



**Gilberto Granja
Selores**

**Estudo numérico do escoamento em descarregadores
por orifício**



**Gilberto Granja
Selores**

Estudo numérico do escoamento em descarregadores por orifício

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Doutora Inês Osório de Castro Meireles, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação da Doutora Teresa Viseu Sarrico Santos, Investigadora Auxiliar do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa

professora associada da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Vítor Faria e Sousa

professor auxiliar do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa

Prof. Doutora Inês Osório de Castro Meireles

professora auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

No término de mais um ciclo da minha vida, gostaria de aqui expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que me ajudaram a realizar este objetivo pessoal.

Desta forma, é com enorme respeito e estima que agradeço à minha orientadora Prof. Doutora Inês Meireles pela sua supervisão, disponibilidade, paciência, pelo apoio e tempo despendido em todas as fases deste trabalho.

À coorientadora Eng^a Teresa Viseu pela ajuda, correções e valiosa matéria fornecida durante a execução desta dissertação.

Quero prestar o meu agradecimento ao Instituto Superior Técnico pela disponibilização da licença do Flow3D® para a realização das simulações no âmbito desta dissertação.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela disponibilização dos dados experimentais utilizados nesta dissertação para efeitos de comparação com os numéricos.

À minha família, em especial ao meu Pai, Mãe e Irmã, os pilares da minha vida, pelo importante apoio e compreensão ao longo destes anos.

À Susana Ferreira, pela ajuda, apoio, dedicação nesta fase, e principalmente pela sua amizade e compreensão nos momentos mais difíceis.

Por último, aos meus amigos, em especial, ao Pedro Chaves, Celso Alves, Nuno Freitas, Eurico Correia e Daniel Novo pela ajuda e apoio na realização deste projeto. Ao José Padeiro, José Silva, Samuel Carvalho, Pedro Cabete, André Almeida, António Diogo, Ana Ministro e Tiago Correia que, tal como os anteriores, também quero agradecer todos os momentos que passaram comigo durante a minha vida académica.

palavras-chave

descarregador de cheias por orifício, dinâmica dos fluidos computacional, *FLOW-3D*[®], modelação numérica.

resumo

Atualmente, no estudo do comportamento de descarregadores de cheias por orifício, é necessário conhecer as pressões ao longo do descarregador, para várias alturas de água na albufeira. Este tipo de estudos tem sido usualmente realizado recorrendo a ensaios experimentais. No entanto, a utilização de modelos numéricos para a simulação do escoamento em estruturas hidráulicas encontra-se numa fase emergente. Neste sentido, a presente dissertação pretende apresentar um estudo numérico relativo ao escoamento em descarregadores de cheias por orifício.

Por forma a efetuar o estudo numérico, foi utilizado o programa comercial de CFD *FLOW-3D*[®], reproduzindo um modelo reduzido construído no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) correspondente a um descarregador por orifício.

Para a realização das simulações numéricas foi necessário definir o objeto de estudo, a malha de cálculo, as condições de fronteira e as propriedades do fluido e objeto de modo a reproduzir as situações ensaiadas experimentalmente no LNEC. A proximidade dos resultados experimentais e numéricos para vários níveis de água na albufeira permitiu validar o modelo numérico para este tipo de escoamentos no interior do orifício.

keywords

mid level gated spillway, computational fluid dynamics, *FLOW-3D*[®], numerical modeling

abstract

Currently, in the study of the behavior of mid level gated spillways, it is necessary to know the pressures along the orifice, for various reservoir levels. This type of study has traditionally been carried out by experimental studies. However, the use of numerical models for the simulation of the flow in hydraulic structures is emerging.

In this sense, the present thesis aims to present a numerical study on the flow through orifice spillways. In order to perform the numerical study, the commercial program of CFD *FLOW-3D*[®] was used, reproducing a reduced model of a orifice spillway built at the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC).

To perform the numerical study was necessary to define the object, mesh, boundary conditions and properties of the fluid and object to reproduce the situations studied experimentally at LNEC. The proximity of the experimental and numerical results for various reservoir levels has allowed validating the numerical model for this type of flow.

“Tudo que existe existe talvez porque outra coisa existe. Nada é tudo coexiste: talvez assim seja certo”

Fernando Pessoa (1888-1935)

Índice

Índice	I
Índice de Figuras	III
Índice de Tabelas	VI
Nomenclatura.....	VIII
Lista de Acrónimos.....	IX
1. Introdução.....	3
1.1. Enquadramento geral.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Estrutura da dissertação	5
2. Dinâmica dos fluidos computacional	9
2.1. Considerações gerais	9
2.2. Modelo teórico.....	10
2.2.1. Equações do movimento.....	10
2.2.2. Modelos de turbulência	19
2.3. <i>FLOW-3D</i> [®]	22
2.3.1. Códigos CFD	22
2.3.1.1. Pré-processamento.....	22
2.3.1.2. Simulação	23
2.3.1.3. Pós-processamento	23
2.3.2. Representação da geometria (4.4.2)	23
2.3.3. Definição da malha (4.4.3)	24
2.3.4. Localização da superfície livre.....	27
2.3.5. Condições de fronteira adicionais.....	28
2.3.6. Método de discretização	30
3. Estudo numérico	33
3.1. Geometria do modelo	33
3.1.1. Definição do objeto	33
3.1.1.1. Corpo da barragem	34
3.1.1.2. Descarregador.....	35
3.1.1.3. Tubagem de arejamento.....	37
3.1.1.4. Localização geométrica do modelo	38
3.1.1.5. Importação do sólido	39
3.2. Convergência da malha	40
3.2.1. Considerações gerais	40
3.2.2. Caso de estudo - Bloco 1	43
3.2.3. Caso de estudo – Bloco 1 + bloco 2	49
3.2.4. Caso de estudo – Aplicação de <i>grid overlay</i>	57
3.2.5. Caso de estudo – Bloco 1 + bloco 2 + aplicação <i>grid overlay</i>	64
3.3. Convergência dos resultados no tempo de simulação	70
3.4. Análise de sensibilidade das simulações numéricas.....	74
3.5. Análise de sensibilidade de dimensões do domínio computacional.....	87
4. Comparação de resultados experimentais e numéricos	99
4.1. Malha de cálculo.....	100

