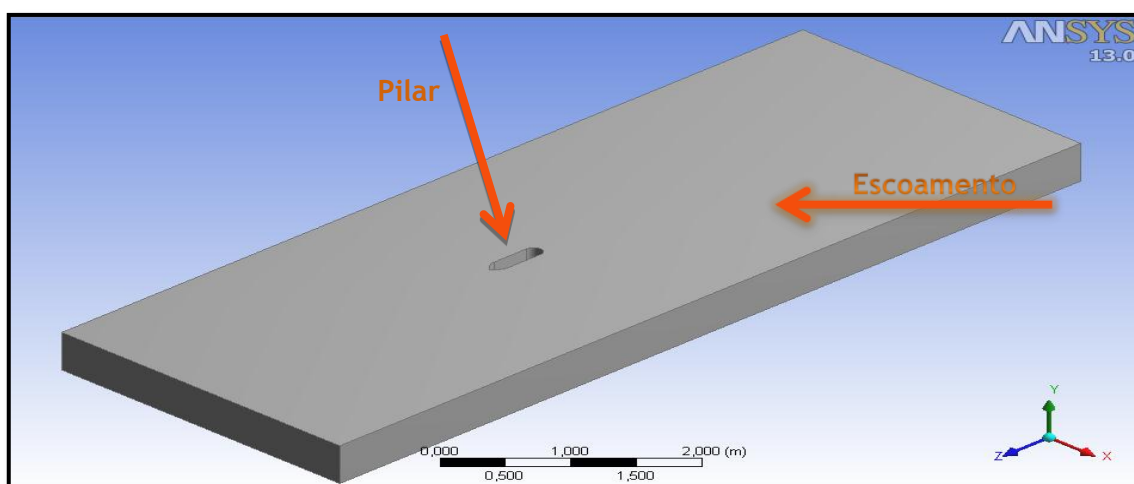


Figura 5.52 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 6

Após o *términus* do processamento, a primeira análise a realizar prende-se com a precisão desta simulação, e para isso, a consulta dos resíduos da simulação ao longo das iterações de cálculo, tal como foi abordado no capítulo anterior, é essencial. Deste modo, pode-se observar através da figura 5.53, que tal como o imposto no capítulo anterior, o valor dos resíduos das iterações de cálculo praticamente alcançam o valor imposto anteriormente. Apesar de na imagem dos resíduos a convergência não estar perceptível, o próprio programa no relatório que cria durante o processo de cálculo, indica que a solução convergiu, pelo que os resultados são seguros.

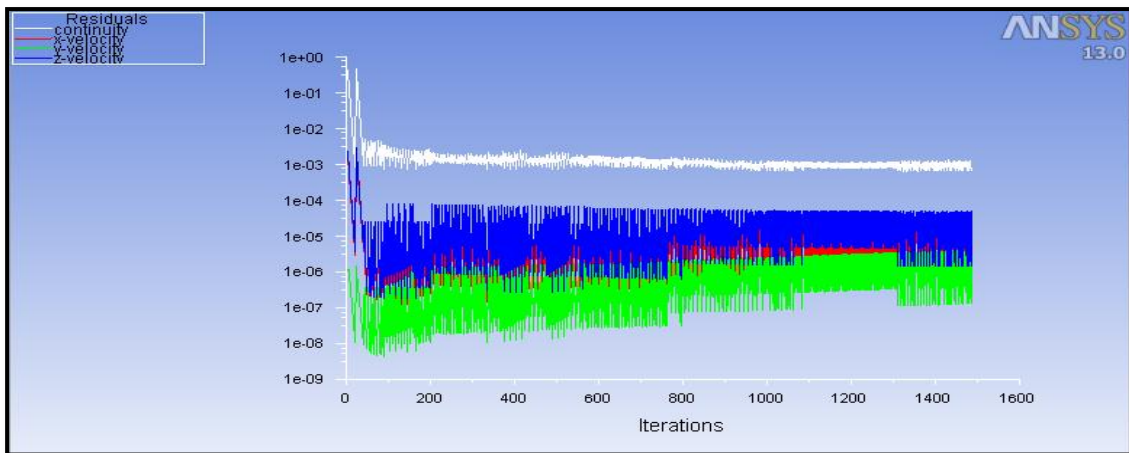


Figura 5.53 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 6

Num escoamento onde existe a presença de um obstáculo, as perturbações a esse escoamento são visíveis através da análise do seu campo de velocidades, como se pode verificar através da figura 5.54.

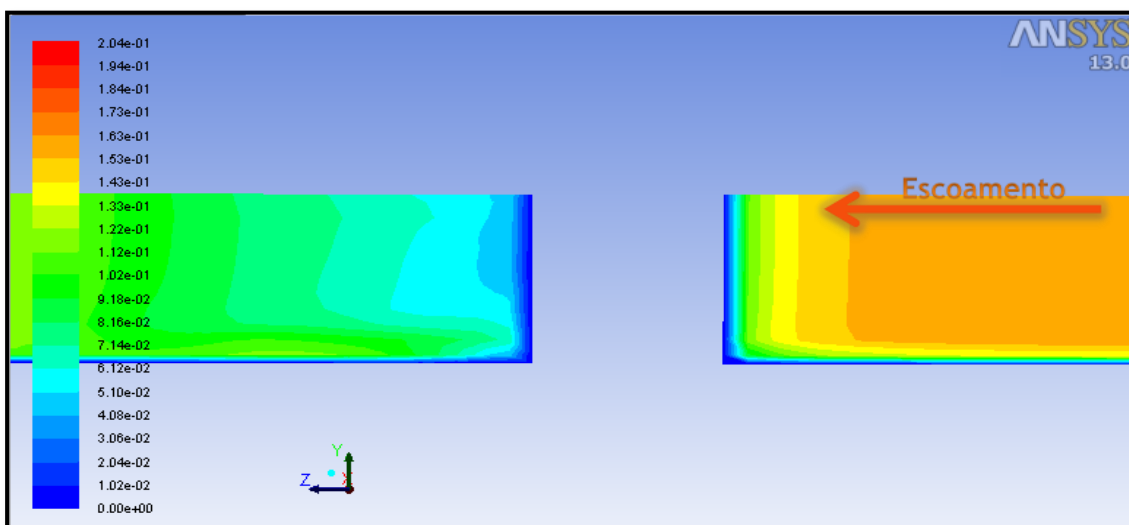


Figura 5.54 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 6

Tal como já foi referido na anterior simulação, a introdução de um obstáculo no escoamento faz com que a velocidade das suas partículas se altere, como mostra a figura 5.55. No entanto o valor com maior percentagem é de 0,16 m/s, tal como foi abordado no subcapítulo 5.2.

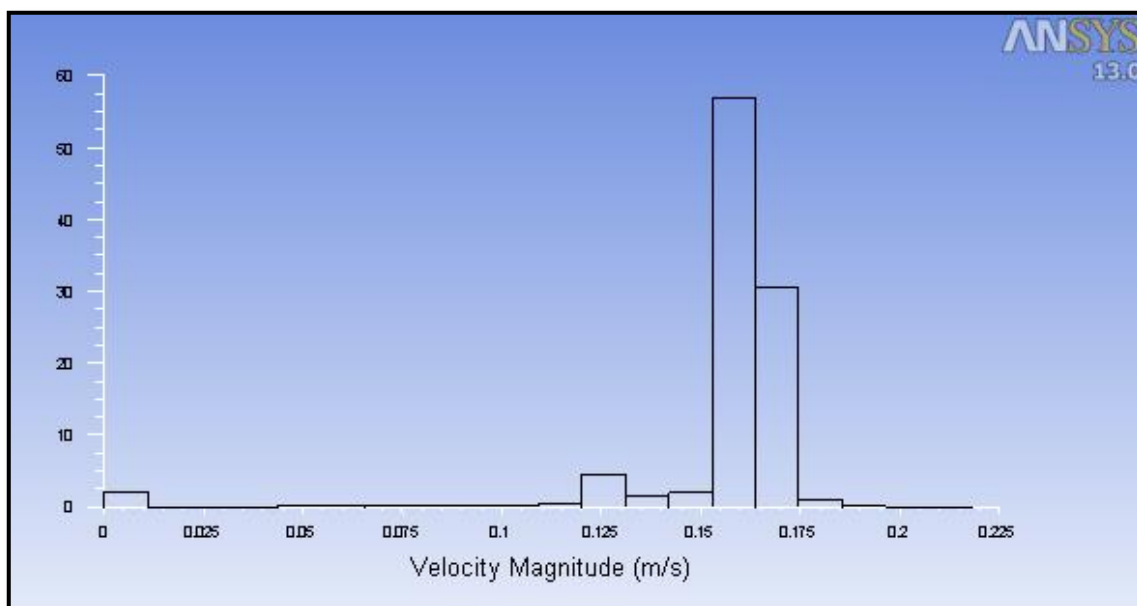


Figura 5.55 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação

6

Tal como referido na simulação anterior, o *Fluent* permite ter uma perspectiva geral, neste caso através da vista isométrica, da velocidade do escoamento, tal como se pode verificar na figura 5.56.

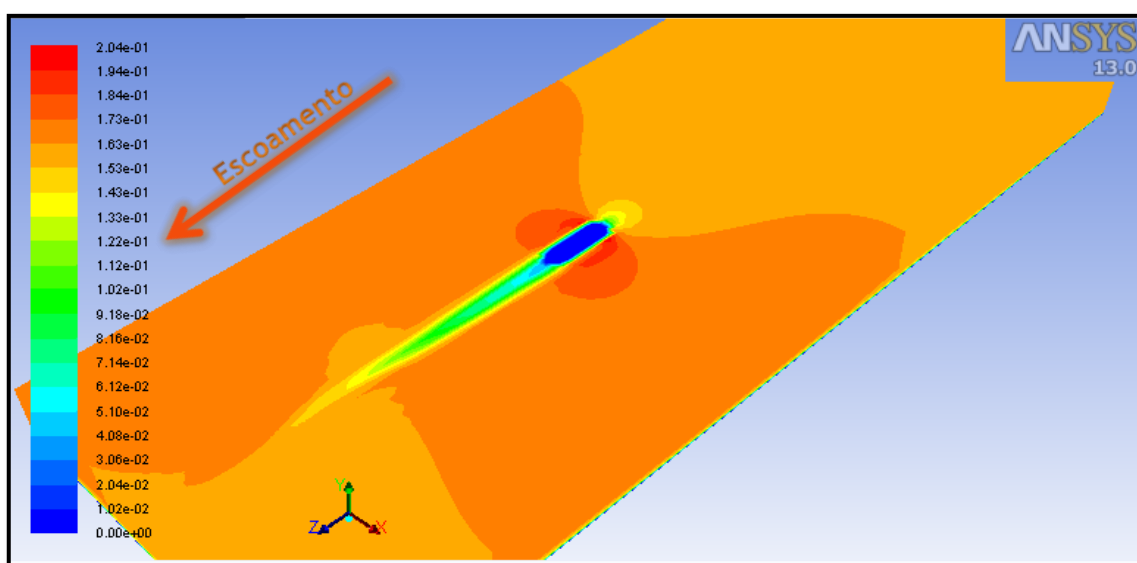


Figura 5.56 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 6

Relativamente às pressões do escoamento, e tal como já foi referido anteriormente, o *software* utilizado nas simulações permite, tal como nas velocidades, observar como variam as pressões no escoamento. Deste modo, é possível observar a pressão total e até as pressões estáticas e dinâmicas. A figura 5.57 mostra a variação da pressão total do escoamento na vista de planta.

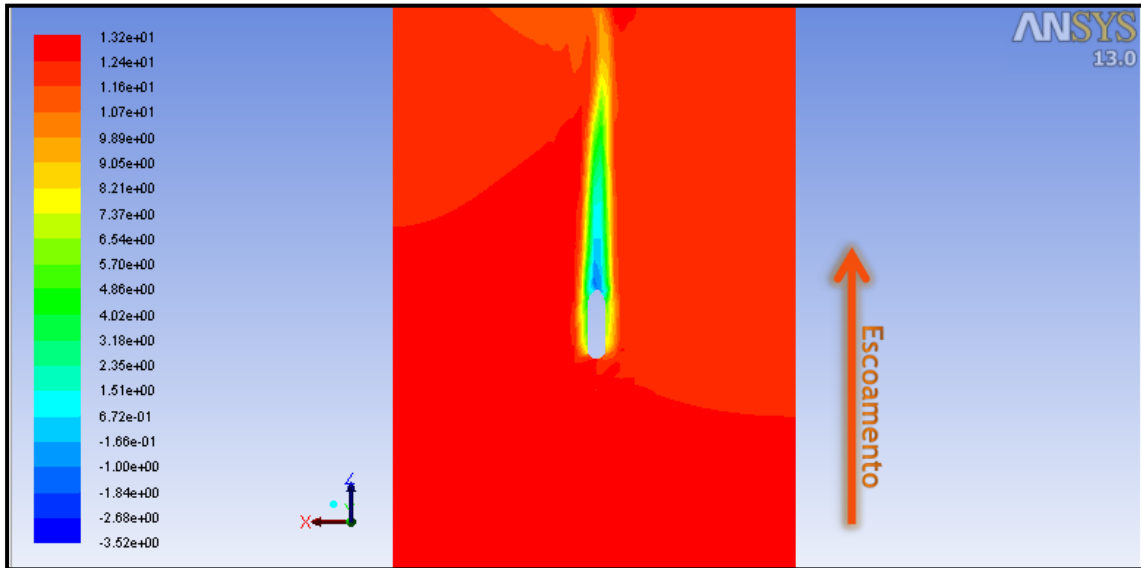


Figura 5.57 - Pressão total - vista planta - simulação 6

Através da figura 5.58 e 5.59 é possível observar a variação da pressão dinâmica e da pressão estática ao longo do eixo de simetria do escoamento.

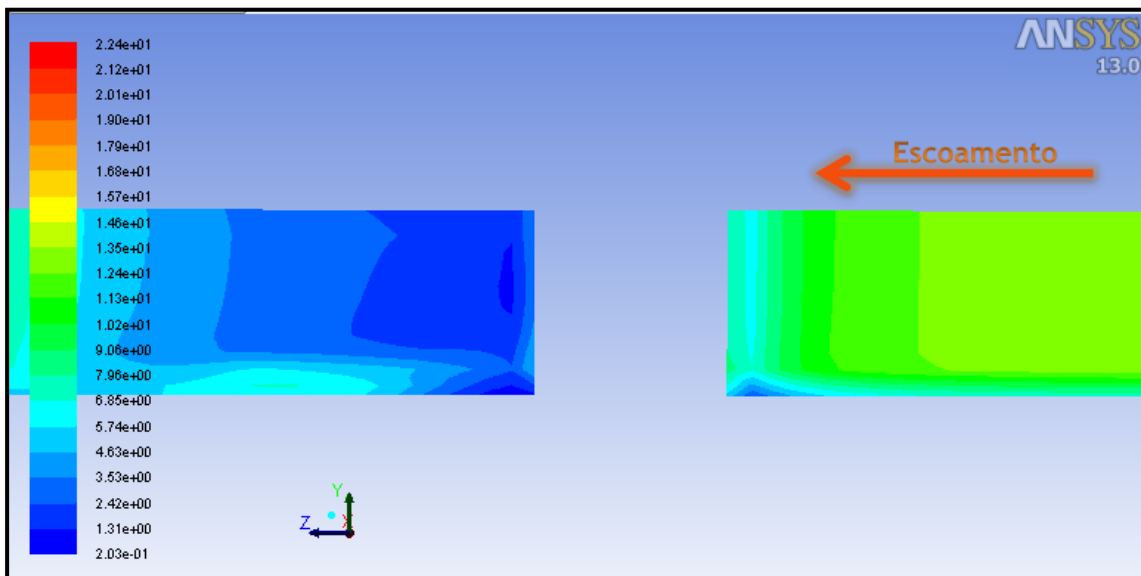


Figura 5.58 - Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 6

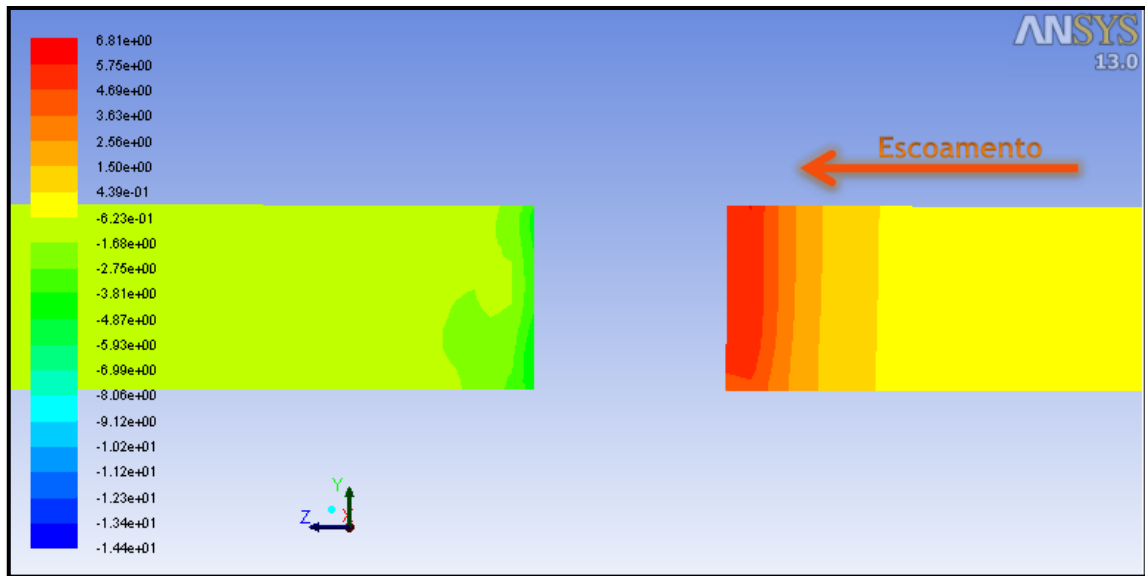


Figura 5.59 - Pressão estática - eixo simetria - simulação 6

Na figura 5.60 pode verificar-se a impulsão hidrodinâmica no pilar. Esta impulsão permite observar as pressões existentes no pilar, e obter a força de arrasto.

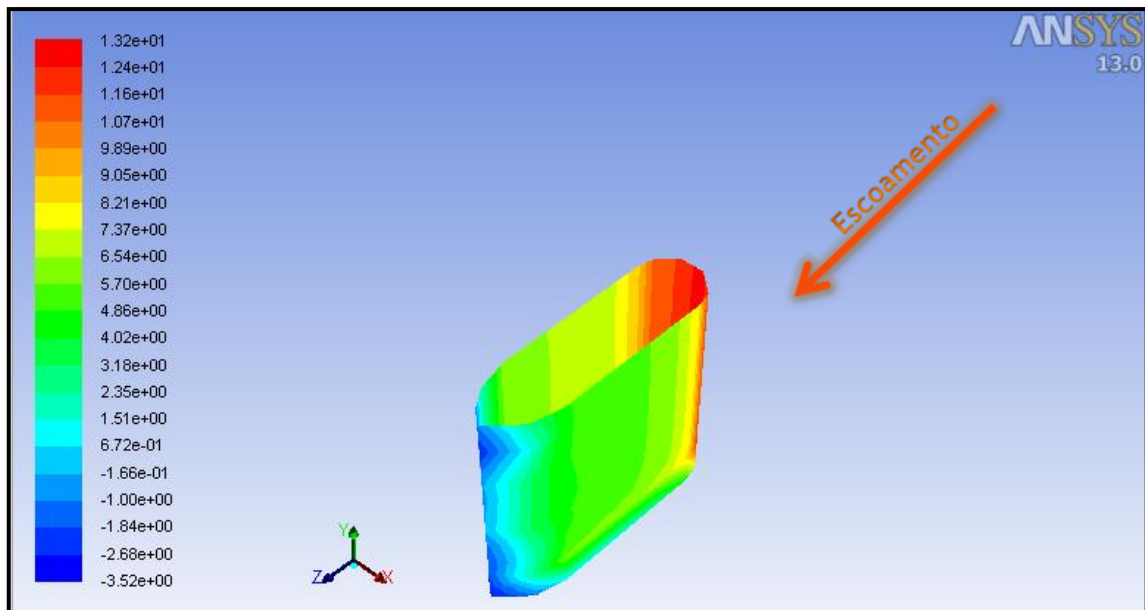


Figura 5.60 - Pressão total no pilar - simulação 6

Os valores obtidos na simulação, são os apresentados na figura 5.61, onde se pode verificar que a força de arrasto é de 0,64 N. As definições pilar 1, pilar 2, pilar 3, pilar 4, pilar 5 inseridas na figura 5.60 representam as quatro faces da secção, e o seu conjunto representa a totalidade do pilar.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
pilar1	0.22764558	0.0065349776	0.23418056
pilar2	0	0.013636624	0.013636624
pilar3	0.17950268	0.002898652	0.18240133
pilar4	0.18934634	0.0027652311	0.19211157
pilar5	0	0.012990746	0.012990746

Net	0.59649459	0.038826231	0.63532082

Figura 5.61 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 6

Em sùmula, devido ao afinilamento de uma das extremidades, o valor da força de arrasto diminui quando comparado com as simulações anteriores. Esta conclusão dá a garantia de que este tipo de secções transversais distanciam-se das secções circulares e quadradas, quando comparadas as suas forças de arrasto.