4.2.	Apresentação e discussão dos resultados obtidos.....	101
4.2.1.	Pressões	101
4.2.2.	Caudais	115
5.	Considerações finais	121
5.1.	Conclusões gerais	121
5.2.	Desenvolvimentos futuros	122
6.	Referências bibliográficas	127

Índice de Figuras

Figura 1 - Relação entre a realidade, o modelo matemático e o modelo computacional (adaptado de (Ho e Riddette, 2010))	4
Figura 2 - Abordagem: a) conservativa e b) não conservativa (Wendt, 2008).....	11
Figura 3 - Representação da: a) tensão tangencial e b) tensão normal (Wendt, 2008)	15
Figura 4 - Modelos de turbulência (adaptado de (Meireles, 2011))	20
Figura 5 - Aplicação do método FAVOR TM : a) objetos reais; b) representação dos objetos usando o método FAVOR TM (FLOW-3D, 2013)	24
Figura 6 - Malha de cálculo de um modelo 3D (Silva, 2013)	25
Figura 7 - Diferentes tipos de malhas: a) malha ortogonal; b) malha não ortogonal hexaédrica; c) malha não ortogonal tetraédrica (Silva, 2013)	26
Figura 8 - Tipos de malha: a) uniforme; b) não uniforme (Wendt, 2008).....	27
Figura 9 - Determinação da superfície livre através do método VoF (Barkhudarov, 2004).....	28
Figura 10 - Representação das variáveis numa célula tipo (Silva, 2013).....	30
Figura 11 - Corte do perfil central da barragem em estudo.....	34
Figura 12- Viste de montante	35
Figura 13 - Vista de jusante.....	35
Figura 14 - Vista de montante do descarregador.....	36
Figura 15 - Vista de jusante do descarregador	36
Figura 16 - Interior do descarregador	37
Figura 17 - Tubagem de arejamento.....	37
Figura 18- Localização da tubagem de arejamento: a) incorporação da tubagem no corpo da barragem, b) e c) saídas da tubagem no descarregador e d) saída da tubagem no topo da barragem.....	38
Figura 19 - Localização geométrica do modelo no espaço	39
Figura 20 - Modelo importante: a) vista de montante e b) vista de jusante	39
Figura 21 - Perfis estudados: a) na albufeira (perfil i)); b) na entrada do descarregador (perfil ii)) e c) no interior do descarregador (perfil iii))	40
Figura 22 – Resultados da pressão de uma simulação genérica: a) vista lateral, b) vista frontal e c) vista superior	41
Figura 23 - Vista dos resultados da pressão de uma simulação genérica	41
Figura 24 - Condições de fronteira aplicadas ao bloco 1	44
Figura 25 - Malha de cálculo aplicada ao modelo: a) limites de cada direção, b) composição da malha de cálculo gerada.....	45
Figura 26 – Resultados do perfil de pressões na secção i) da albufeira para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1	46
Figura 27 - Resultados do perfil de velocidades na secção i) da albufeira para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1	48
Figura 28 - Condições de fronteira do bloco 2	50
Figura 29 – Definição dos limites dos blocos 1 e 2: a) no plano xy, b) no plano xz, c) no plano yz	51
Figura 30 - Malha de cálculo do bloco 2.....	51
Figura 31 - Resultados do perfil de pressões na secção ii) da entrada do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2.....	53