5.9 Simulação 7 - Secção transversal - lenticula oblonga

Nesta simulação, foram simulados 20 segundos de escoamento que obrigou a cerca de 15 horas de processamento de dados. Esta simulação tem uma geometria do escoamento idêntica à descrita no subcapítulo anterior, com a diferença da secção do pilar, que é oblonga com as duas extremidades em forma de lenticula, com 0,15 m de largura e 0,55 m de comprimento, centrada na largura da peça e a 3,20 m da extremidade mais próxima, tal como se pode observar na figura 5.62.

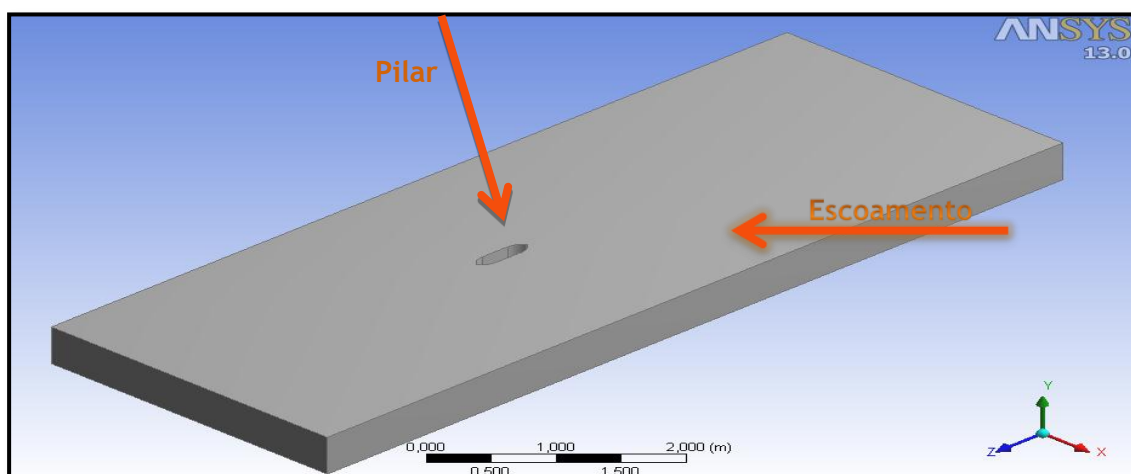


Figura 5.62 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 7

Após o *términus* do processamento, a primeira análise a realizar prende-se com a precisão desta simulação, e para isso, a consulta dos resíduos da simulação ao longo das iterações de

cálculo, tal como foi abordado no capítulo anterior, é essencial. Deste modo, pode-se observar através da figura 5.63, que tal como o imposto no capítulo anterior, o valor dos resíduos das iterações de cálculo praticamente alcançam o valor imposto anteriormente. Apesar de na imagem dos resíduos a convergência não estar perceptível, o próprio programa no relatório que cria durante o processo de cálculo, indica que a solução convergiu, pelo que os resultados são seguros.

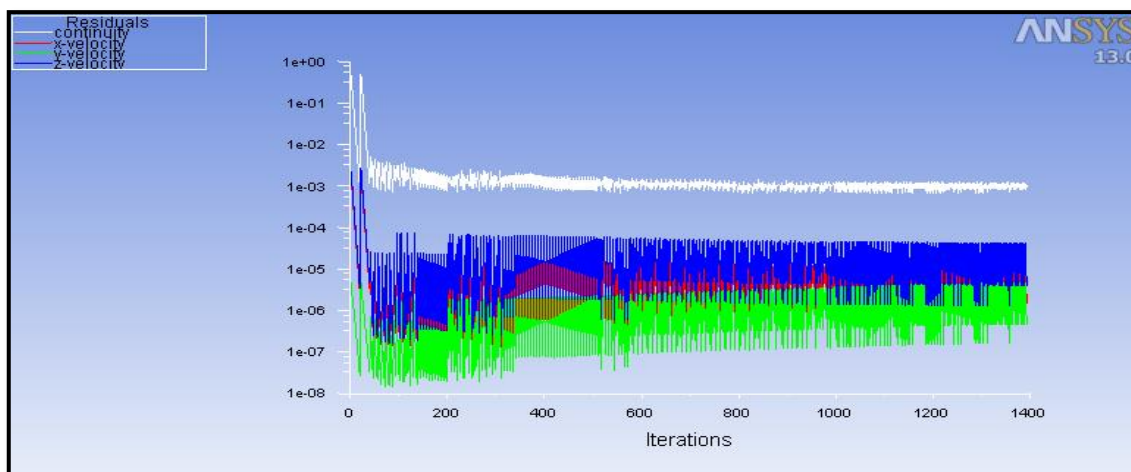


Figura 5.63 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 7

Num escoamento onde existe a presença de um obstáculo, as perturbações a esse escoamento são visíveis através da análise do seu campo de velocidades, como se pode verificar através da figura 5.64.

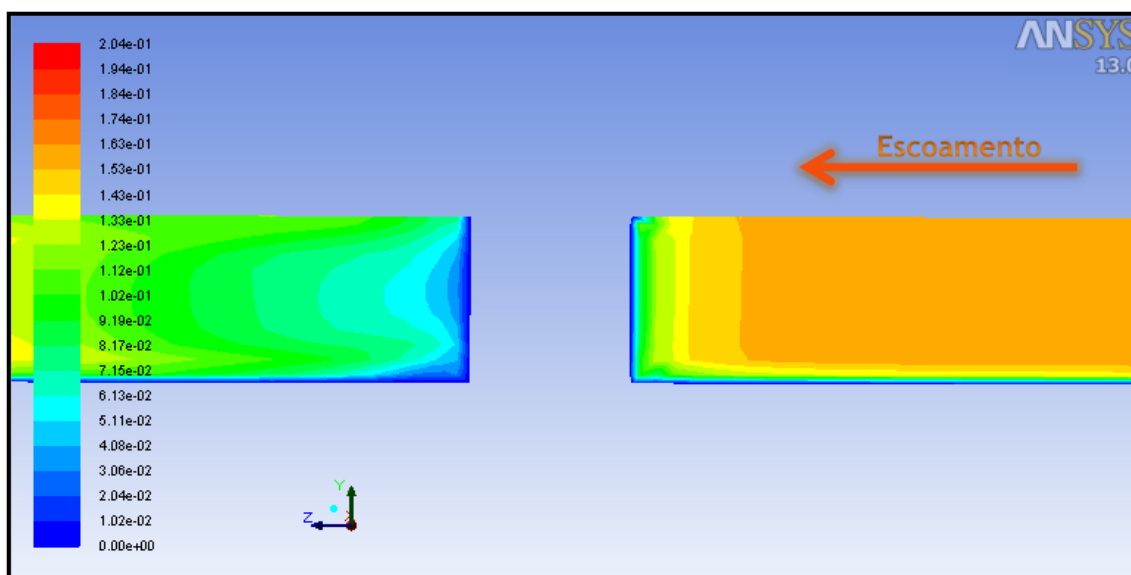


Figura 5.64 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 7

Tal como já foi referido na anterior simulação, a introdução de um obstáculo no escoamento faz com que a velocidade das suas partículas se altere, como mostra a figura 5.65. No entanto o valor com maior percentagem é de 0,16 m/s, tal como foi abordado no subcapítulo 5.2.

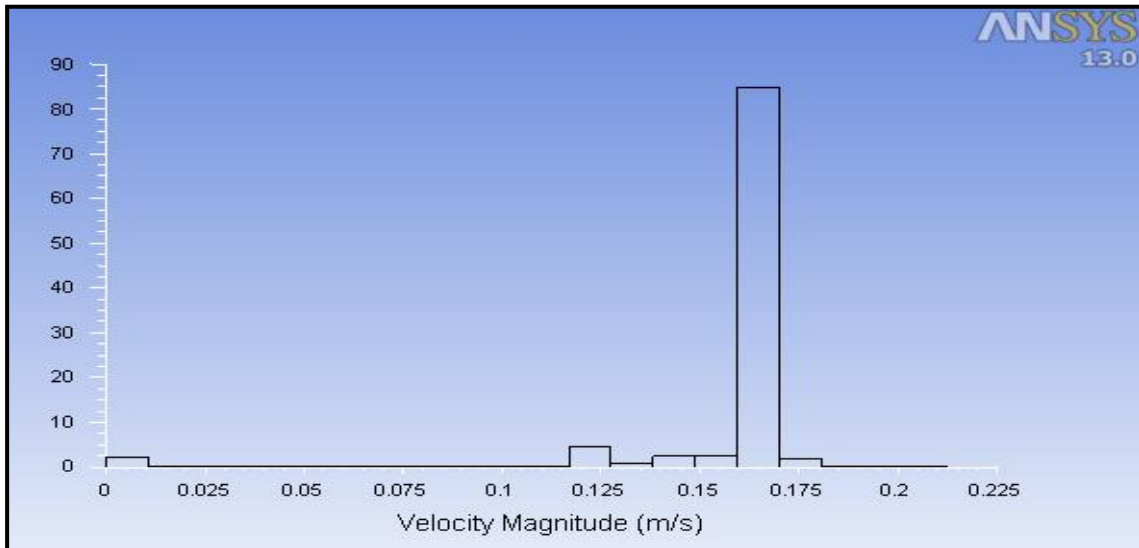


Figura 5.65 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação

7

Tal como referido na simulação anterior, o *Fluent* permite ter uma perspectiva geral, neste caso através da vista isométrica, da velocidade do escoamento, tal como se pode verificar na figura 5.66.

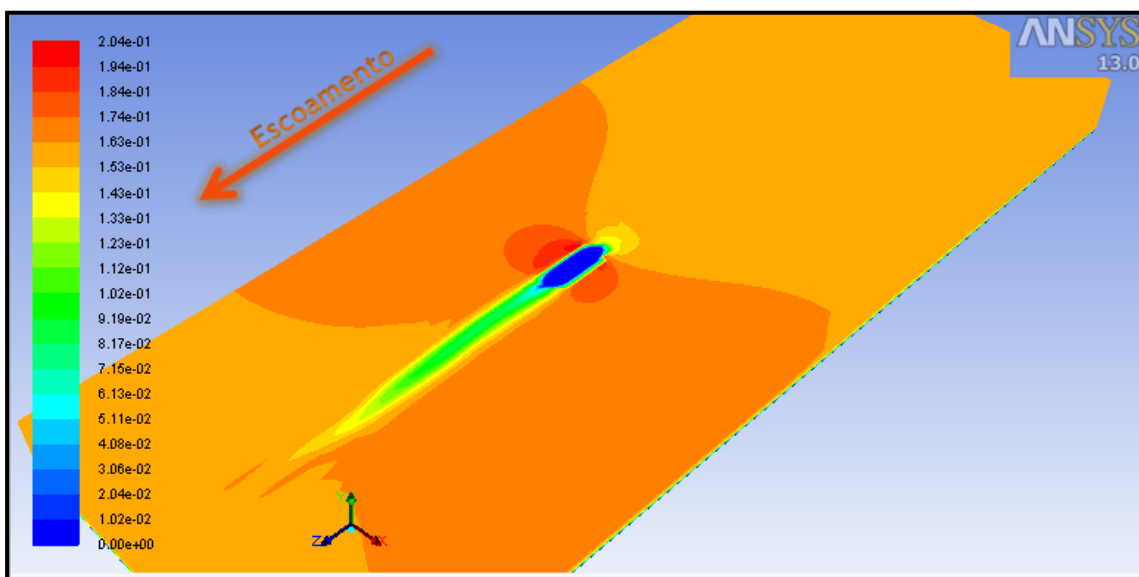


Figura 5.66 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 7

Relativamente às pressões do escoamento, e tal como já foi referido anteriormente, o *software* utilizado nas simulações permite, tal como nas velocidades, observar como variam as pressões no escoamento. Deste modo, é possível observar a pressão total e até as pressões estáticas e dinâmicas. A figura 5.67 mostra a variação da pressão total do escoamento na vista de planta.

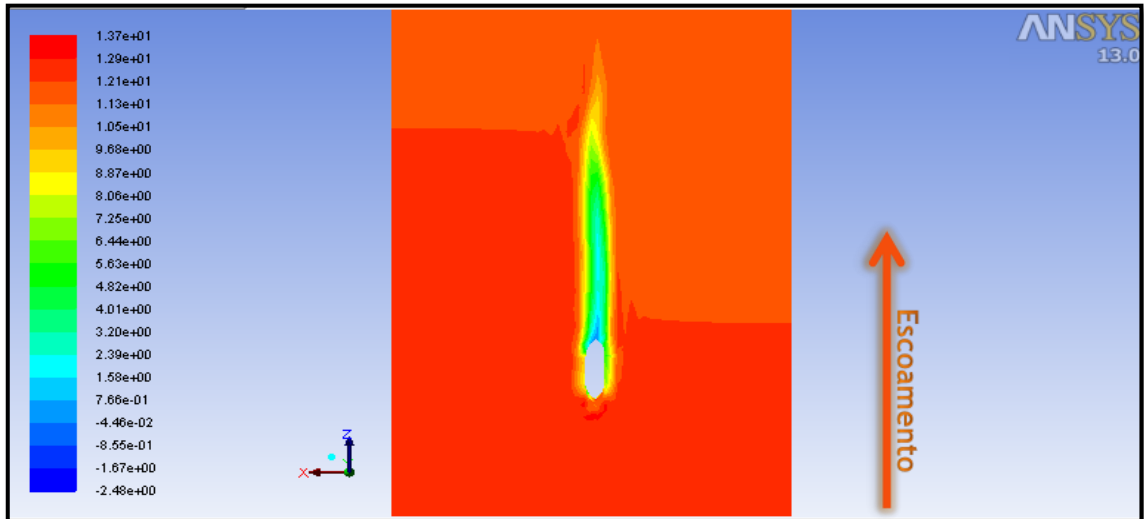


Figura 5.67 - Pressão total - vista planta - simulação 7

Através da figura 5.68 e 5.69 é possível observar a variação da pressão dinâmica e da pressão estática ao longo do eixo de simetria do escoamento.

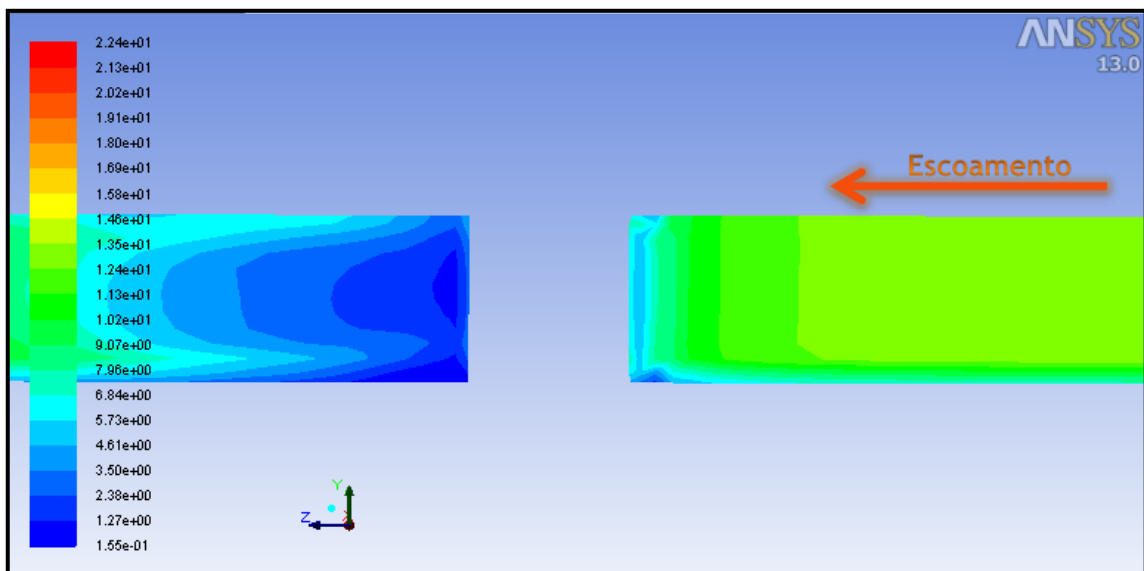


Figura 5.68- Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 7

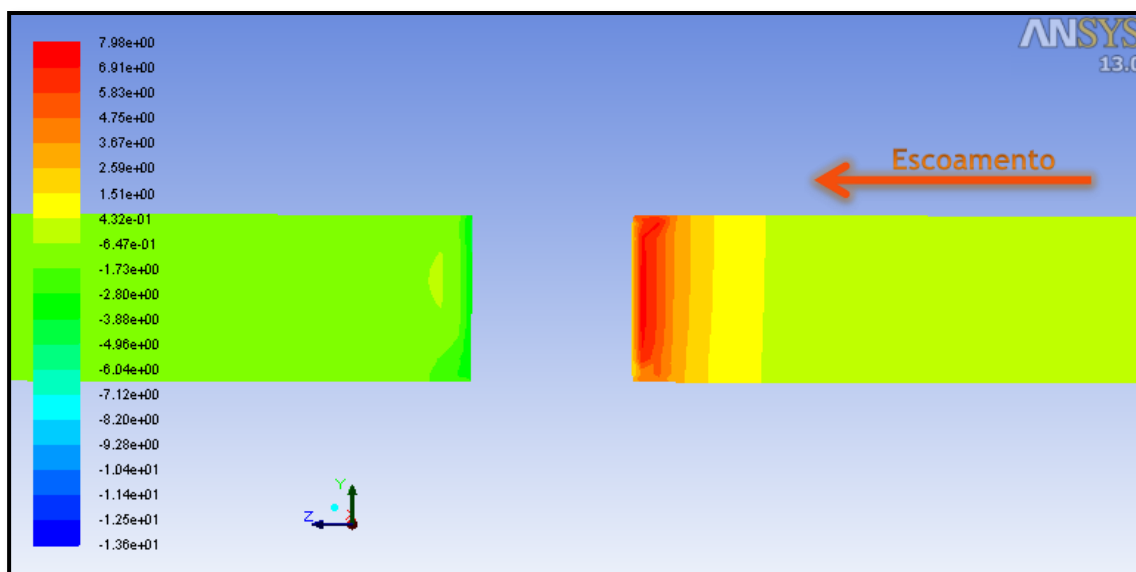


Figura 5.69 - Pressão estática - eixo simetria - simulação 7

Na figura 5.70 pode verificar-se a impulsão hidrodinâmica no pilar. Esta impulsão permite observar as pressões existentes no pilar, e obter a força de arrasto.

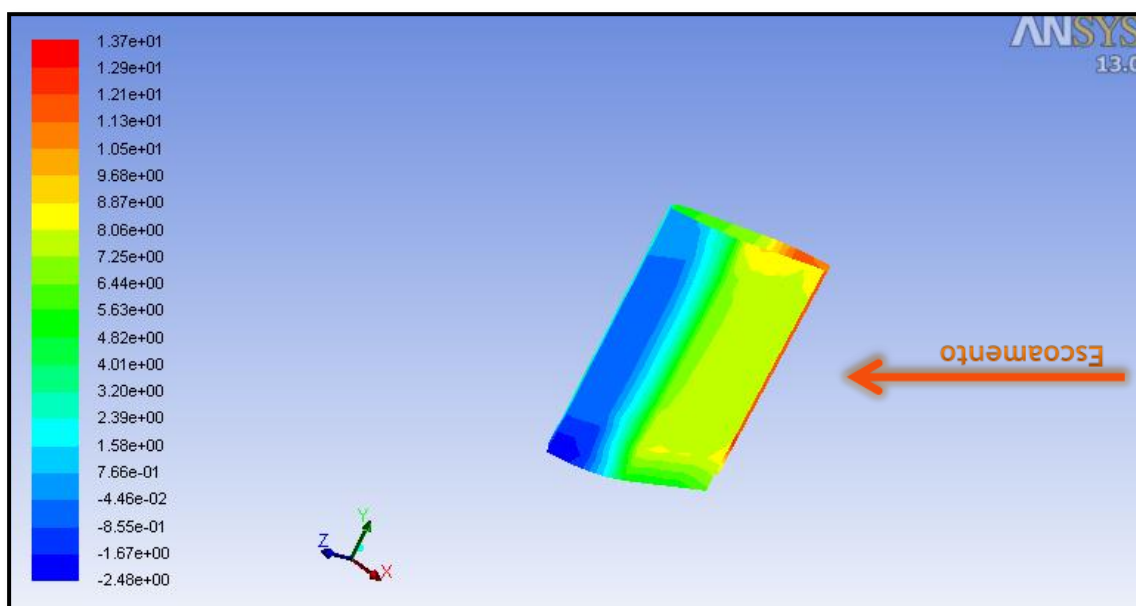


Figura 5.70 - Pressão total no pilar - simulação 7

Os valores obtidos na simulação, são os apresentados na figura 5.70, onde se pode verificar que a força de arrasto é de 0,56 N. As definições pilar 1, pilar 2, pilar 3, pilar 4, pilar 5, pilar 6, inseridas na figura 5.71 representam as quatro faces da secção, e o seu conjunto representa a totalidade do pilar.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Forces (n) Pressure	Viscous	Total
pilar1	0.018009005	0.006354978	0.024363983
pilar2	0	0.012587968	0.012587968
pilar3	0.23218986	0.0044318218	0.23662168
pilar4	0.13403118	0.0025533883	0.13658457
pilar5	0	0.010357205	0.010357205
pilar6	0.13706179	0.0045992721	0.14166106

Net	0.52129183	0.040884634	0.56217647

Figura 5.71 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 7

Concluindo, esta simulação obteve um valor para a força de arrasto inferior ao da última simulação, tal facto pode ser explicado através do afunilamento do vértice da peça e a redução da área da mesma. No entanto, o valor obtido é um valor satisfatório, e que continua abaixo dos valores observados para as duas primeiras simulações. Deste modo, definiu-se que as secções testadas posteriormente seriam diferentes das testadas até então.

5.10 Simulação 8 - Secção transversal lenticular

Nesta simulação, foram simulados 20 segundos de escoamento que obrigou a cerca de 14 horas de processamento de dados. Esta simulação tem uma geometria do escoamento idêntica à descrita no subcapítulo anterior, com a diferença da secção do pilar, que é em formato de lenticula, com 0,15 m de largura e 0,55 m de comprimento, centrada na largura da peça e a 3,20 m da extremidade mais próxima, tal como se pode observar na figura 5.72.

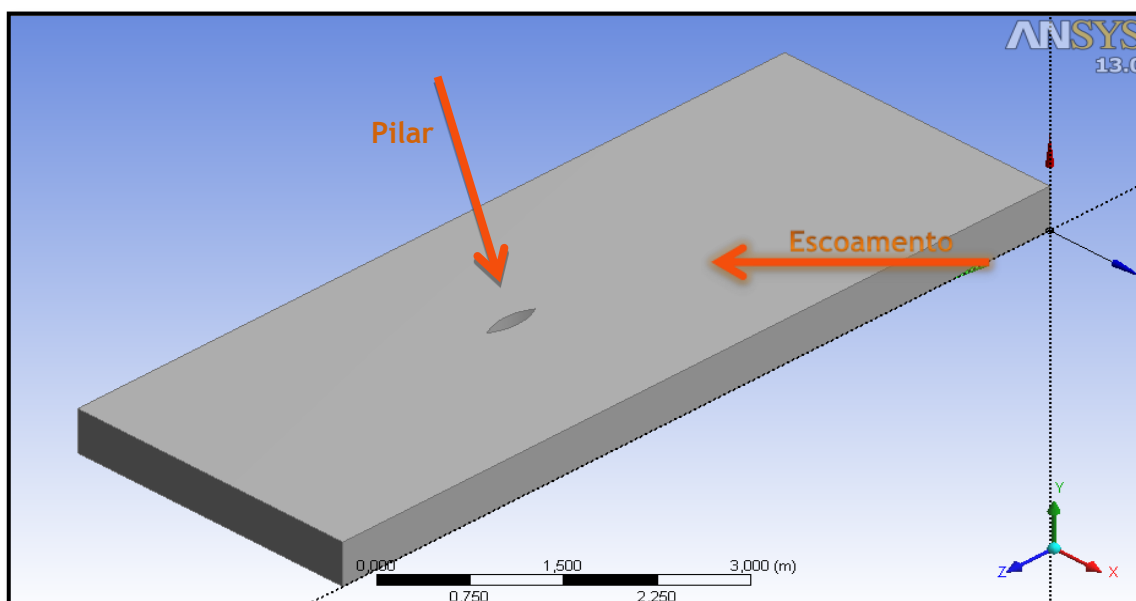


Figura 5.72- Geometria do escoamento e pilar da simulação 8

Após o *términus* do processamento, a primeira análise a realizar prende-se com a precisão desta simulação, e para isso, a consulta dos resíduos da simulação ao longo das iterações de cálculo, tal como foi abordado no capítulo anterior, é essencial. Deste modo, pode-se observar através da figura 5.73, que tal como o imposto no capítulo anterior, o valor dos resíduos das iterações de cálculo praticamente alcançam o valor imposto anteriormente.

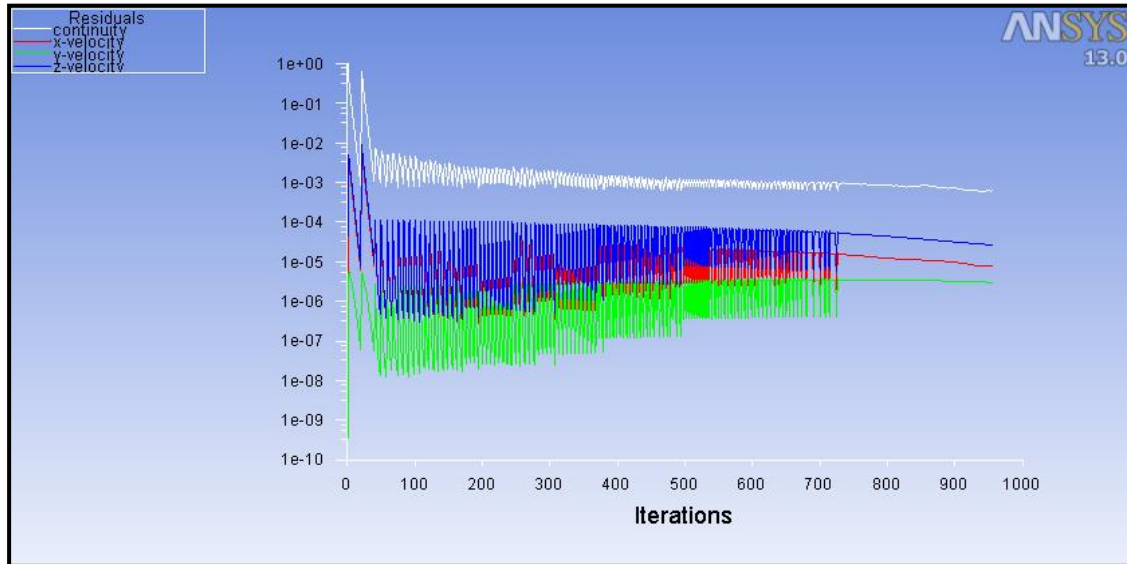


Figura 5.73 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 8

Num escoamento onde existe a presença de um obstáculo, as perturbações a esse escoamento são visíveis através da análise do seu campo de velocidades, como se pode verificar através da figura 5.74.

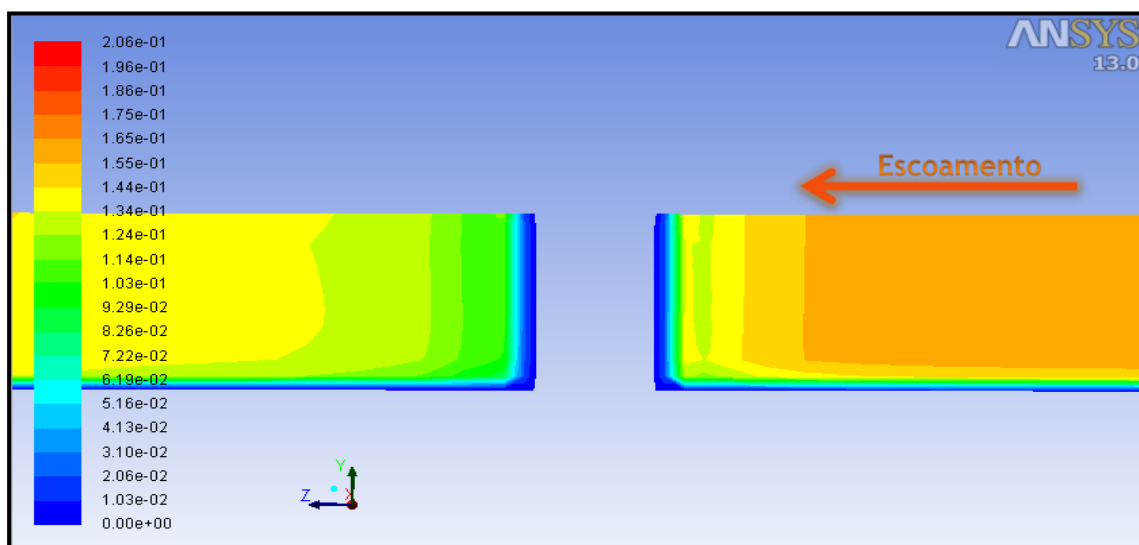


Figura 5.74 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 8

Tal como já foi referido na anterior simulação, a introdução de um obstáculo no escoamento faz com que a velocidade das suas partículas se altere, como mostra a figura 5.75. No entanto o valor com maior percentagem é de 0,16 m/s, tal como foi abordado no subcapítulo 5.2.

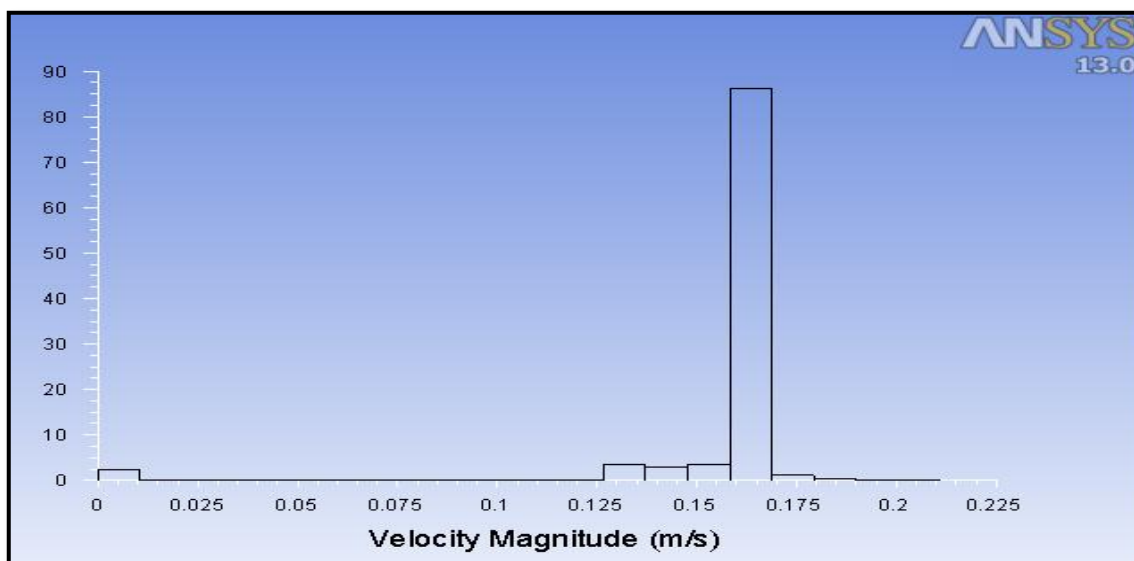


Figura 5.75 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação

8

Tal como referido na simulação anterior, o *Fluent* permite ter uma perspectiva geral, neste caso através da vista isométrica, da velocidade do escoamento, tal como se pode verificar na figura 5.76.

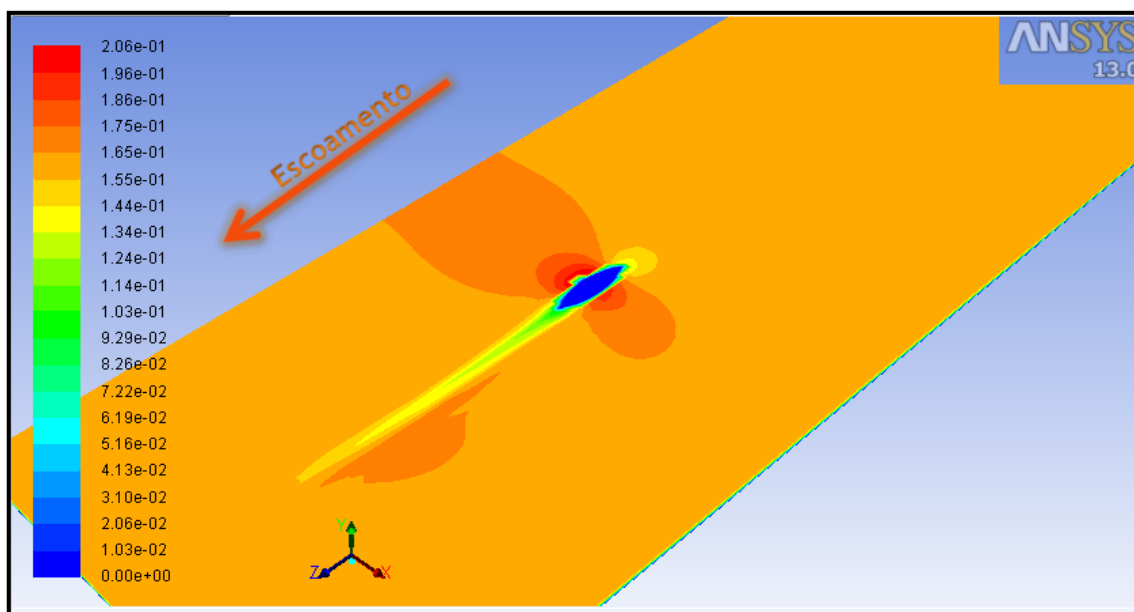


Figura 5.76 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 8

Relativamente às pressões do escoamento, e tal como já foi referido anteriormente, o *software* utilizado nas simulações permite, tal como nas velocidades, observar como variam as pressões no escoamento. Deste modo, é possível observar a pressão total e até as pressões estáticas e dinâmicas. A figura 5.77 mostra a variação da pressão total do escoamento na vista de planta.

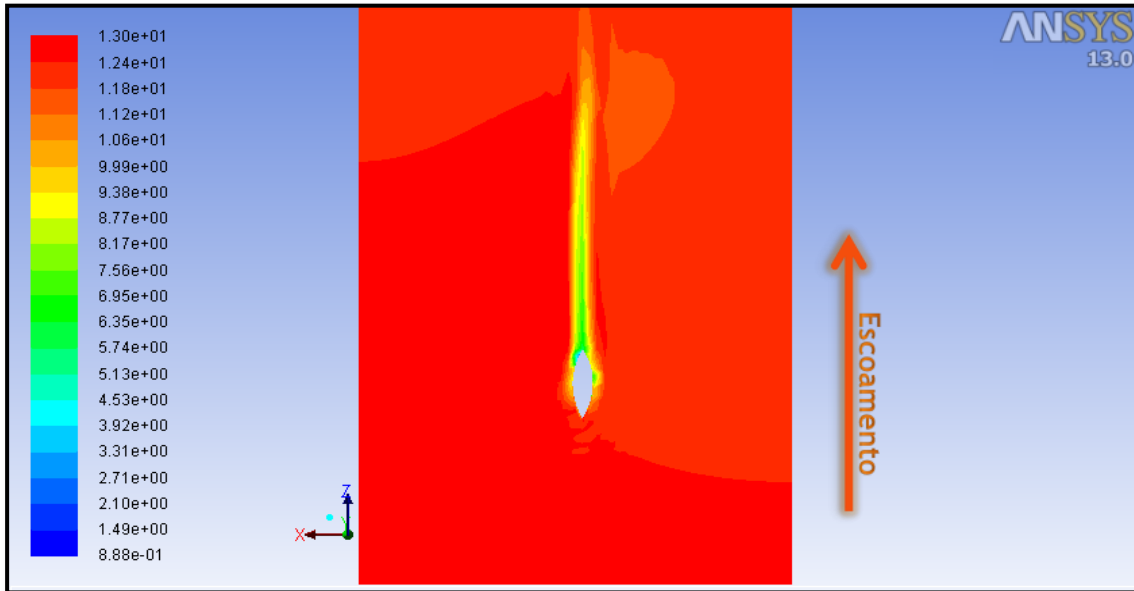


Figura 5.77 - Pressão total - vista planta - simulação 8

Através da figura 5.78 e 5.79 é possível observar a variação da pressão dinâmica e da pressão estática ao longo do eixo de simetria do escoamento.