Figura 32 - Resultados do perfil de velocidades na secção ii) da entrada do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2	54
Figura 33 - Resultados do perfil de pressões na secção iii) do interior do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2	55
Figura 34 - Resultados do perfil de velocidades na secção iii) do interior do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2	56
Figura 35 - Aplicação da condição de fronteira <i>grid overlay</i>	58
Figura 36 - Grelha da malha de cálculo depois da aplicação do <i>grid overlay</i>	59
Figura 37 - Resultados do perfil de pressões na secção ii) da entrada do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente à aplicação do <i>grid overlay</i>	60
Figura 38 - Resultados do perfil de velocidades na secção ii) da entrada do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente à aplicação do <i>grid overlay</i>	61
Figura 39 - Resultados do perfil de pressões na secção iii) no interior do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente à aplicação do <i>grid overlay</i>	62
Figura 40 - Resultados do perfil de velocidades na secção iii) no interior do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente à aplicação do <i>grid overlay</i>	63
Figura 41 - Resultados do perfil de pressões na secção ii) da entrada do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2 + aplicação do <i>grid overlay</i>	66
Figura 42 - Resultados do perfil de velocidades na secção ii) da entrada do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2 + aplicação do <i>grid overlay</i>	67
Figura 43 - Resultados do perfil de pressões na secção iii) no interior do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2 + aplicação do <i>grid overlay</i>	68
Figura 44 - - Resultados do perfil de velocidades na secção iii) no interior do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2 + aplicação do <i>grid overlay</i>	69
Figura 45 - Gráfico mass-averaged mean kinetic energy da simulação 12	71
Figura 46 - Gráfico mass-averaged turbulent energy: a) dos 0 aos 30 segundos, b) dos 30 aos 60 segundos, c) dos 60 aos 90 segundos	71
Figura 47 – Resultados do perfil de pressões da convergência dos resultados no tempo da simulação 12 na entrada do descarregador	72
Figura 48 - Resultados do perfil de velocidades da convergência dos resultados no tempo da simulação 12 na entrada do descarregador	73
Figura 49 - Resultados do perfil de pressões da convergência dos resultados no tempo da simulação 12 no interior do descarregador	73
Figura 50 - Resultados do perfil de pressões da convergência dos resultados no tempo da simulação 12 no interior do descarregador	74
Figura 51 – Resultados do perfil de pressões para as simulações dos modelos de turbulência	76
Figura 52 - Resultados do perfil de velocidades para as simulações dos modelos de turbulência	77
Figura 53 - Resultados do perfil de pressões para as simulações dos modelos de advecção da superfície livre	79
Figura 54 - Resultados do perfil de velocidades para as simulações dos modelos de advecção da superfície livre	81

Figura 55 - Resultados do perfil de pressões para as simulações dos modelos de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento	83
Figura 56 - Resultados do perfil de velocidades para as simulações dos modelos de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento.....	85
Figura 57 - Limites de redução em x e y	87
Figura 58 - Malha de cálculo correspondente à simulação 13	88
Figura 59 - Perfis de estudo no interior do descarregador.....	89
Figura 60 – Resultados do perfil de pressões das simulações 12 e 18 para o perfil a).....	90
Figura 61 - Resultados do perfil de velocidades das simulações 12 e 18 para o perfil a) ...	90
Figura 62 - Resultados do perfil de pressões das simulações 12 e 18 para o perfil b)	92
Figura 63 - Resultados do perfil de velocidades das simulações 12 e 18 para o perfil a) ...	92
Figura 64 - Resultados do perfil de pressões das simulações 12 e 18 para o perfil c)	94
Figura 65 - Resultados do perfil de velocidades das simulações 12 e 18 para o perfil a) ...	94
Figura 66 - Modelo correspondente para cada nível da altura de água: a) H=161,5m; b) H=158,5m; c) H=152,5m; d) H=147,5m; e) H=142,5m; f) H=137,5m; g) H=132,5m; h) H=127,5m.....	99
Figura 67 - Tomadas de pressão instaladas na parede lateral e na abóbada do descarregador	101
Figura 68 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=326m - perfil central	103
Figura 69 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=326m - perfil lateral	104
Figura 70 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=320m - perfil central	105
Figura 71 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=320m - perfil lateral	106
Figura 72 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=315m - perfil central	107
Figura 73 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelhos) para H=315m - perfil lateral	108
Figura 74 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=310m - perfil central	109
Figura 75 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=310m - perfil lateral	110
Figura 76 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=300m - perfil central	111
Figura 77 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=300m - perfil lateral	112
Figura 78 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelhos) para H=295m - perfil central	113
Figura 79 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=295m - perfil lateral	114
Figura 80 - Curva de vazão do descarregador	117

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tempo de simulação e tempo de cálculo computacional das simulações.....	42
Tabela 2 - Primeira malha de cálculo elaborada no <i>FLOW-3D</i> [®]	45
Tabela 3 - Refinamento da malha de cálculo do bloco 1.....	46
Tabela 4 – Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações de 01 a 04.....	47
Tabela 5 - Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 01 a 04.....	49
Tabela 6 - Refinamento da malha de cálculo do bloco 1 + bloco 2	52
Tabela 7 – Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações 05 a 08 na entrada do descarregador.....	53
Tabela 8 Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 05 a 08 na entrada do descarregador	54
Tabela 9 - Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações 05 a 08 no interior do descarregador.....	56
Tabela 10 - Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 05 a 08 no interior do descarregador	57
Tabela 11 - Malha de cálculo com a aplicação do <i>grid overlay</i>	59
Tabela 12 - Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações 08 e 09 na entrada do descarregador.....	60
Tabela 13 - Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 08 e 09 na entrada do descarregador	61
Tabela 14 - Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações 08 e 09 no interior do descarregador.....	63
Tabela 15 - Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 08 e 09 no interior do descarregador	64
Tabela 16 - Refinamento da malha de cálculo com <i>grid overlay</i>	65
Tabela 17 - Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações de 09 a 12 na entrada do descarregador	66
Tabela 18 - Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 09 a 12 na entrada do descarregador	67
Tabela 19 - Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações 09 a 12 no interior do descarregador.....	69
Tabela 20 - Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 09 a 12 no interior do descarregador	70
Tabela 21 - Cálculo do erro relativo da variável pressão dos modelos de turbulência	77
Tabela 22 - Cálculo do erro relativo da variável velocidade dos modelos de turbulência ..	78
Tabela 23 - Cálculo do erro relativo da variável pressão dos modelos de advecção da superfície livre	80
Tabela 24 - Cálculo do erro relativo da variável velocidade dos modelos de advecção da superfície livre	82
Tabela 25 - Cálculo do erro relativo da variável pressão dos modelos de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento	84
Tabela 26 - Cálculo do erro relativo da variável velocidade dos modelos de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento	86
Tabela 27 - Malha de cálculo para a redução de volume do domínio	88