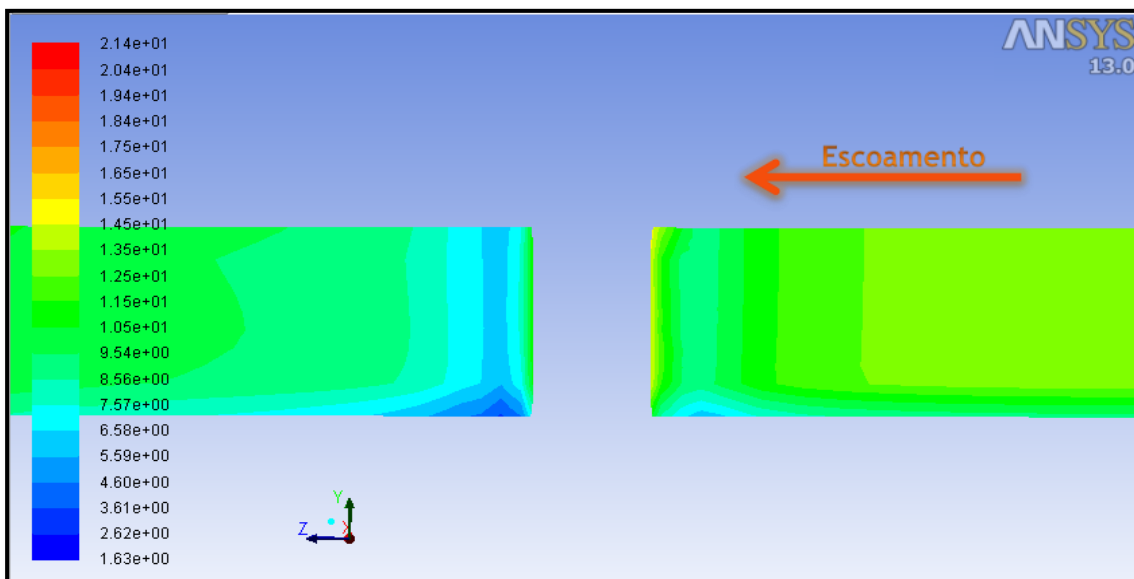


Figura 5.78- Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 8

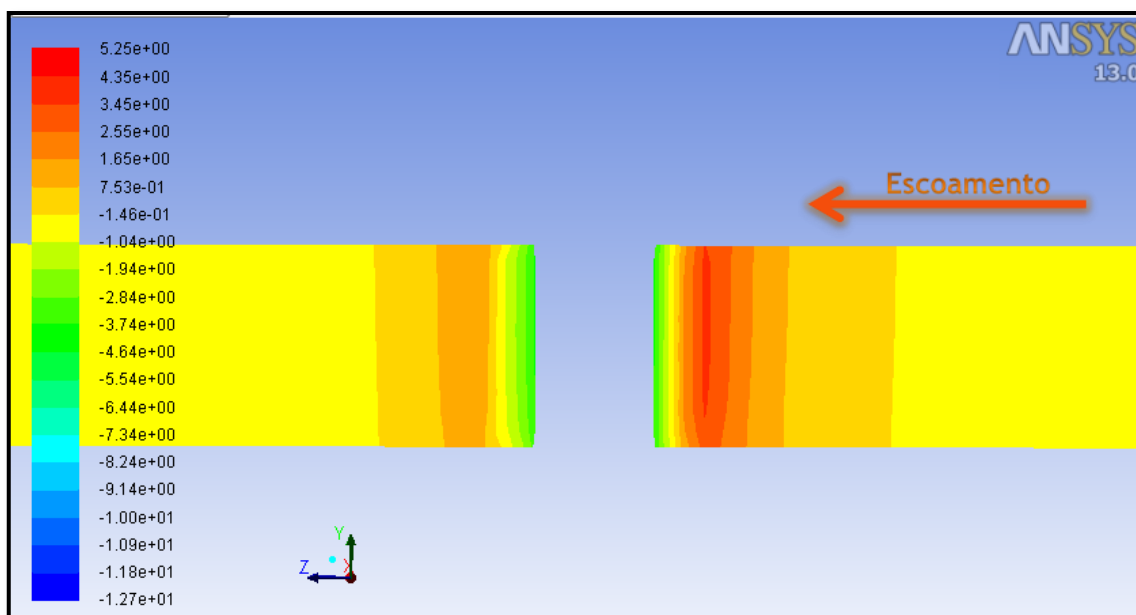


Figura 5.79 - Pressão estática - eixo simetria - simulação 8

Na figura 5.80 pode verificar-se a impulsão hidrodinâmica no pilar. Esta impulsão permite observar as pressões existentes no pilar, e obter a força de arrasto.

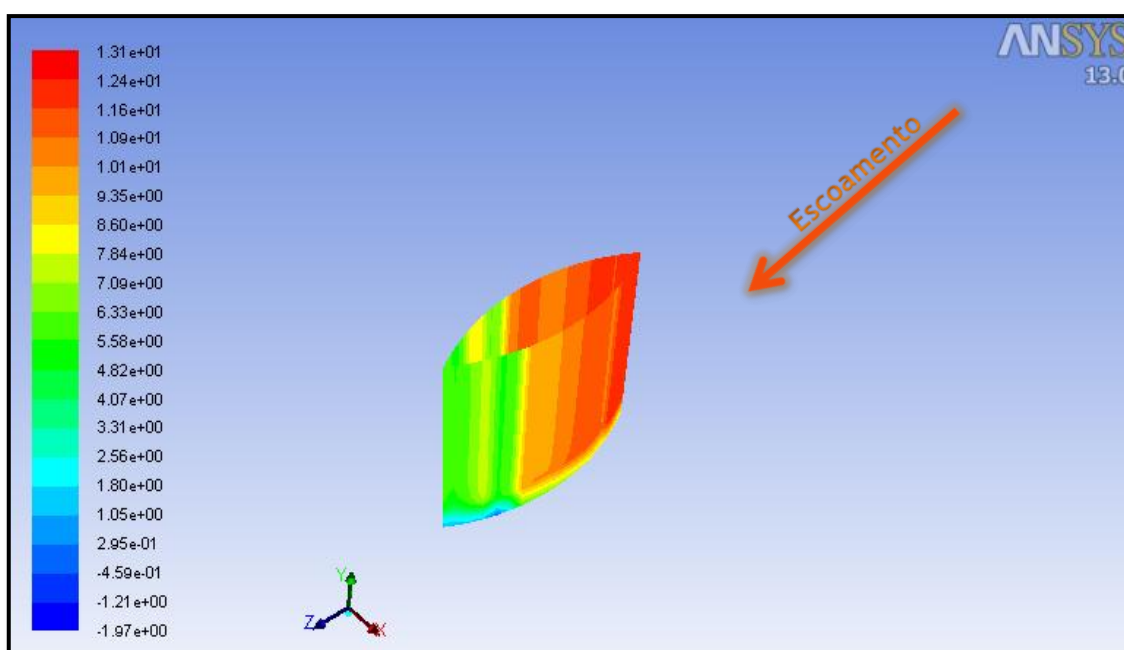


Figura 5.80 - Pressão total no pilar - simulação 8

Os valores obtidos na simulação, são os apresentados na figura 5.81, onde se pode verificar que a força de arrasto é de 0,17 N. As definições pilar 1, pilar 2, inseridas na figura 5.80 representam as quatro faces da secção, e o seu conjunto representa a totalidade do pilar.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
	Forces (n)		
Zone	Pressure	Viscous	Total
pilar1	0.049241676	0.028324201	0.077565877
pilar2	0.062441621	0.02775092	0.090192541

Net	0.1116833	0.056075121	0.16775842

Figura 5.81 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 8

Em sùmula, tal como seria expectável, a escolha deste tipo de secção transversal para estas simulações, reduziu bastante o valor da força de arrasto no pilar. Deste modo, as simulações continuam a corresponder às expectativas, com os valores da força de arrasto bem inferiores aos observados nas simulações iniciais de validação do programa, e a aproximarem-se de valores bastante reduzidos. Posto isto, é necessário entender como se comportam este tipo de secções mais aerodinâmicas com a variação do seu comprimento ou largura.

5.11 Simulação 9 - Secção transversal lenticular

Nesta simulação, foram simulados 20 segundos de escoamento que obrigou a cerca de 18 horas de processamento de dados. Esta simulação tem uma geometria do escoamento idêntica à descrita no subcapítulo anterior, com a diferença da secção do pilar, que é em formato de lenticula, com 0,15 m de largura e 0,90 m de comprimento, centrada na largura da peça e a 3,20 m da extremidade mais próxima, tal como se pode observar na figura 5.82.

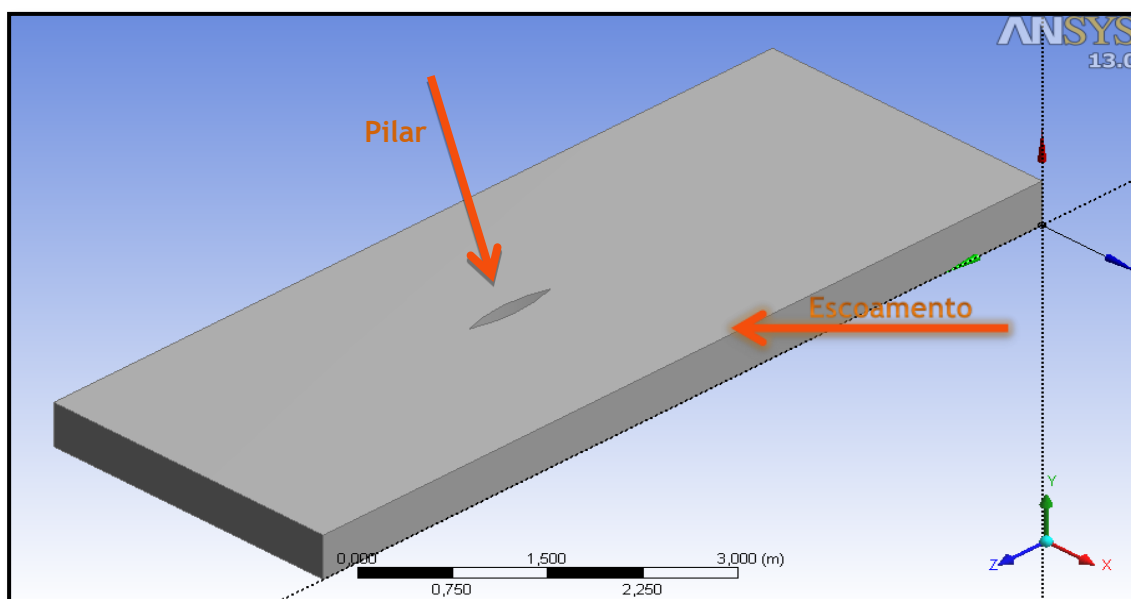


Figura 5.82 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 9

Após o *términus* do processamento, a primeira análise a realizar prende-se com a precisão desta simulação, e para isso, a consulta dos resíduos da simulação ao longo das iterações de cálculo, tal como foi abordado no capítulo anterior, é essencial. Deste modo, pode-se observar através da figura 5.83, que tal como o imposto no capítulo anterior, o valor dos resíduos das iterações de cálculo praticamente alcançam o valor imposto anteriormente.

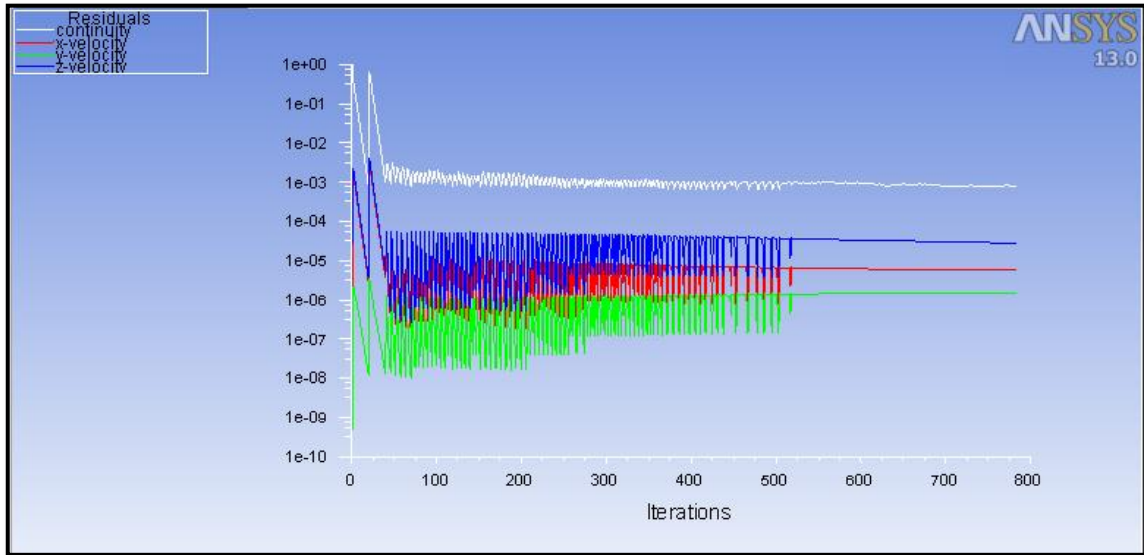


Figura 5.83 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 9

Num escoamento onde existe a presença de um obstáculo, as perturbações a esse escoamento são visíveis através da análise do seu campo de velocidades, como se pode verificar através da figura 5.84.

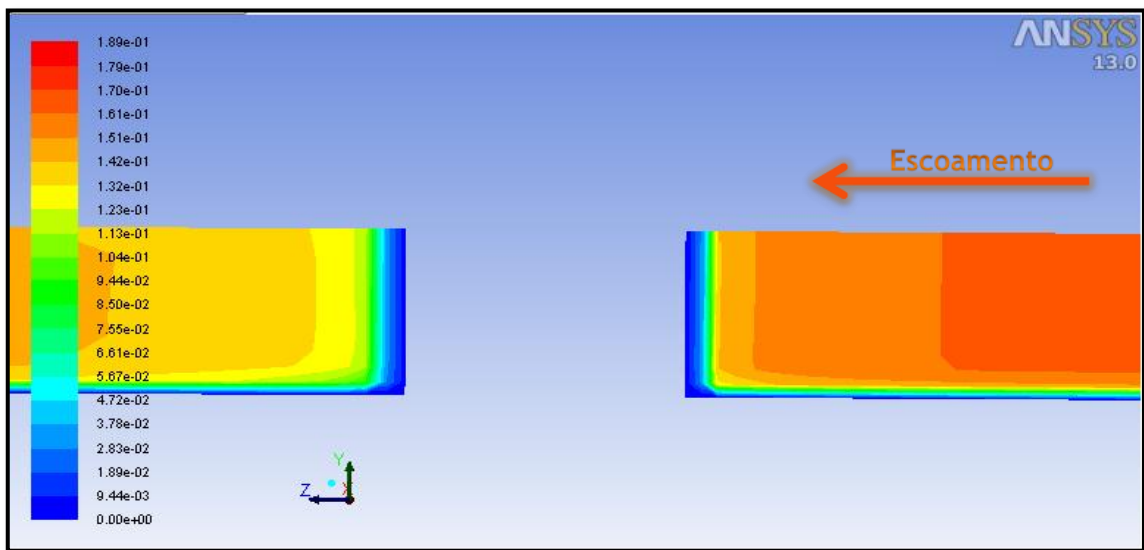


Figura 5.84 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 9

Tal como já foi referido na anterior simulação, a introdução de um obstáculo no escoamento faz com que a velocidade das suas partículas se altere, como mostra a figura 5.85. No entanto o valor com maior percentagem é de 0,16 m/s, tal como foi abordado no subcapítulo 5.2.

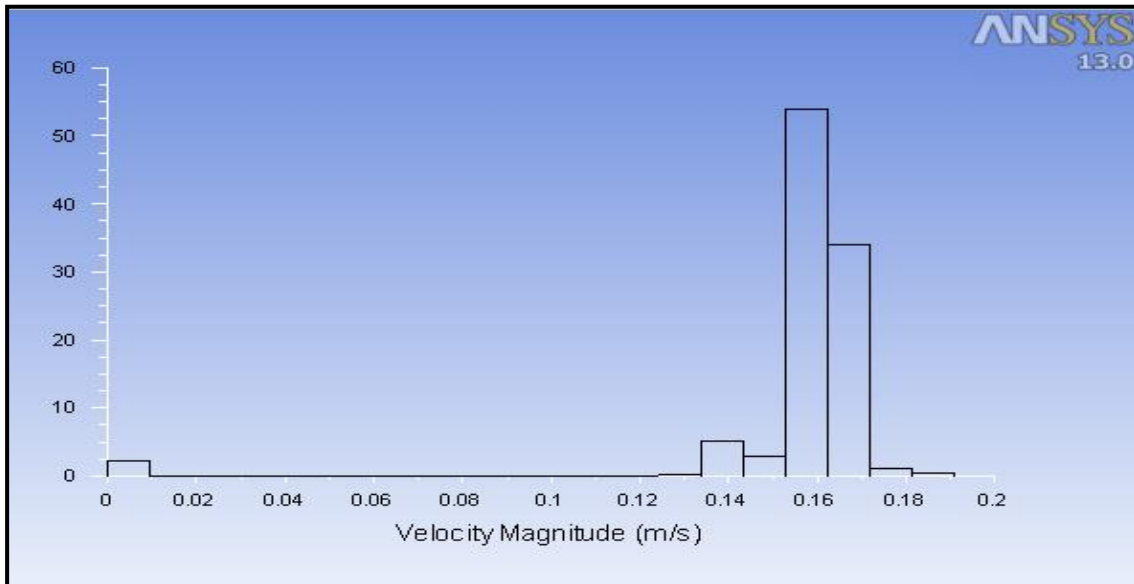


Figura 5.85 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação

9

Tal como referido na simulação anterior, o *Fluent* permite ter uma perspectiva geral, neste caso através da vista isométrica, da velocidade do escoamento, tal como se pode verificar na figura 5.86.

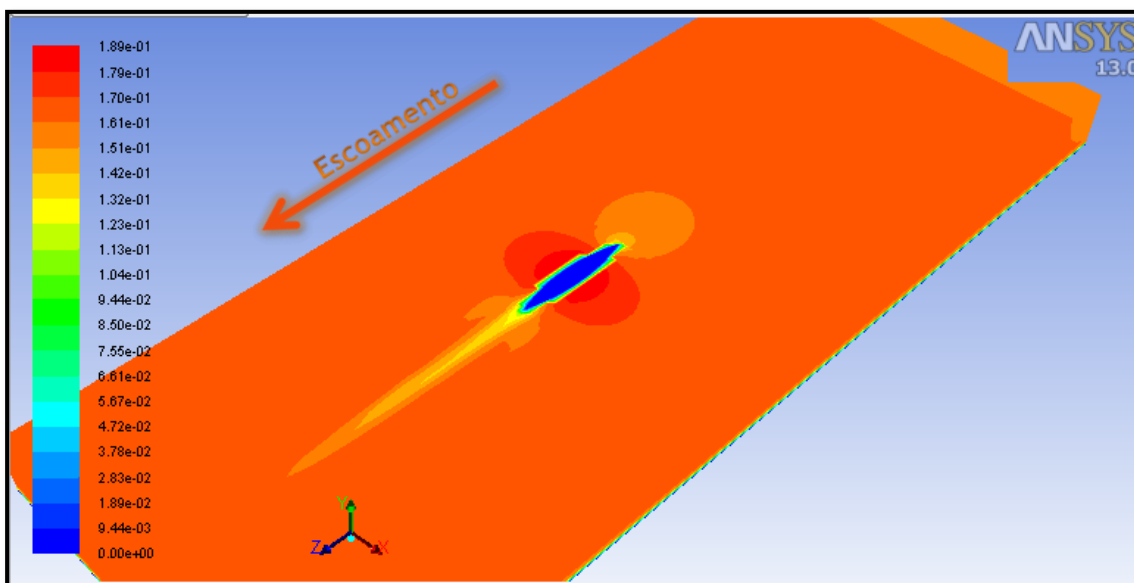


Figura 5.86 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 9

Relativamente às pressões do escoamento, e tal como já foi referido anteriormente, o software utilizado nas simulações permite, tal como nas velocidades, observar como variam as pressões no escoamento. Deste modo, é possível observar a pressão total e até as pressões estáticas e dinâmicas. A figura 5.87 mostra a variação da pressão total do escoamento na vista de planta.

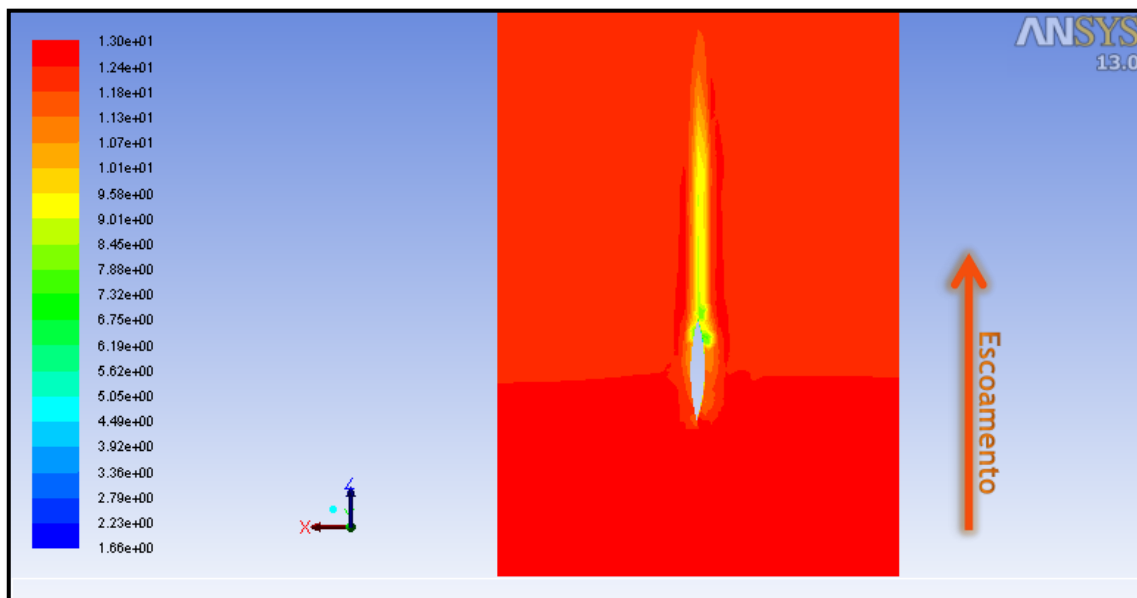


Figura 5.87 - Pressão total - vista planta - simulação 9

Através da figura 5.88 e 5.89 é possível observar a variação da pressão dinâmica e da pressão estática ao longo do eixo de simetria do escoamento.