Tabela 28 - Erro relativo das simulações 12 e 18 para o perfil a)	91
Tabela 29 - Erro relativo das simulações 12 e 13 para o perfil b).....	93
Tabela 30 - Erro relativo das simulações 12 e 18 para o perfil c)	95
Tabela 31 - Representação da malha de cálculo das simulações 19 e 20.....	100
Tabela 32 - Resultados numéricos do caudal para diferentes níveis de água na albufeira	116
Tabela 33 - Valor do erro relativo entre os resultados experimentais e numéricos.....	116

Nomenclatura

a_x	aceleração segundo a direção x
C_μ	coeficiente empírico
F_x	forças que atuam no elemento finito segundo a direção x
F_y	forças que atuam no elemento finito segundo a direção y
F_z	forças que atuam no elemento finito segundo a direção z
g_x	aceleração da gravidade segundo a direção x
k	energia cinética turbulenta
m	massa do elemento de fluido
u	componente da velocidade na direção x
v	componente da velocidade na direção y
V	velocidade
w	componente da velocidade na direção z
∇	operador vetorial
δ_m	massa do elemento infinitesimal
δ_V	volume do elemento infinitesimal
ε	taxa de dissipação turbulenta
λ	segunda viscosidade (<i>bulk viscosity</i>)
μ	viscosidade
ρ	densidade do fluido
σ_{ii}	tensões normais
τ_{ij}	tensões tangenciais
ν_T	viscosidade turbulenta
\forall	volume
dV	diferencial de volume

Lista de Acrónimos

CFD	Computacional Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
FAVOR TM	Fractional Area/Volume Obstacle Representation
LES	Large Eddy Simulation
LNEC	Laboraório Nacional de Engenharia Civil
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
VoF	Volume of Fluid
STL	STereoLithography

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral

1.2. Objetivos

1.3. Estrutura da tese

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral

Em barragens há por vezes a necessidade de dotar órgãos hidráulicos com comportas. Quando se pretende realizar manobras de abertura dessas comportas, ou quando estas se abrem por acidente, são originadas pressões, provocadas pelo fluido, que poderão ser de tal modo elevadas que comprometam a estabilidade da estrutura. Neste sentido, é importante perceber quais os cenários de ações a que as comportas estão sujeitas, para se perceber se essa operação comprometerá ou não a segurança da estrutura. As comportas apresentam formas e dimensões variáveis, sendo por isso definidas em função das condições de carga, dos esforços a que vão estar sujeitas durante o seu funcionamento, e das condições de trabalho a que se destinam (Proença, 1987).

Assim, devido às inúmeras variáveis na operação de uma comporta, é difícil determinar as características do escoamento para cada cenário de abertura da comporta recorrendo unicamente a cálculos teóricos. Numa situação deste tipo é, assim, usual a realização de ensaios experimentais, servindo estes igualmente para determinar alguns parâmetros. Assim, os coeficientes de descarga, os coeficientes de atrito e a determinação da localização da superfície livre do escoamento constituem alguns desses parâmetros que se revelam essenciais para a conceção e dimensionamento de estruturas hidráulicas.

Segundo a Portaria nº 846/93 um dos principais órgãos hidráulicos existentes nas barragens são os descarregadores de cheias, cuja principal funcionalidade é permitir a descarga de água em excesso que aflui na albufeira, de modo a garantir a segurança de habitações, vias de comunicação e outras obras vizinhas. Os descarregadores devem ser dimensionados em função de diversos condicionantes, tais como: do tipo de barragem, dos caudais de descarga e das condições hidrológicas, topográficas, geológicas, sismológicas e geotécnicas do local da construção da barragem.

Atualmente, tem existido grande desenvolvimento na simulação numérica referente a estruturas hidráulicas, como descarregadores de cheias a nível bidimensional e tridimensional, fornecendo um meio alternativo, mais económico e rápido, de simular

escoamentos turbulentos. (Dargahi, 2006). O esquema da Figura 1 ilustra a ligação entre o mundo real, o modelo matemático e o modelo computacional.

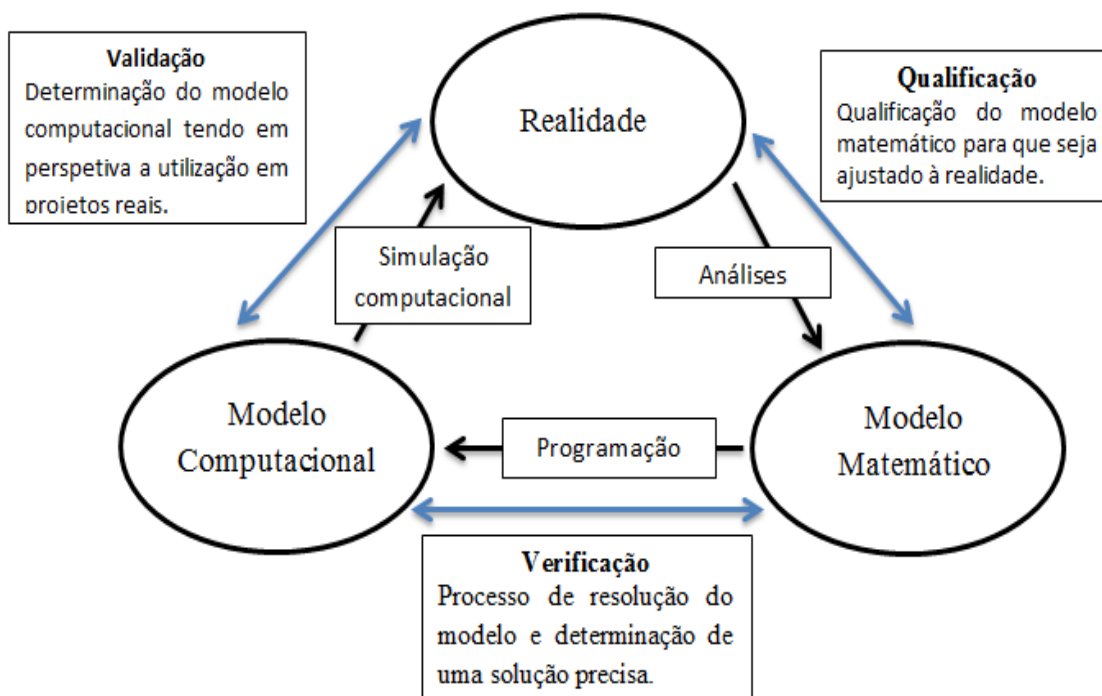


Figura 1 - Relação entre a realidade, o modelo matemático e o modelo computacional (adaptado de (Ho e Riddette, 2010))

Os códigos dos modelos computacionais recorrem às equações fundamentais da dinâmica de fluidos para resolver os problemas propostos. Existem vários *softwares* comerciais disponíveis para resolver estas equações, sendo o modelo FLOW-3D[®] aquele que apresenta grande reputação, nomeadamente com grande capacidade para localizar adequadamente a posição da superfície livre e facilidade em modelar o escoamento (Savage *et al*, 2003).

No caso particular da conceção de descarregadores de cheias por orifício, as simulações numéricas são úteis para a elaboração de um estudo preliminar de avaliação de desempenho, antes da realização de ensaios físicos. Já a comparação de resultados numéricos e experimentais permite a validação dos primeiros.

1.2. Objetivos

No presente estudo, pretende-se caracterizar o escoamento em descarregadores de cheias por orifício recorrendo a simulações numéricas. Para tal, irão ser realizadas diversas

simulações com recurso ao *software FLOW-3D[®]*. A modelação numérica é um excelente complemento à modelação física, permitindo o estudo de múltiplas alternativas antes da construção do modelo físico bem como o estudo de maior número de soluções em menos tempo e com menos recursos materiais.

1.3. Estrutura da dissertação

A estrutura da dissertação contempla 5 capítulos, que se dividem pelas diferentes etapas de execução da dissertação e do estudo elaborado.

No Capítulo 1 apresentada uma breve introdução ao tema abordado na dissertação. Também é mencionado o objeto de estudo no trabalho realizado. São ainda enumerados os objetivos e a estrutura desta dissertação.

O Capítulo 2 corresponde à descrição das bases teóricas da dinâmica dos fluidos e a sua aplicação, traduzida pelas equações do movimento, em escoamentos turbulentos. É introduzido a modelação em códigos CFD e algumas funcionalidades do programa *FLOW-3D[®]*, que contemplaram parte do trabalho realizado.

No Capítulo 3 é apresentada a geometria do objeto em estudo, construída em *Autocad-3D[®]* tendo sido transportada para o *FLOW-3D[®]*, programa utilizado para a realização do estudo numérico. Realizou-se o estudo da convergência da malha de cálculo, onde se obteve o domínio computacional mais eficiente, para o modelo em estudo e para a zona de maior interesse. É ainda elaborada uma análise de sensibilidade das simulações numéricas e das dimensões do domínio computacional.

O Capítulo 4 trata da obtenção dos resultados numéricos para comparação com os resultados experimentais. Este estudo realizou-se para diferentes níveis de água na albufeira.

Por último no Capítulo 5 são expostas as conclusões finais do estudo realizado.

CAPÍTULO 2

Dinâmica dos fluidos computacional

2. DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

2.1. Considerações gerais

2.2. Modelo teórico

2.2.1. Equações do movimento

2.2.2. Modelos de turbulência

2.3. *FLOW-3D*[®]

2.3.1. Códigos CFD

2.3.2. Representação da geometria

2.3.3. Definição da malha

2.3.4. Localização da superfície livre

2.3.5. Condições de fronteira adicionais

2.3.6. Método de discretização

2. DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

2.1. Considerações gerais

A Dinâmica dos Fluidos Computacional usualmente conhecida pela sigla CFD, *Computational Fluid Dynamics*, de acordo com a terminologia inglesa, caracteriza-se pelo grande desenvolvimento ao nível da investigação, devido à utilidade do *software* em simular problemas complexos no ramo da mecânica dos fluidos (Ferziger e Peric, 2002).

De acordo com Versteeg e Malalasekera (1995) algumas das áreas de investigação em que os modelos CFD estão presentes, e que levou à sua expansão, são:

- Aerodinâmica de aviões e veículos;
- Engenharia Química;
- Hidráulica;
- Engenharia Naval;
- Engenharia Eletrónica.

Os modelos CFD recorrem a métodos numéricos e a algoritmos com o objetivo de estudar, ao pormenor, situações reais de fluidos, bem como a interação de elementos ou substâncias com o fluido. O progresso da capacidade dos computadores aumentou a utilização dos modelos CFD, assistindo-se ao desenvolvimento de diversos códigos, quer comerciais, quer gratuitos, que se têm tornando cada vez mais eficazes e abrangendo um conjunto cada vez maior de situações (Sousa, 2012).