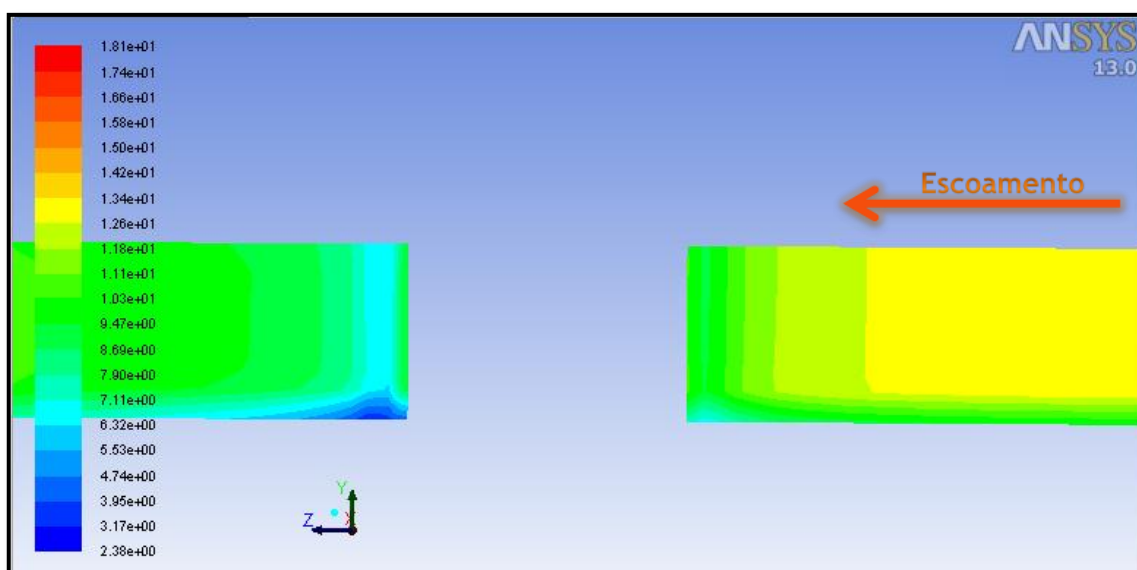


Figura 5.88- Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 9

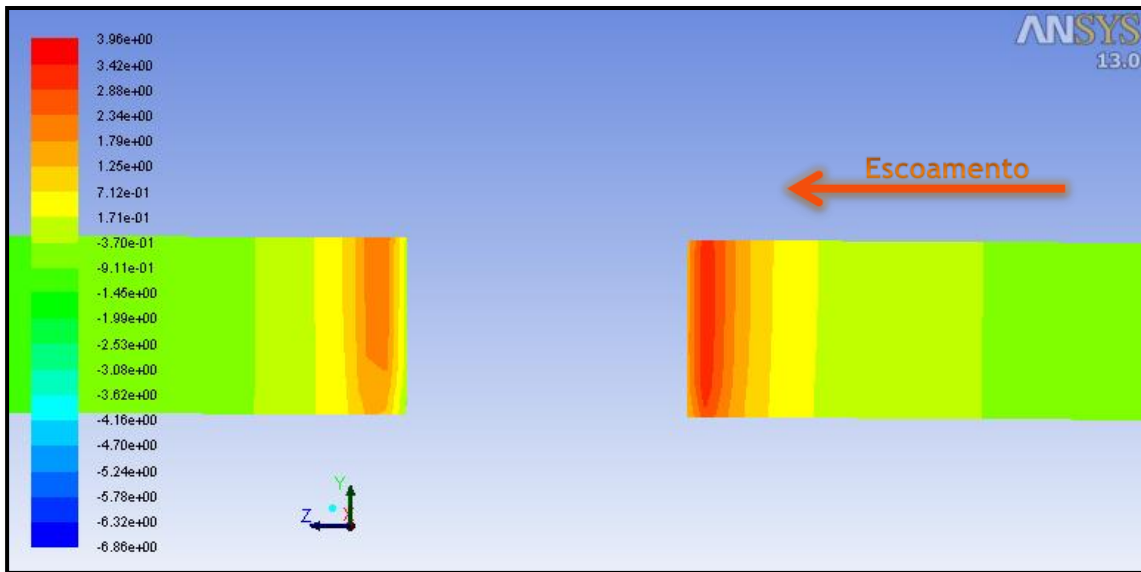


Figura 5.89 - Pressão estática - eixo simetria - simulação 9

Na figura 5.90 pode verificar-se a impulsão hidrodinâmica no pilar. Esta impulsão permite observar as pressões existentes no pilar, e obter a força de arrasto.

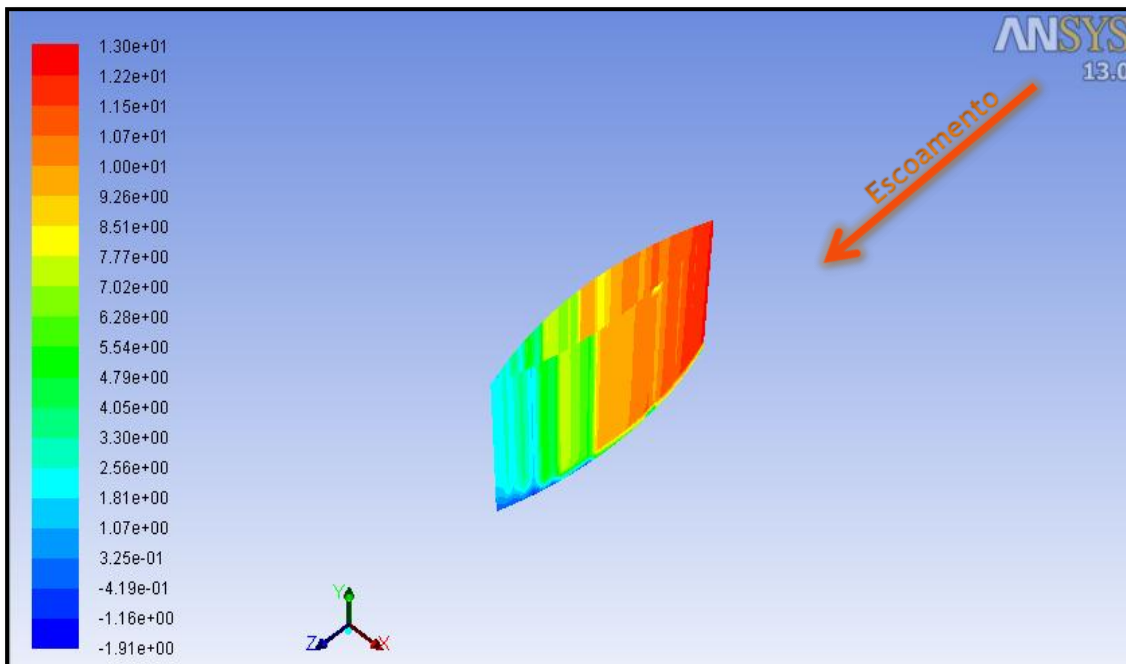


Figura 5.90 - Pressão total no pilar - simulação 9

Os valores obtidos na simulação, são os apresentados na figura 5.91, onde se pode verificar que a força de arrasto é de 0,16 N. As definições pilar 1, pilar 2, inseridas na figura 5.90 representam as quatro faces da secção, e o seu conjunto representa a totalidade do pilar.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Forces (n)		
	Pressure	Viscous	Total
pilar1	0.045276007	0.038100279	0.083376286
pilar2	0.036888051	0.038185998	0.075074049

Net	0.082164058	0.076286277	0.15845034

Figura 5.91 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 9

Concluindo esta simulação, o aumento do comprimento da peça, mantendo a sua largura quando comparada com a última simulação realizada, provoca uma diminuição do valor da força de arrasto. No entanto esta diminuição não é tao significativa, quando analisado o valor do aumento do comprimento da secção, que aumentou em mais de 50%. Assim sendo, torna-se necessário perceber o comportamento da secção, com a variação da largura.

5.12 Simulação 10 - Secção transversal lenticular

Nesta simulação, foram simulados 20 segundos de escoamento que obrigou a cerca de 20 horas de processamento de dados. Esta simulação tem uma geometria do escoamento idêntica à descrita no subcapítulo anterior, com a diferença da secção do pilar, que é em formato de lenticula, com 0,25 m de largura e 0,90 m de comprimento, centrada na largura da peça e a 3,20 m da extremidade mais próxima, tal como se pode observar na figura 5.92.

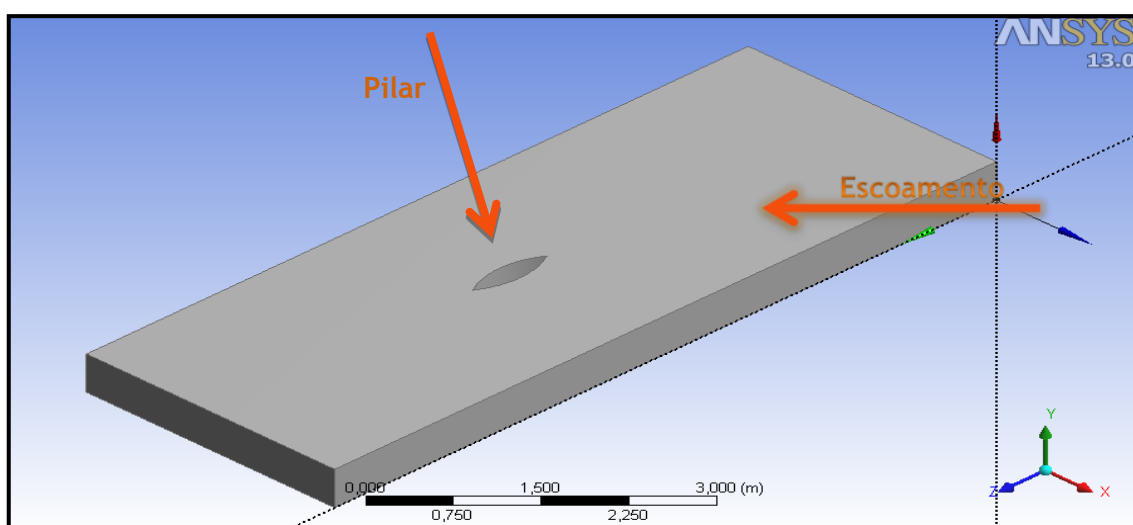


Figura 5.92 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 10

Após o *términus* do processamento, a primeira análise a realizar prende-se com a precisão desta simulação, e para isso, a consulta dos resíduos da simulação ao longo das iterações de cálculo, tal como foi abordado no capítulo anterior, é essencial. Deste modo, pode-se observar através da figura 5.93, que tal como o imposto no capítulo anterior, o valor dos resíduos das iterações de cálculo praticamente alcançam o valor imposto anteriormente.

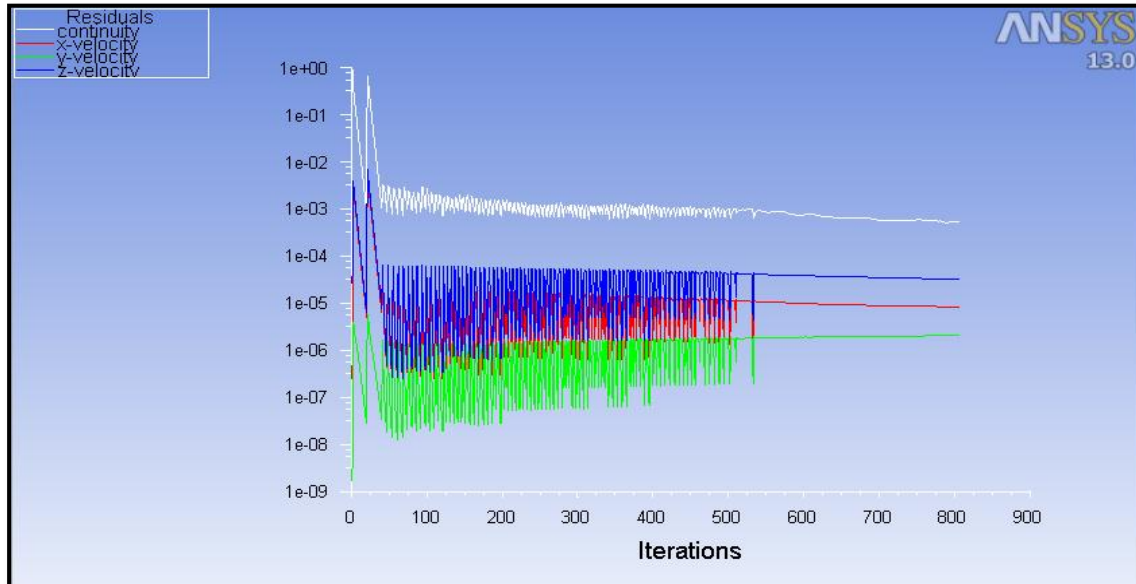


Figura 5.93 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 10

Num escoamento onde existe a presença de um obstáculo, as perturbações a esse escoamento são visíveis através da análise do seu campo de velocidades, como se pode verificar através da figura 5.94.

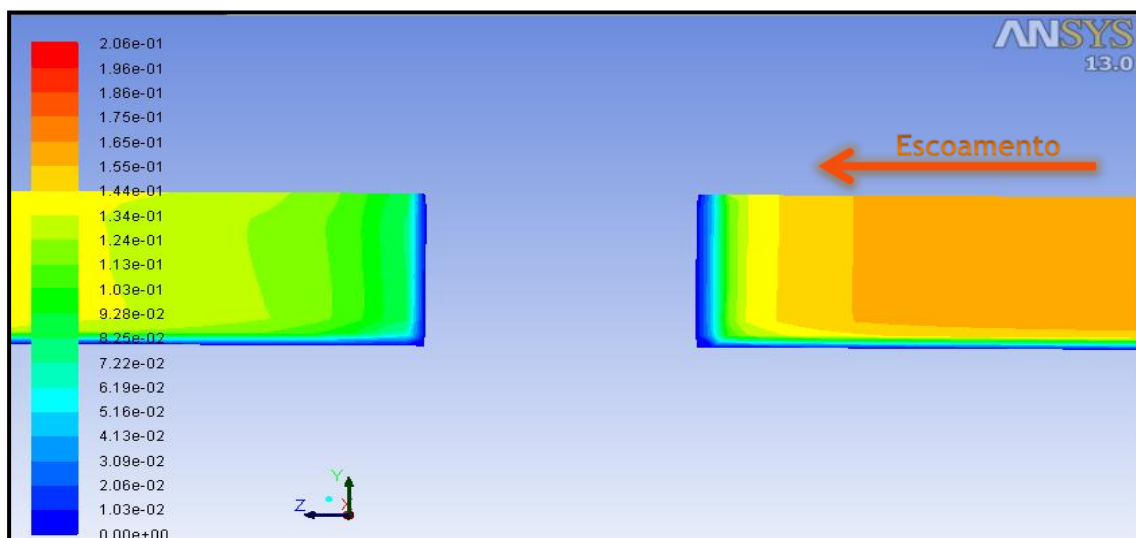


Figura 5.94 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 10

Tal como já foi referido na anterior simulação, a introdução de um obstáculo no escoamento faz com que a velocidade das suas partículas se altere, como mostra a figura 5.95. No entanto o valor com maior percentagem é de 0,16 m/s, tal como foi abordado no subcapítulo 5.2.

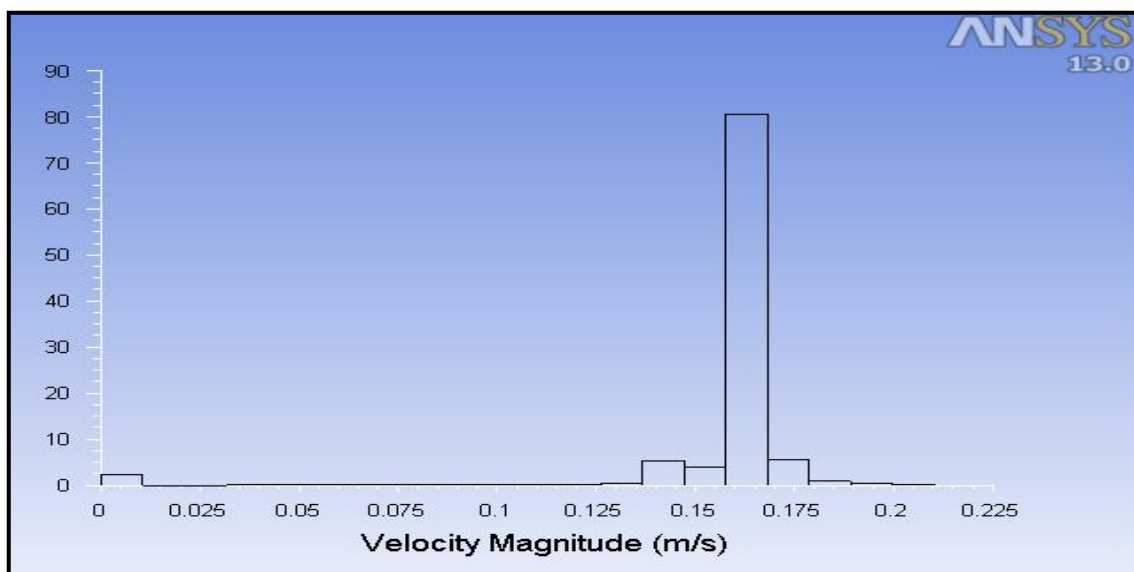


Figura 5.95 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação 10

Tal como referido na simulação anterior, o *Fluent* permite ter uma perspectiva geral, neste caso através da vista isométrica, da velocidade do escoamento, tal como se pode verificar na figura 5.96.

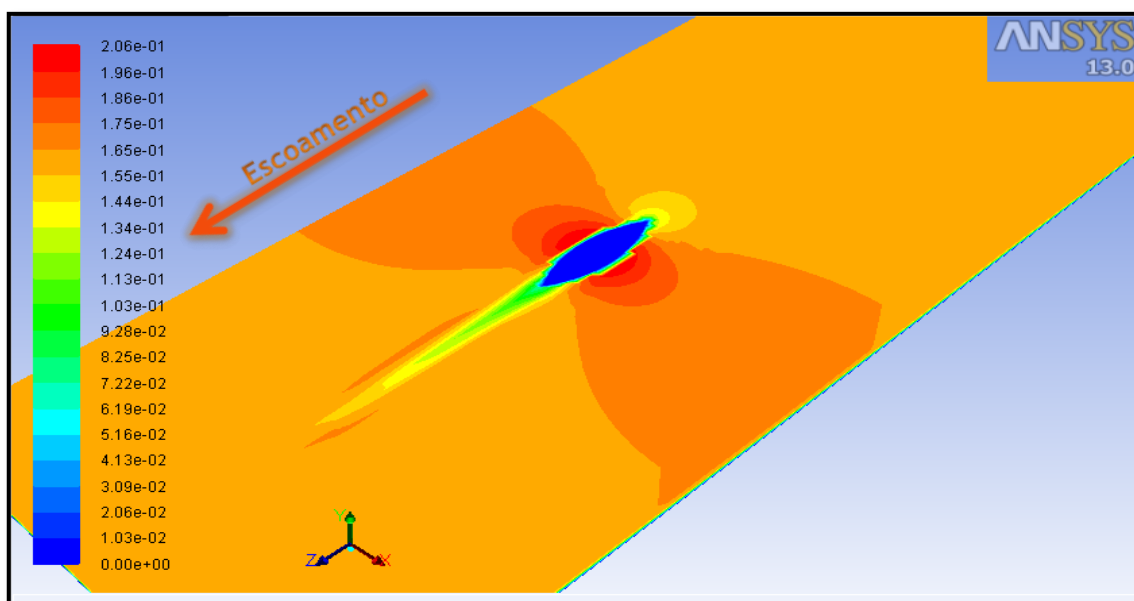


Figura 5.96 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 10

Relativamente às pressões do escoamento, e tal como já foi referido anteriormente, o *software* utilizado nas simulações permite, tal como nas velocidades, observar como variam as pressões no escoamento. Deste modo, é possível observar a pressão total e até as pressões estáticas e dinâmicas. A figura 5.97 mostra a variação da pressão total do escoamento na vista de planta.