Segundo Ferziger e Peric (2002) os códigos CFD permitem estudar situações com elevada complexidade geométrica. Nesses casos, é exigido muito esforço e dedicação da parte dos utilizadores, sendo indispensável um conhecimento profundo no campo da mecânica dos fluidos e modelação numérica para se poder interpretar corretamente os resultados obtidos. Os resultados serão válidos se se considerar devidamente os princípios físicos nas equações numéricas do programa e nas condições de fronteira dos vários elementos a modelar. No entanto, os modelos CFD ostentam grandes dificuldades em reproduzir fisicamente os efeitos da turbulência, apresentando como solução uma aproximação da turbulência à realidade física. Desta forma, os resultados obtidos nos códigos CFD estão sujeitos a erros de aproximação especialmente quando se trata de escoamentos turbulentos (Wendt, 2008).

No capítulo seguinte vai-se abordar as equações que caracterizam os modelos CFD e que respeitam aos princípios da mecânica dos fluidos, descrevendo o movimento destes.

2.2. Modelo teórico

2.2.1. Equações do movimento

Segundo Wendt (2009) as equações do movimento de um fluido regem-se pelos seguintes princípios físicos:

- i) Princípio da conservação da massa;
- ii) Princípio da quantidade de movimento, também conhecido como a Segunda lei de Newton;
- iii) Princípio da conservação da energia ou a Primeira lei da termodinâmica.

Apresenta-se, de seguida, o significado dos dois primeiros princípios. O princípio da Primeira lei da Termodinâmica não vai ser pormenorizado, uma vez que os problemas estudados na presente dissertação não envolvem variação da temperatura.

Para se estudar as equações de movimento de um elemento de fluido é importante perceber como atuam as forças neste elemento. Num elemento sólido, a velocidade, a aceleração e a pressão atuam de igual forma em todos os pontos do corpo. O mesmo já não se verifica num elemento de fluido, onde a atuação destas forças varia de ponto para ponto.

Para se compreender os princípios anteriormente enunciados, considera-se o campo de fluxo representado pelas linhas de corrente do escoamento, em que o elemento infinitesimal do fluido é definido por um volume diferencial, dV , suficientemente grande para que seja considerado um meio contínuo. Assim, esse elemento infinitesimal é caracterizado de duas formas:

- Estar fixo no espaço considerando o volume que o atravessa, como se pode observar na Figura 2a) - forma conservativa.
- Pode mover-se ao longo de uma linha de corrente em que o vetor velocidade, \vec{V} , é igual à velocidade do caudal em todos os pontos, como está representado na Figura 2b) - forma não conservativa.

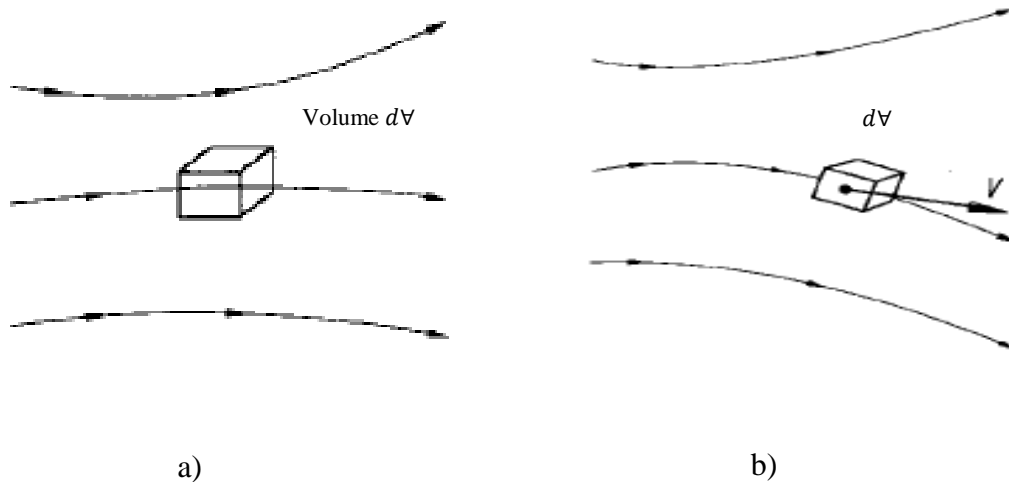


Figura 2 - Abordagem: a) conservativa e b) não conservativa (Wendt, 2008)

É de salientar, que no modelo do elemento infinitesimal as forças são aplicadas apenas ao elemento de fluido e não ao escoamento.

Para representar as equações de *Navier-Stokes* na forma cartesiana considera-se o sistema de eixos $x_i = (x, y, z)$, em que x , y e z traduzem a direção longitudinal do escoamento, a direção transversal e a direção vertical ao escoamento, respetivamente. Assim a derivada material de um elemento de fluido pode expressar-se por:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (1)$$

A parcela, $\frac{\partial}{\partial t}$, é designada por derivada local e representa a variação, no tempo, de qualquer grandeza, num ponto fixo do escoamento. A segunda parcela, $\left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right)$, é conhecida por derivada convectiva e traduz a variação de um volume de fluido no espaço.

As componentes u , v e w correspondem ao vetor velocidade segundo as direções x , y e z respetivamente nas coordenadas cartesianas. Assim,

$$\vec{V} = (u, v, w) \quad (2)$$

Ainda nas mesmas coordenadas o operador vetorial ∇ é definido por:

$$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (3)$$

Desta forma, a derivada material pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \quad (4)$$

em que $(\vec{V} \cdot \nabla)$ representa a derivada convectiva mencionada anteriormente.

Princípio da conservação da massa:

Para expressar este princípio vai se considerar um elemento de fluido, uma partícula infinitesimal, a mover-se com o escoamento.

A massa deste elemento, δ_m , pode ser definida por:

$$\delta_m = \delta_V \rho \quad (5)$$

onde δ_V corresponde ao volume do elemento e ρ é a densidade do fluido.

Assim, pela conservação da massa, quando um volume de um fluido se desloca, num escoamento, de um ponto para o outro, a sua taxa de variação é nula. Então obtém-se:

$$\frac{D(\delta_m)}{Dt} = 0 \Leftrightarrow \quad (6)$$

$$\Leftrightarrow \frac{D(\rho \delta_m)}{Dt} = 0 \Leftrightarrow \quad (7)$$

$$\Leftrightarrow \frac{D\rho}{Dt} \times \delta_V + \frac{D\delta_V}{Dt} \times \rho = 0 \Leftrightarrow \quad (8)$$

$$\Leftrightarrow \frac{D\rho}{Dt} + \frac{D\delta_V}{Dt} \times \frac{\rho}{\delta_V} = 0 \Leftrightarrow \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow \frac{D\rho}{Dt} + \rho \left[\frac{1}{\delta_V} \times \frac{D(\delta_V)}{Dt} \right] = 0 \quad (10)$$

sendo que,

$$\nabla \cdot \vec{V} = \left[\frac{1}{\delta_V} \times \frac{D(\delta_V)}{Dt} \right] \quad (11)$$

Deste modo, a equação da conservação da massa na forma não conservativa é dada por:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (12)$$

e a equação da conservação da massa na forma conservativa por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (13)$$

Uma vez que,

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = \rho \nabla \cdot \vec{V} + \vec{V} \cdot \nabla \rho \quad (14)$$

então, obtém-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \Leftrightarrow \quad (15)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \vec{V} + \vec{V} \cdot \nabla \rho = 0 \Leftrightarrow \quad (16)$$

$$\Leftrightarrow \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (17)$$

Em suma, a equação da continuidade que expressa a conservação da massa é traduzida por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \rho + \rho \nabla \cdot \vec{V} = 0 \Leftrightarrow \quad (18)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + v \frac{\partial \rho}{\partial y} + w \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (19)$$

Para o estudo em questão considera-se o fluido incompressível (água), ou seja,

$$\rho = \text{constante} \Rightarrow \partial \rho = 0$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad (20)$$

portanto, a equação da continuidade é equivalente a:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \Leftrightarrow \quad (21)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (22)$$

Logo, para fluidos incompressíveis e equação da continuidade resume-se a:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (23)$$

Princípio da quantidade de movimento

Este princípio é traduzido pela Segunda lei de Newton, que segundo a direção x é representada por:

$$F_x = m \cdot a_x \quad (24)$$

em que, F_x representa as forças que atuam sobre o elemento de fluido, m a sua massa e a_x a sua aceleração. Estas forças são agrupadas em dois conjuntos:

- Forças de volume ou mássicas;
- Forças de superfície ou de contacto.

As forças de volume são caracterizadas por ações à distância, nomeadamente campo gravítico, campo elétrico e campo magnético. É de salientar que apenas vai ser considerado o campo gravítico.

As forças de superfície dividem-se em dois grupos:

- Forças de pressão;
- Forças normais e tangenciais.

As forças de pressão existem devido às pressões provocadas pelo fluido que envolve o elemento de fluido em estudo e que atuam na superfície do mesmo. As forças normais e tangenciais também atuam na superfície do elemento de fluido e são provocadas pela fricção entre o fluido envolvente e o elemento de fluido.

O volume de elemento de fluido é representado por, $d_x d_y d_z$, e as forças de volume por unidade de massa por \vec{f} . Assim, as forças de volume que atuam no elemento segundo x são:

$$f_x \times \rho(d_x d_y d_z) = f_x \times m \quad (25)$$

As forças normais e tangenciais que atuam num elemento de fluido estão representadas na Figura 3, em que σ_{ii} e τ_{ij} correspondem, respetivamente, às tensões normais e tangenciais nas várias direções.