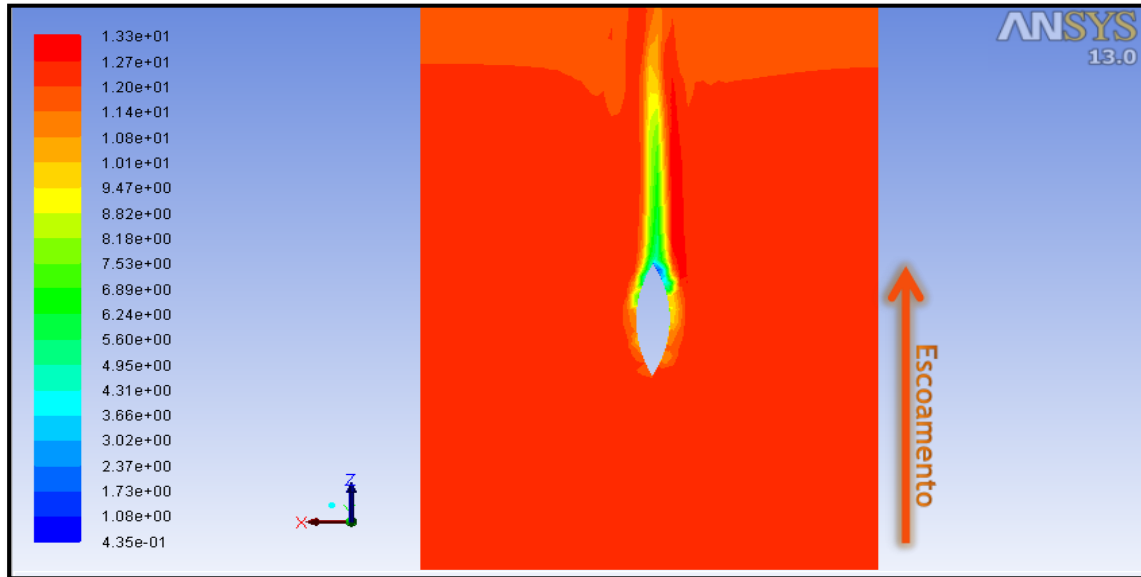


Figura 5.97 - Pressão total - vista planta - simulação 10

Através da figura 5.98e 5.99 é possível observar a variação da pressão dinâmica e da pressão estática ao longo do eixo de simetria do escoamento.

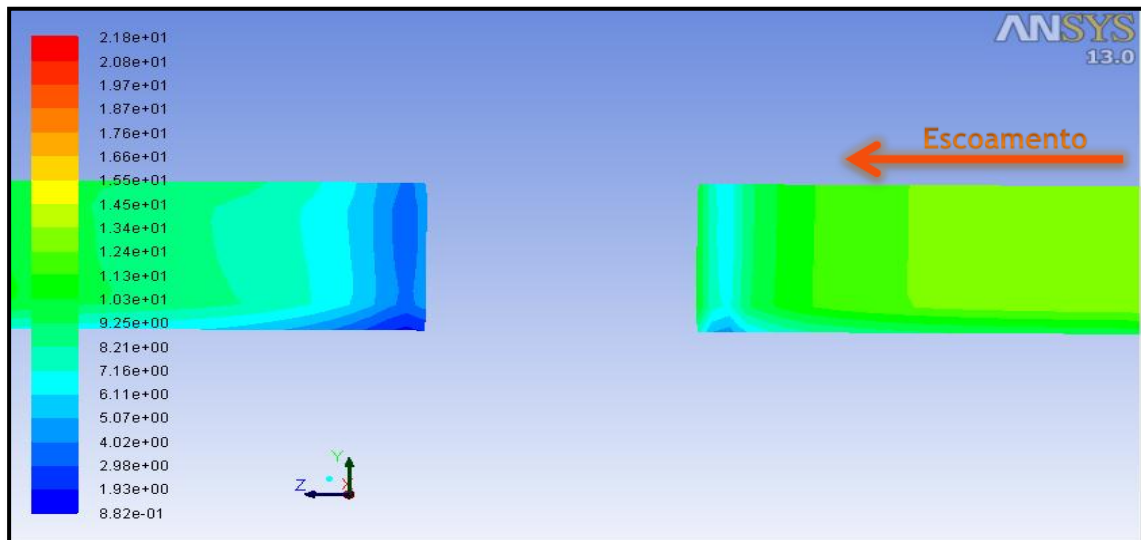


Figura 5.98- Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 10

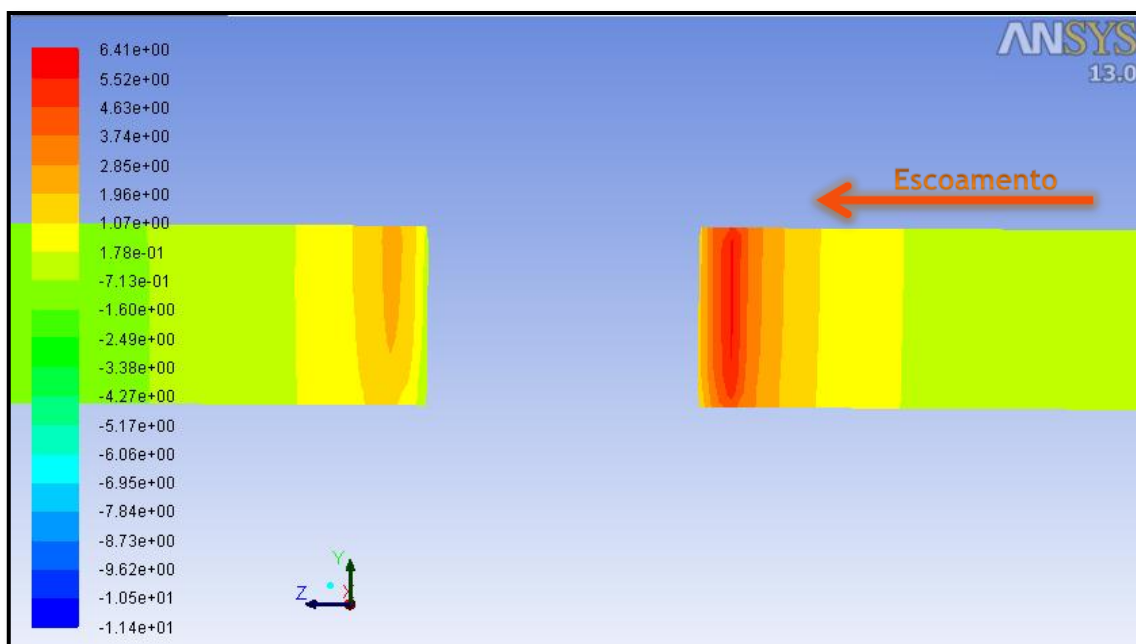


Figura 5.99 - Pressão estática - eixo simetria - simulação 10

Na figura 5.100 pode verificar-se a impulsão hidrodinâmica no pilar. Esta impulsão permite observar as pressões existentes no pilar, e obter a força de arrasto.

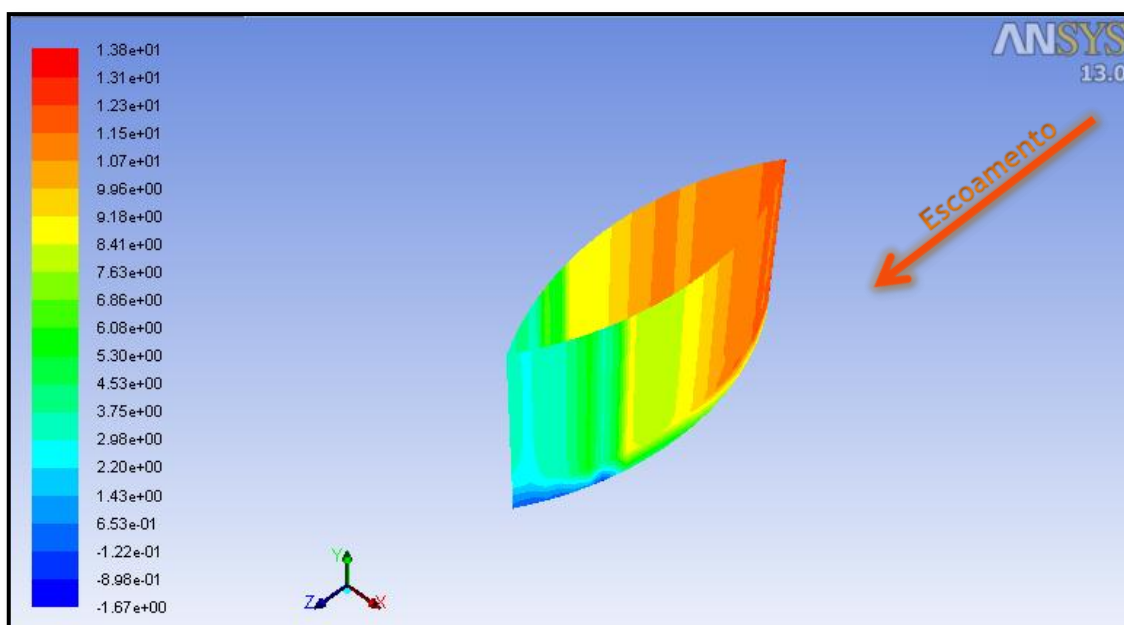


Figura 5.100 - Pressão total no pilar - simulação 10

Os valores obtidos na simulação, são os apresentados na figura 5.101, onde se pode verificar que a força de arrasto é de 0,27 N. As definições pilar 1, pilar 2, inseridas na figura 5.100 representam as quatro faces da secção, e o seu conjunto representa a totalidade do pilar.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Pressure	Viscous	Total
pilar1	0.10539577	0.03885183	0.1442476
pilar2	0.08743855	0.039694627	0.12713318

Net	0.19283432	0.078546457	0.27138078

Figura 5.101 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 10

Em síntese, para esta simulação, manteve-se o último comprimento utilizado e aumentou-se em valor considerável a sua largura. Isto provocou com que o valor da força de arrasto também aumentasse, o que é compreensível, pois a área projectada da secção, aumentou em grande escala. No entanto, é necessário por fim, entender como varia esta mesma secção reduzindo o seu comprimento.

5.13 Simulação 11 - Secção transversal lenticular

Nesta simulação, foram simulados 20 segundos de escoamento que obrigou a cerca de 20 horas de processamento de dados. Esta simulação tem uma geometria do escoamento idêntica à descrita no subcapítulo anterior, com a diferença da secção do pilar, que é em formato de lenticula, com 0,25 m de largura e 0,55 m de comprimento, centrada na largura da peça e a 3,20 m da extremidade mais próxima, tal como se pode observar na figura 5.102.

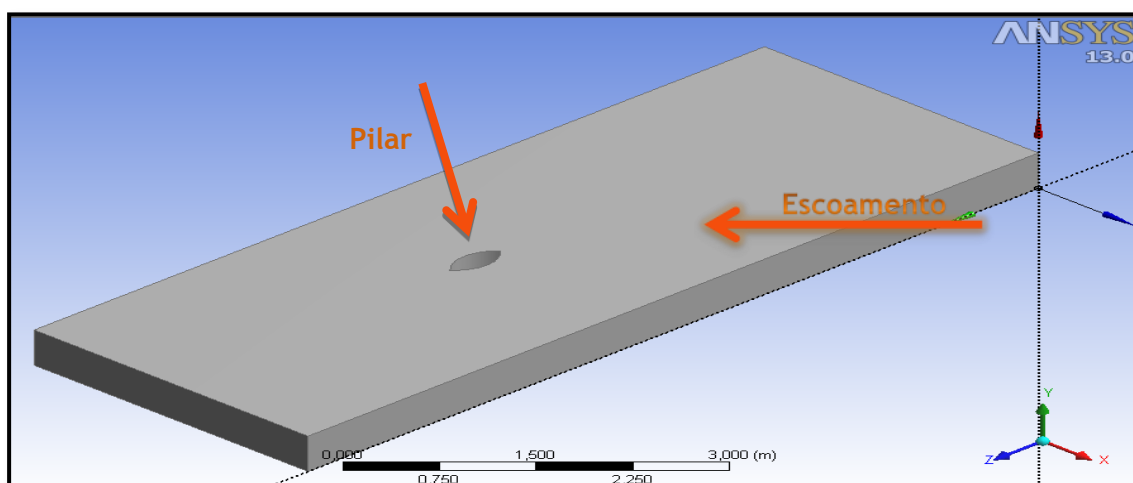


Figura 5.102 - Geometria do escoamento e pilar da simulação 11

Após o *términus* do processamento, a primeira análise a realizar prende-se com a precisão desta simulação, e para isso, a consulta dos resíduos da simulação ao longo das iterações de cálculo, tal como foi abordado no capítulo anterior, é essencial. Deste modo, pode-se

observar através da figura 5.103, que tal como o imposto no capítulo anterior, o valor dos resíduos das iterações de cálculo praticamente alcançam o valor imposto anteriormente.

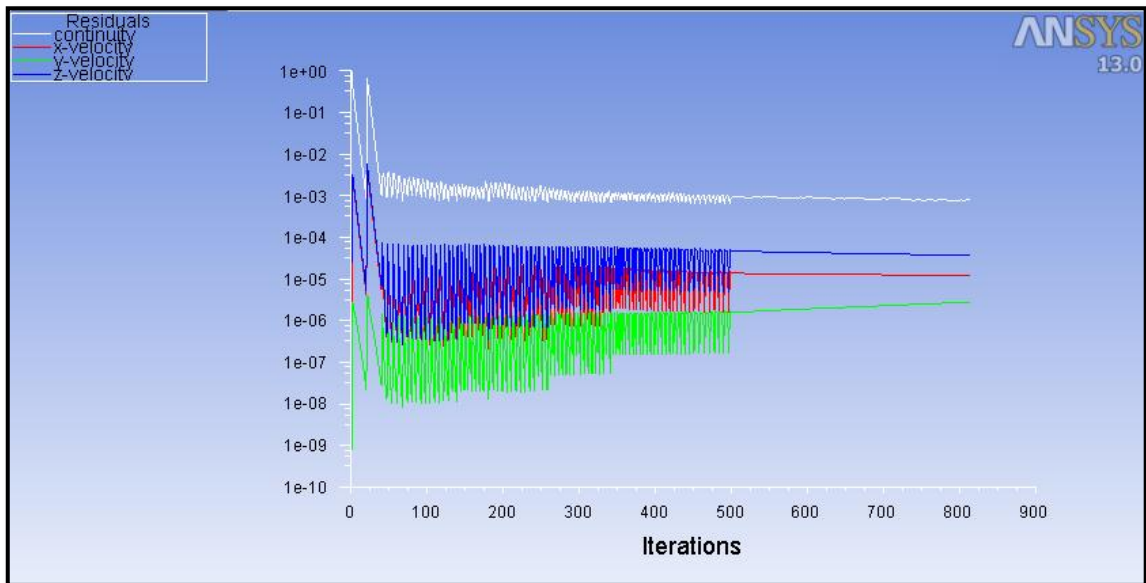


Figura 5.103 - Variação dos resíduos ao longo das iterações de cálculo - simulação 11

Num escoamento onde existe a presença de um obstáculo, as perturbações a esse escoamento são visíveis através da análise do seu campo de velocidades, como se pode verificar através da figura 5.104.

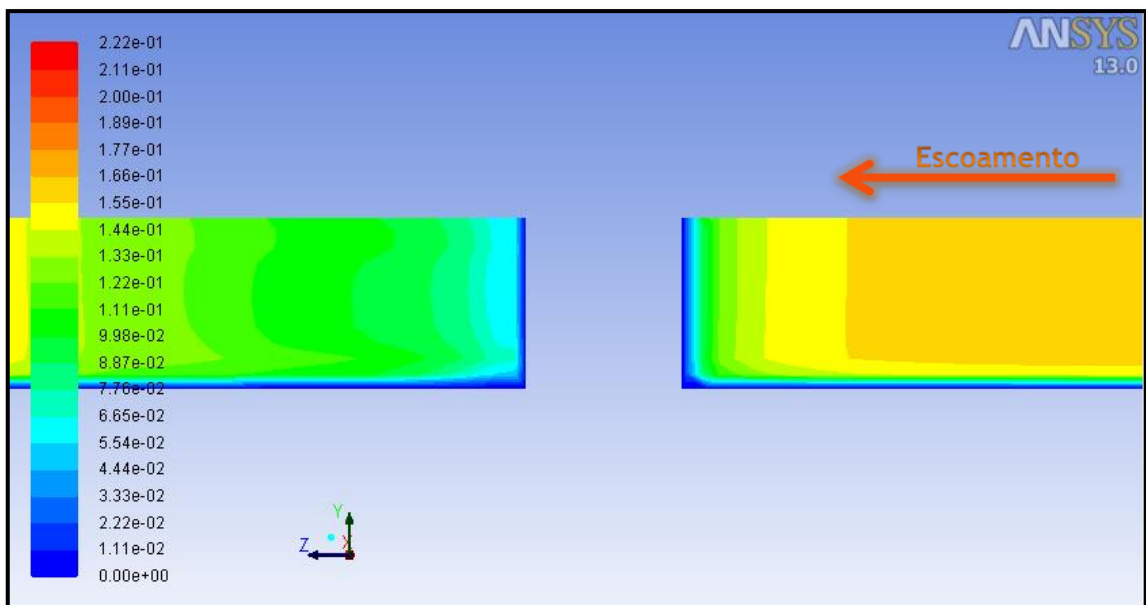


Figura 5.104 - Campo de velocidades - eixo de simetria - simulação 11

Tal como já foi referido na anterior simulação, a introdução de um obstáculo no escoamento faz com que a velocidade das suas partículas se altere, como mostra a figura 5.105. No entanto o valor com maior percentagem é de 0,16 m/s, tal como foi abordado no subcapítulo 5.2.

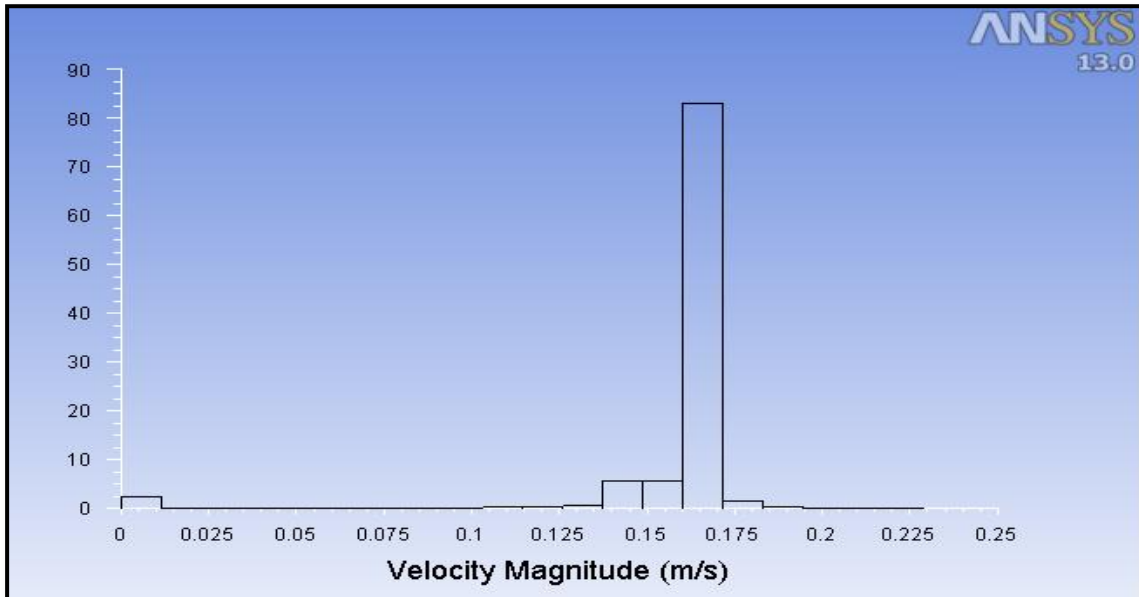


Figura 5.105 - Distribuição percentual da velocidade das partículas do escoamento - simulação

11

Tal como referido na simulação anterior, o *Fluent* permite ter uma perspectiva geral, neste caso através da vista isométrica, da velocidade do escoamento, tal como se pode verificar na figura 5.106.

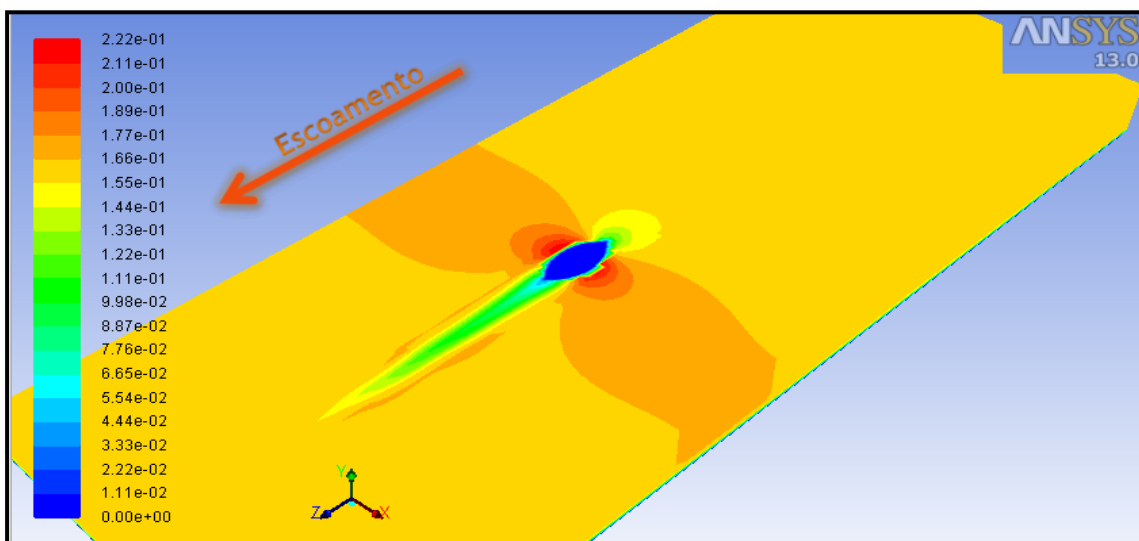


Figura 5.106 - Velocidade total - vista isométrica - simulação 11

Relativamente às pressões do escoamento, e tal como já foi referido anteriormente, o *software* utilizado nas simulações permite, tal como nas velocidades, observar como variam as pressões no escoamento. Deste modo, é possível observar a pressão total e até as pressões estáticas e dinâmicas. A figura 5.107 mostra a variação da pressão total do escoamento na vista de planta.

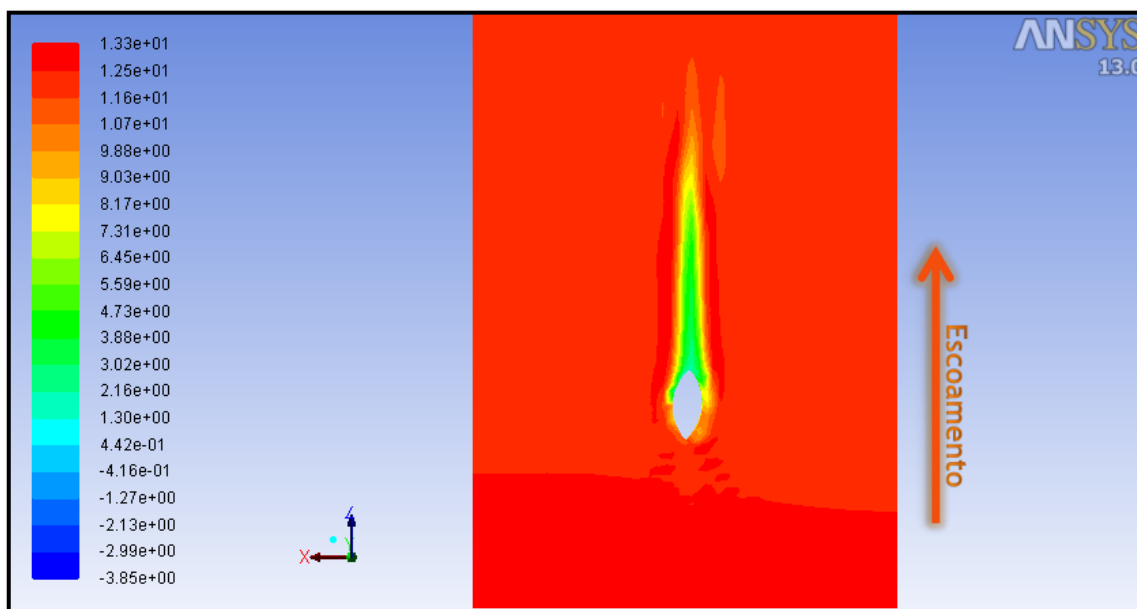


Figura 5.107 - Pressão total - vista planta - simulação 11

Através da figura 5.108 e 5.109 é possível observar a variação da pressão dinâmica e da pressão estática ao longo do eixo de simetria do escoamento.

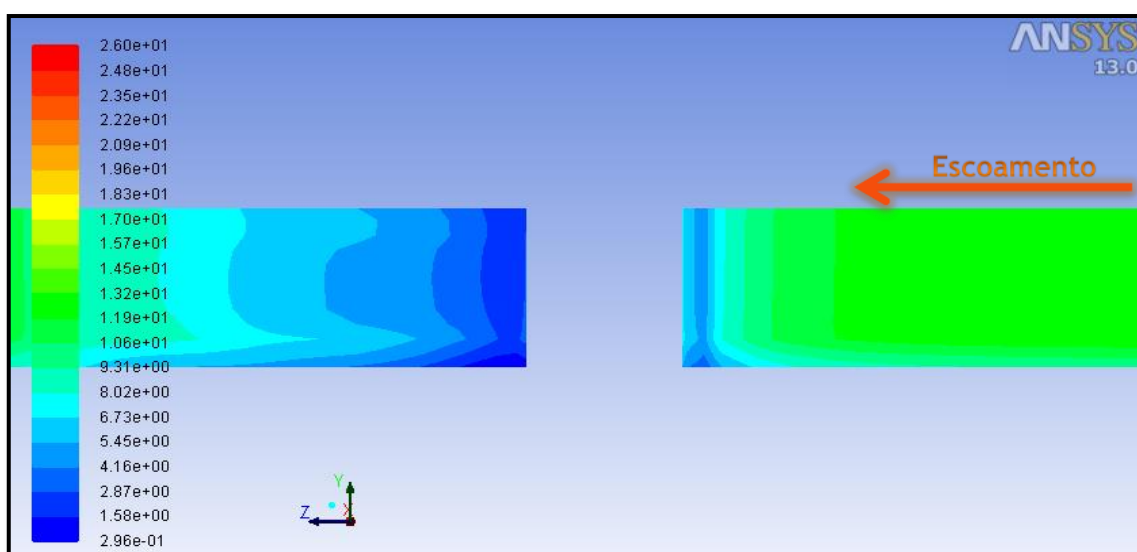


Figura 5.108- Pressão dinâmica - eixo de simetria - simulação 11

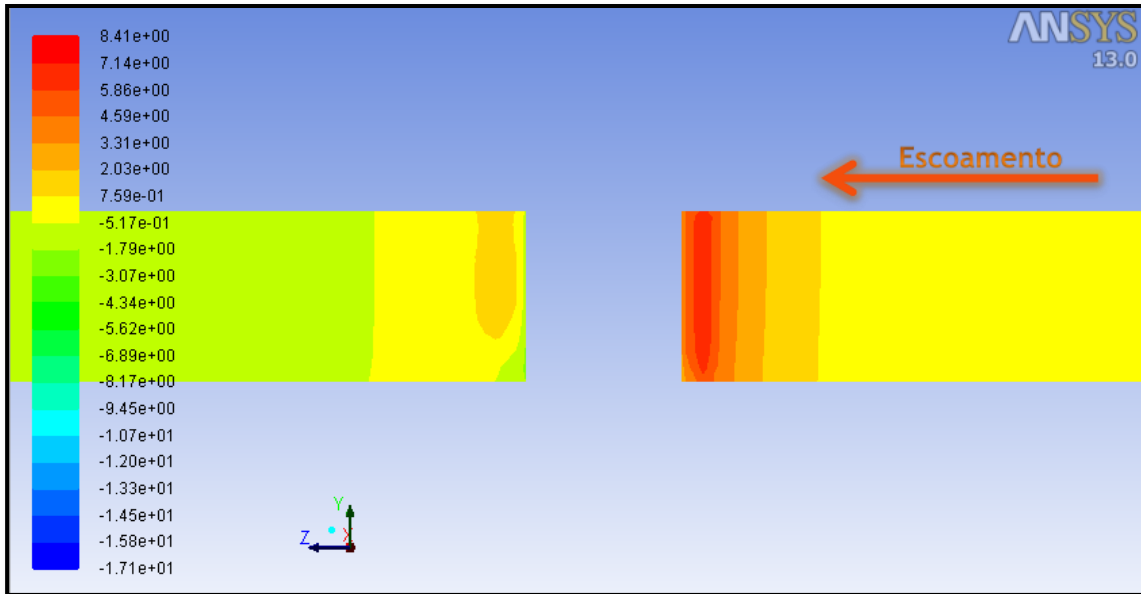


Figura 5.109 - Pressão estática - eixo simetria - simulação 11

Na figura 5.110 pode verificar-se a impulsão hidrodinâmica no pilar. Esta impulsão permite observar as pressões existentes no pilar, e obter a força de arrasto.

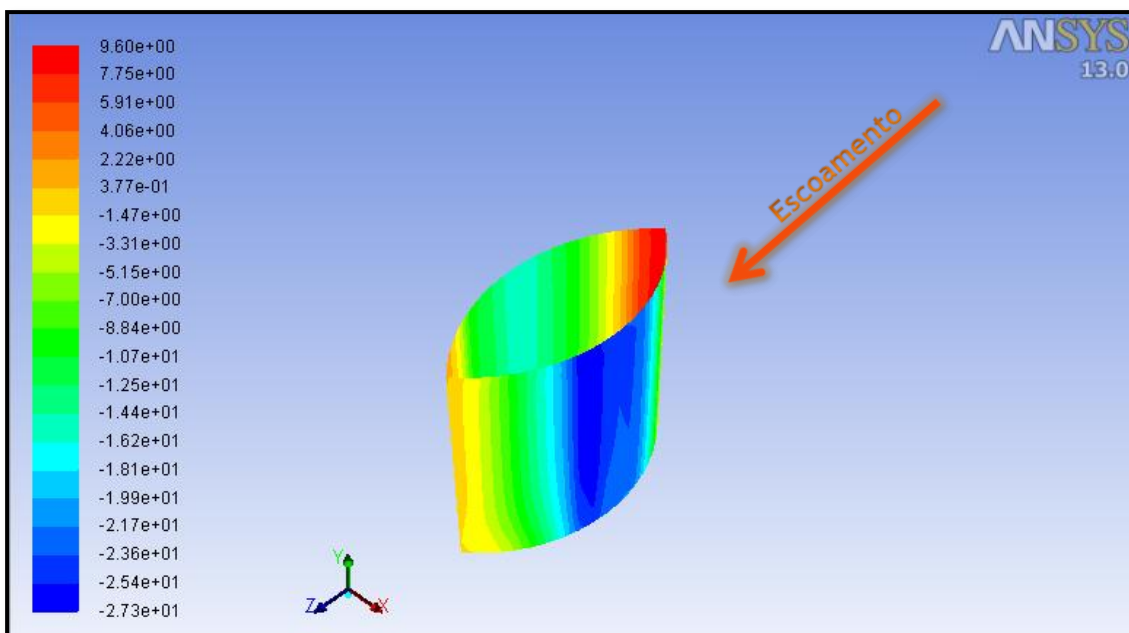


Figura 5.110 - Pressão total no pilar - simulação 11

Os valores obtidos na simulação são os apresentados na figura 5.111, onde se pode verificar que a força de arrasto é de 0,47 N. As definições pilar 1, pilar 2, inseridas na figura 5.110 representam as quatro faces da secção, e o seu conjunto representa a totalidade do pilar.

Forces - Direction Vector (0 0 1)			
Zone	Forces (n)		
	Pressure	Viscous	Total
pilar1	0.23588679	0.026965175	0.26285196
pilar2	0.17936368	0.024839035	0.20420271

Net	0.41525047	0.05180421	0.46705468

Figura 5.111 - Resultado da força de arrasto no pilar - simulação 11

Concluindo, observa-se que com a redução do valor do comprimento da secção quando comparado com o valor do comprimento na última simulação, provocou um aumento do valor da força de arrasto. Reduzindo o comprimento da secção do pilar testada, e mantendo o mesmo diâmetro da última secção simulada, o valor da força de arrasto aumenta, quando comparado com esta última simulação. No entanto, de referir que apesar deste último valor da força de arrasto aumentar quando comparado com o valor obtido na última simulação, este valor, continua a ser inferior aos valores obtidos com as primeiras duas simulações.

5.14 Resultados finais

Neste subcapítulo compilam-se e comparam-se os resultados obtidos nas diversas simulações, permitindo relacionar as forças de arrasto obtidas com as dimensões da secção transversal dos pilares simulados. Para além disso, é possível relacionar a força de arrasto simulada para as secções circular e quadrada com os respectivos valores extraídos da bibliografia analisada.

Na tabela 5.3 apresentam-se os resultados obtidos nas diferentes simulações bem como as dimensões das secções transversais dos pilares. De modo a permitir uma fácil visualização, os mesmos resultados encontram-se ilustrados na figura 5.113. A análise da tabela 5.3 e da figura 5.113 permite constatar que a simulação que apresenta maior força de arrasto corresponde à secção transversal quadrada (simulação 4), com $F_D = 1,27$ N, e a que apresenta menor força de arrasto corresponde à secção transversal em lenticula (simulação 9), com $F_D = 0,16$ N. Tendo presente que a área projectada na direcção perpendicular ao escoamento é a mesma, pode concluir-se que a secção transversal em forma de lenticula é mais eficiente na redução da força de arrasto. Na figura 5.112, apresentam-se os valores da força de arrasto obtidos para as simulações utilizadas com o objectivo de validar a utilização da malha adoptada. Através da análise desta figura é possível concluir que apesar da grande diferença dos valores do número de elementos constituintes da malha, os resultados obtidos

para a força de arrasto são muito próximos, pelo que o número de elementos da malha é um valor importante mas que pode ser trabalhado e analisado de forma a poder ser reduzido e por consequência reduzir o tempo de processamento de cada simulação. Nesta figura a simulação intitulada 3 a), representa a simulação com 10 vezes mais elementos constituintes da malha em comparação com a simulação 2.

Secções de pilares vs Força de arrasto			
	Largura [m]	Comprimento [m]	Força de arrasto (N)
Simulação 1	0,15	0,15	1,05
Simulação 2	0,15	0,15	1,0
Simulação 3	0,15	0,15	1,11
Simulação 4	0,15	0,15	1,27
Simulação 5	0,15	0,55	0,71
Simulação 6	0,15	0,55	0,64
Simulação 7	0,15	0,55	0,56
Simulação 8	0,15	0,55	0,17
Simulação 9	0,15	0,90	0,16
Simulação 10	0,25	0,90	0,27
Simulação 11	0,25	0,55	0,47

Tabela 5.3 - Resultados finais da força de arrasto vs dimensões dos pilares

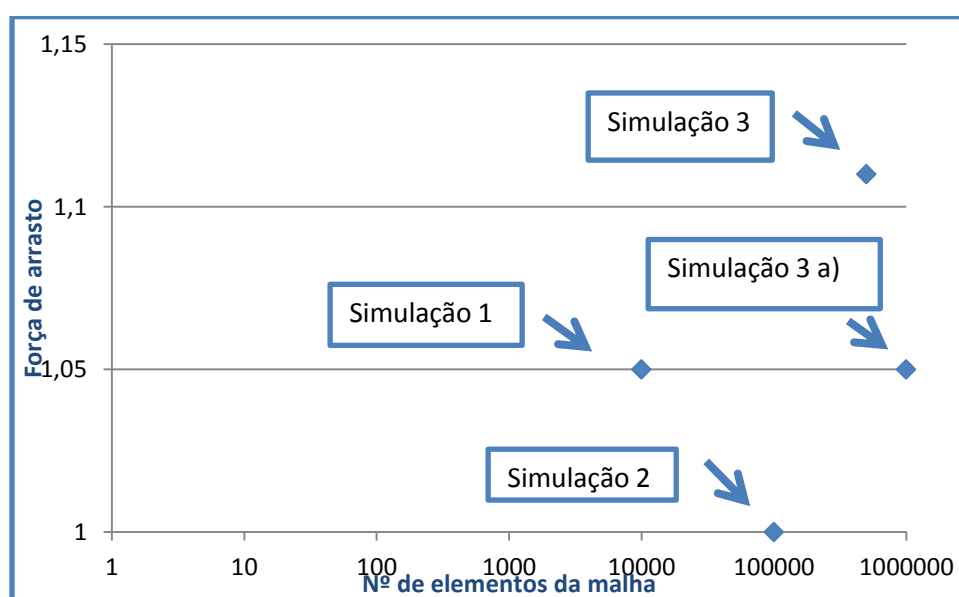


Figura 5.112 - Força de arrasto vs Nº de elementos da malha

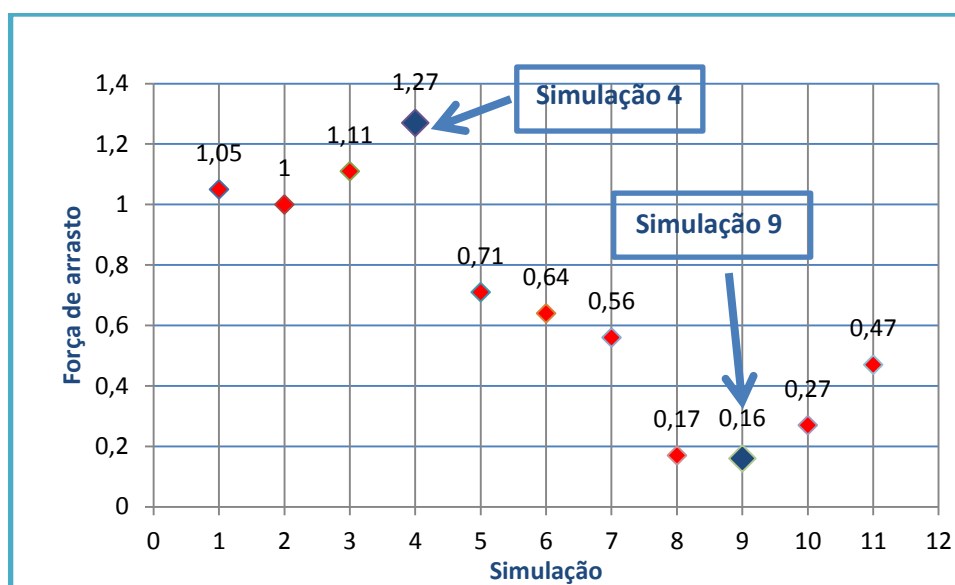


Figura 5.113 - Força de arrasto da simulação vs número da simulação

Tal como já foi referido anteriormente, as simulações 1 e 4 realizadas, tinham como objectivo validar o *software* utilizado nas simulações. Neste sentido, os resultados obtidos nas simulações foram comparados com os valores compilados na literatura de White (2011). Porém, os valores obtidos nas simulações quando comparados com os valores expostos na literatura de Azevedo (2011) estão muito mais próximos, o que só demonstra que as simulações apresentam valores coerentes e seguros de ser adoptados. A análise dos valores obtidos pelas simulações, com os valores sugeridos por White (2011) encontra-se ilustrada na figura 5.114. Caso os valores obtidos através das simulações fossem exactamente iguais aos compilados na literatura os valores deveriam encontrar-se sobrepostos sobre a linha traçada na diagonal do gráfico, a 45°. No entanto, e como pode observar-se através da visualização do gráfico, estes valores situam-se abaixo dessa linha, traduzindo o maior valor da força de arrasto obtido nas simulações quando comparado com o valor obtido teoricamente. Ainda assim, facilmente se percebe a proximidade desses valores em relação à referida linha de referência, pelo que se pode considerar a validação do *software*. É ainda possível concluir que os valores da força de arrasto obtidos pela simulação numérica estão para efeitos de projecto do lado da segurança, uma vez que os valores obtidos pelas simulações numéricas são ligeiramente superiores aos valores extraídos da literatura.

As simulações cujos resultados obtidos para a força de arrasto se situaram em valores reduzidos, são sem dúvida as secções testadas que têm um melhor comportamento tendo em conta a análise desse factor, no entanto, é importante ressaltar que nem sempre a relação entre largura e comprimento da secção transversal que permite essa redução de força de arrasto, é possível de ser posta em prática, ou seja, a construção em obra destas secções, nem sempre constitui um processo de fácil resolução.

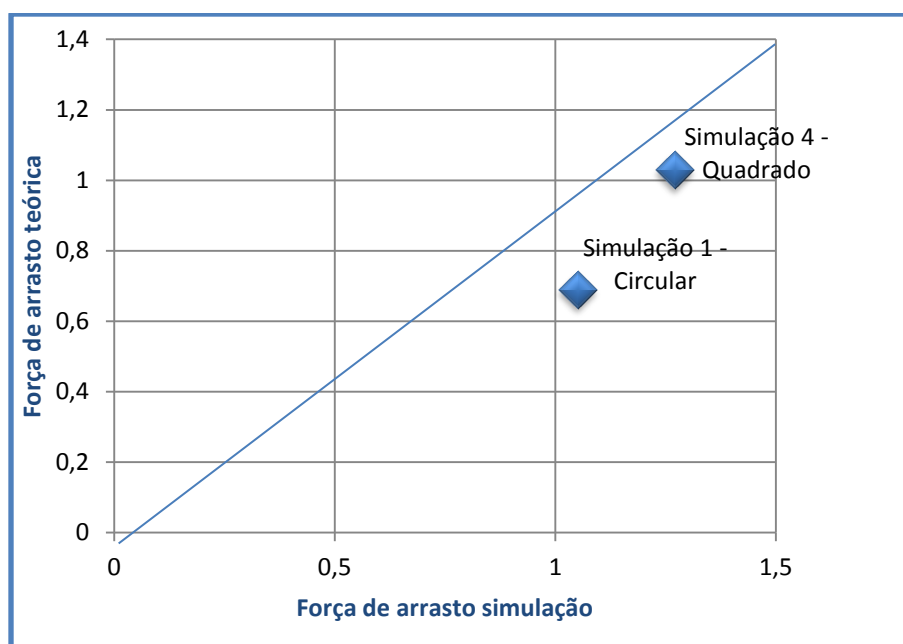


Figura 5.114 - Força de arrasto teórica vs força de arrasto da simulação

Na figura 5.115 apresentam-se as forças de arrasto obtidas nas diferentes simulações, com excepção das simulações utilizadas na validação do modelo, em função do comprimento dos pilares. A análise da referida figura, nomeadamente a comparação dos resultados entre a simulação 7 e 8 e a simulação 6 e 9, respectivamente, permite constatar que a força de arrasto aumenta quase linearmente, com a largura da secção transversal dos pilares, para igual comprimento destes.

Na figura 5.116 apresentam-se as forças de arrasto obtidas nas diferentes simulações, com excepção das simulações utilizadas na validação do modelo, em função da largura dos pilares. A análise da referida figura, nomeadamente a comparação dos resultados entre as simulações 4 e 9, permite verificar que a força de arrasto é praticamente constante, apesar da largura da secção transversal dos pilares quase duplicar, para igual comprimento destes.

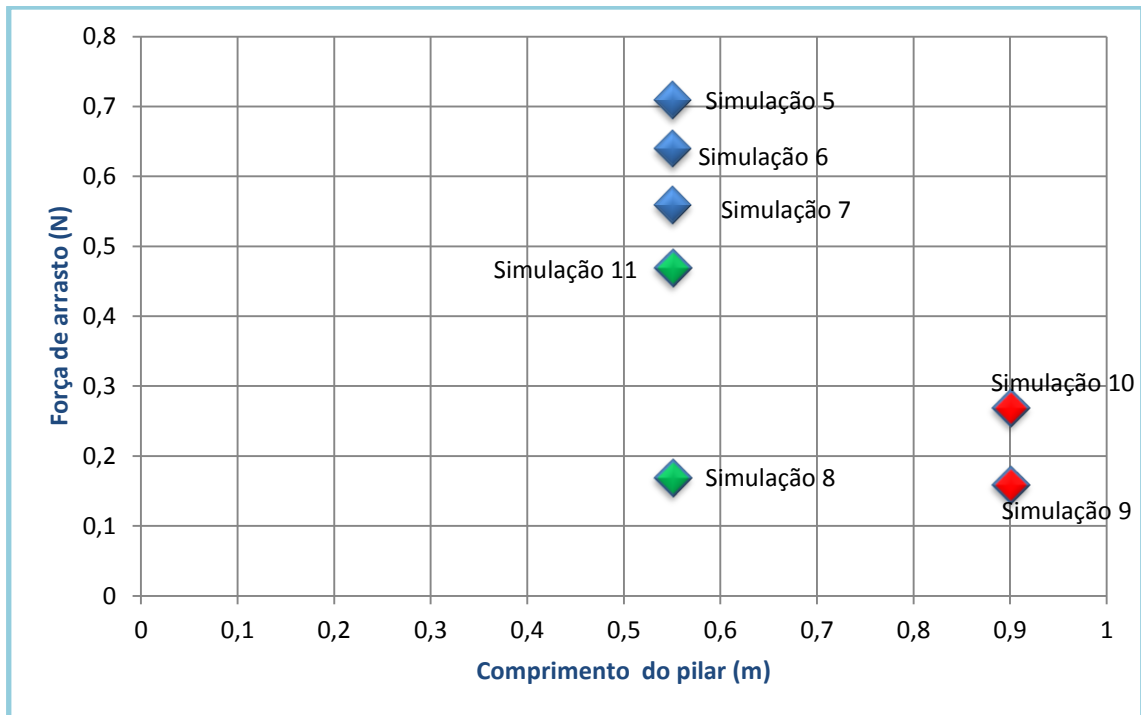


Figura 5.115 - Força de arrasto vs comprimento da secção do pilar

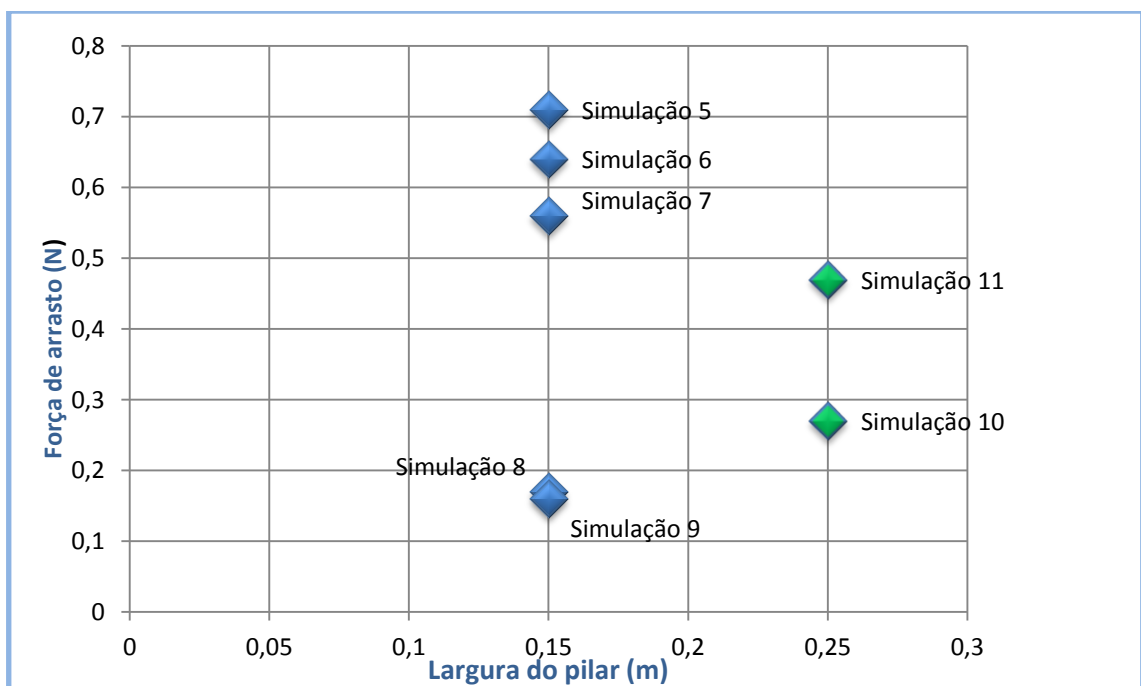


Figura 5.116 - Força de arrasto vs largura da secção do pilar

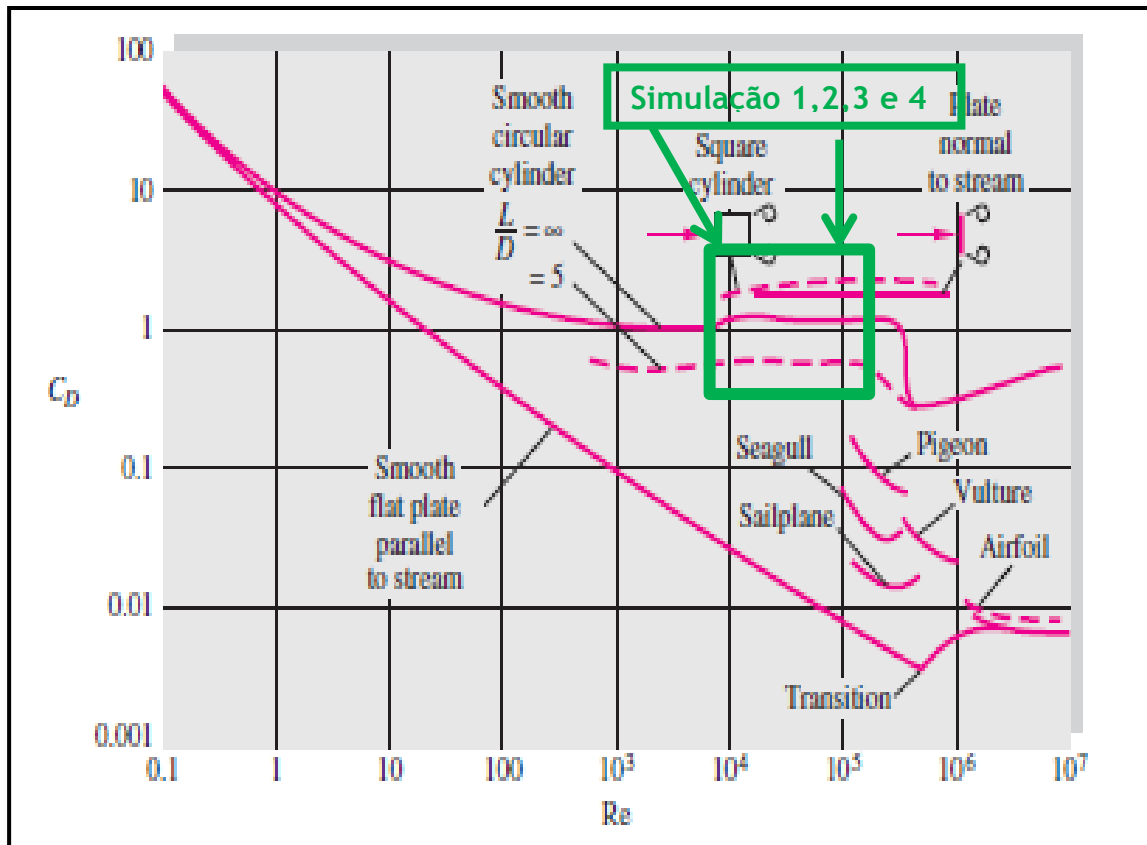


Figura 5.117 - Valor do coeficiente de arrasto vs número de Reynolds para diferentes tipos de obstáculo ao escoamento adaptado às simulações 1,2,3 e 4, extraído de White (2011)

De acordo com a análise da figura 5.117, é possível verificar que os valores obtidos nas simulações estão dentro do que era esperado e apontado como expectável por White (2011), tal como foi abordado no capítulo 2 desta Dissertação. Este facto vem confirmar e dar total segurança a todos os resultados obtidos ao longo deste trabalho.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS INVESTIGAÇÕES

6.1 Aspectos gerais e conclusões

O objectivo primordial desta dissertação foi aferir que tipos de secções transversais de pilares têm melhor comportamento quando analisados através da força de arrasto provocada por um determinado escoamento. Na dissertação apresentada foram simuladas onze secções de pilares de pontes sujeitas a um escoamento, através do *Fluent*.

As simulações, utilizando as secções padrão, circular e quadrada, serviram para a validação do modelo numérico, através da comparação dos resultados obtidos na simulação com valores extraídos da literatura, mais propriamente em White (2011). A variação de resultados entre os valores teóricos e os valores resultantes das simulações, cerca de 25%, deu segurança para as futuras simulações.

Tendo em conta que a malha utilizada nas simulações ficou validada nas três primeiras simulações e o programa ficou validado com as simulações correspondentes às secções circulares e quadradas, todas as outras simulações realizadas apresentam valores seguros de serem analisados.

Posto isto, pode-se afirmar que os valores da força de arrasto para todas as simulações são satisfatórios, pois todos eles são inferiores aos valores verificados para as simulações utilizadas para a validação do programa.

Assim sendo, e analisando em particular todos os valores obtidos para as simulações, pode-se concluir que apesar da simulação 9 apresentar o menor valor da força de arrasto, as suas dimensões, apesar de estarem à escala, tornam o seu método construtivo mais complicado, pelo que, a simulação e as dimensões da secção que melhor se adaptam a estes tipos de escoamento e cujo método construtivo é possível de se realizar, é a simulação 8 e simulação 10, ambas com o formato lenticular, onde as relações entre a largura e comprimento são aceitáveis.

Face ao exposto, conclui-se que o objectivo primordial desta Dissertação foi alcançado, ou seja, com o auxílio de uma nova ferramenta tecnológica, conseguiu-se testar várias secções de pilares, chegando ao objectivo de analisar e reduzir ao máximo o valor da força de arrasto, tendo sempre em conta as dimensões da secção do pilar, de modo a não serem demasiadas reduzidas e impossíveis de aplicar na construção.

6.2 Sugestões para futuras investigações

Após a realização desta dissertação e as conclusões acima especificadas, torna-se evidente para o autor desta, a necessidade de dar continuidade a este trabalho e a todos os conhecimentos e avanços adquiridos com o mesmo.

A análise de escoamentos em torno de pilares é um caso típico de estudo na área da Engenharia Civil, e mais concretamente nos ramos de Hidráulica e Estruturas. Os resultados obtidos neste trabalho são favoráveis e promissores para futuras investigações. Deste modo, surgem algumas possibilidades para investigação futura, a destacar:

- A análise de escoamento em torno de pilares com secções mais complexas;
- A melhoria do processo de criação de malhas de volumes finitos, pois este processo é bastante moroso e minucioso, o que coloca perspectivas de que com um prazo mais alargado e um conhecimento mais alargado e sustentado nos exemplos e ferramentas apresentadas nesta dissertação, seja possível melhorar a resolução espacial das malhas utilizadas em cada simulação;
- A análise e modelação numérica do escoamento no processo erosivo, ou seja, trabalhar com um fundo móvel, susceptível de sofrer erosões e conjugar todo esse processo com os efeitos estruturais no pilar de modo a que fosse possível definir uma secção de pilar que reduzisse quer os efeitos na estrutura, quer os efeitos no fundo onde essa estrutura assenta;
- Testar novos modelos de turbulência;
- Realizar novas simulações com malhas específicas nas zonas onde ocorrem vórtices ou outros fenómenos de importância relevante para o escoamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, J. (1995), *Computational Fluid Dynamics - The Basics With Applications*, McGraw-Hill.

ANSYS Workbench User's Guide - 2010.

Azevedo, A. (2011), *Estudos preliminares sobre ejeção de vórtices em torno de um cilindro no regime turbulento com separação laminar*. Tese de Mestrado Integrado, FEUP.

Bakker, A. (2004) *Applied Computational Fluid Dynamics - Lecture 1 - Introduction to CFD*.

Berwaldt, A. P. S., (2009), *Simulação numérica de escoamento ao redor de cilindro circular oscilando segundo trajectórias em forma de oito, arco e intermediárias*, UFRGS.

Blasek, J. (2001), *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Elsevier, Amesterdão.

Bonoa, G., Lyrrab, P., Bonoa, G. (2011), *Solução numérica de escoamentos incompressíveis com simulação de grandes escalas*. Mecânica Computacional, Vol XXX, 1-4 Novembro, Rosario.

Carvalho, G. B. (2003), *Estudo experimental do escoamento em torno de cilindros circulares em movimento de rotação* - Tese de Mestrado - Universidade Estadual Paulista.

Coelho, J. F. L., (2008), *Desenvolvimento de uma instalação experimental para estudo de fenómenos de interacção fluido-estrutura* - Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande.

Eymard, B., Gallouet, T., Herbin, R. (2006), *Finite Volume Methods*, Lions Editions, Marselha.

Ferreira, P. H. F., (2003), *Análise experimental do sistema "vórtice ferradura" no escoamento ao redor de um cilindro circular* - Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Gerrard, J. H., (1966), *The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies*, *Journal of Fluid Mechanics*, v.25.

Gonçalves, N. (2007), *Método dos volumes finitos em malhas não estruturadas*, Tese submetido à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Matemática.

- Barkley (1972), <http://wakes.uma.pt/pt/research.php>, acessido em 10 de Setembro de 2012.
- Lindquist, C. (2000), *Estudo experimental do escoamento ao redor de cilindros de base quadrada e retangular* - Tese de Mestrado - Universidade Estadual Paulista.
- OLIVEIRA, P. J. S. P. (2001), *Mecânica Computacional - Notas Didáticas*, Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior.
- Pinto, L. C. (2008), *Análise por simulação numérica do desprendimento de vórtices de um cilindro circular em movimento forçado*. Tese de Mestrado, UFRGS.
- Quintela, A. (2000), *Hidráulica*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.
- Ramos, P. X. C. (2012), *Modelação numérica do escoamento em torno de um pilar* - FEUP.
- Saffman, P. G. e Wilcox, D. C., *Turbulence-model predictions for turbulent boundary layers*. AJAA Journal, Vol. 121974.
- Sumer, B. M. e Fredsoe, J., (1997), *Hydrodynamics around cylindrical structures*, Advanced series on Ocean Engineering, World Scientific.
- White, F. M. (2011), *Fluid Mechanics*, Seventh Edition, McGraw-Hill.
- Wendt, J. F. (2009), *Computational Fluid Dynamics*, Spinger, Berlin.
- Zdravkovich, M. M., (1997), *Flow around circular cylinders*, Oxford University Press, v.1, New York.