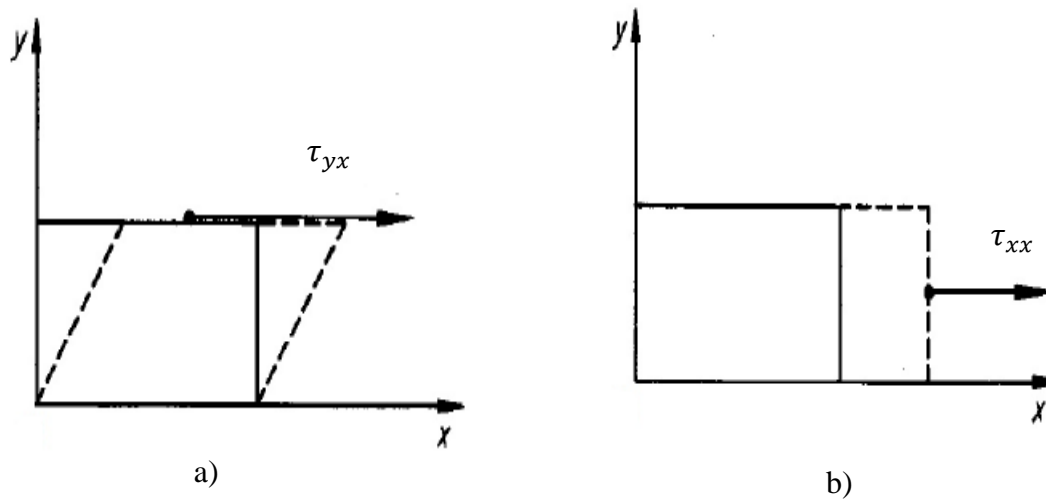


Figura 3 - Representação da: a) tensão tangencial e b) tensão normal (Wendt, 2008)

No entanto, segundo a direção x , as forças de superfície são:

$$\left(-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) d_x d_y d_z \quad (26)$$

assim,

$$F_x = m \times a_x \quad (27)$$

$$F_x = \left(-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) d_x d_y d_z + \rho f_x f_y f_z \quad (28)$$

$$m = \rho d_x d_y d_z \quad (29)$$

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (30)$$

então,

$$\left(-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) d_x d_y d_z + \rho f_x f_y f_z = d_x d_y d_z \times \frac{Du}{Dt} \quad (31)$$

Assim obtém-se as equações de *Navier-Stokes*, na forma não conservativa, segundo a direção x :

$$\frac{Du}{Dt} = \left(-\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) + \rho f_x \quad (32)$$

e segundo a direção y :

$$\frac{Dv}{Dt} = \left(-\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho f_y \quad (33)$$

e segundo a direção z:

$$\frac{Dw}{Dt} = \left(-\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho f_z \quad (34)$$

De seguida obtêm-se as equações de *Navier-Stokes* na forma conservativa, uma vez que esta é a forma usualmente utilizada nos códigos CFD.

A derivada material, por definição, pode ser substituída por:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \vec{V} \cdot \nabla u \quad (35)$$

Matematicamente, aplicando a derivada do produto, pode-se definir:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (36)$$

ou

$$\frac{\rho \partial u}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - \frac{u \partial \rho}{\partial t} \quad (37)$$

e ainda,

$$\nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = u \nabla \cdot (\rho \vec{V}) + (\rho \vec{V}) \cdot \nabla u \quad (38)$$

ou

$$(\rho \vec{V}) \cdot \nabla u = \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) - u \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \quad (39)$$

então, obtêm-se:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) - u \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \Leftrightarrow \quad (40)$$

$$\Leftrightarrow \rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} - u \nabla \cdot (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) \Leftrightarrow \quad (41)$$

$$\Leftrightarrow \rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \underbrace{\left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \right]}_0 + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) \quad (42)$$

o segundo parâmetro da equação (42) é nulo por se tratar da equação da continuidade.

Então, a forma geral da equação da quantidade do movimento pode escrever-se da seguinte forma:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \partial \frac{(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) \quad (43)$$

e segundo a direção x obtém-se:

$$\partial \frac{(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (44)$$

e segundo y obtém-se:

$$\partial \frac{(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (45)$$

e segundo z obtém-se:

$$\partial \frac{(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (46)$$

As equações (44), (45) e (46) são as equações de *Navier-Stokes* na sua forma conservativa.

Para estudar os escoamentos de fluidos Newtonianos, em que a velocidade é proporcional à viscosidade, considera-se:

$$\tau_{xx} = \lambda \vec{V} \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (47)$$

$$\tau_{yy} = \lambda \vec{V} \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (48)$$

$$\tau_{zz} = \lambda \vec{V} \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (49)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (50)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (51)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (52)$$

em que μ e λ representam, respetivamente, a viscosidade e a segunda viscosidade (*bulk viscosity*).

Assim, as equações de *Navier-Stokes* para fluidos Newtonianos na sua forma conservativa segundo as direções x , y e z são respetivamente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z}}_{\nabla \cdot (\rho u \vec{V})} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \rho f_x \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z}}_{\nabla \cdot (\rho u \vec{V})} &= -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \rho f_y \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \underbrace{\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z}}_{\nabla \cdot (\rho u \vec{V})} &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \rho f_z \end{aligned} \quad (55)$$

Para escoamento incompressíveis a equação da continuidade resulta em $\nabla \cdot \vec{V} = 0$, ou seja,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (56)$$

e sabendo que,

$$2\mu \frac{\partial u}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (57)$$

obté-m-se:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \\ &+ \rho f_x \end{aligned} \quad (58)$$

simplificando,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \rho f_x \quad (59)$$

Considerando que a única força de volume relevante é a força gravítica então considera-se que:

$$\rho f_x = \rho g_x \quad (60)$$

em que g_x é a aceleração da gravidade segundo x.

Quando as diferenças de temperatura são pequenas, então a viscosidade, μ , pode passar para fora da derivada espacial e obtém-se a equação final de *Navier-Stokes* segundo a direção x :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (61)$$

2.2.2. Modelos de turbulência

Na natureza e em situações práticas de engenharia, os escoamentos são maioritariamente turbulentos. As correntes oceânicas, o escoamento de água em rios e canais e o escoamento de fluidos em condutas são alguns exemplos práticos de escoamentos turbulentos. Um escoamento turbulento é mais complexo que um escoamento laminar porque está sujeito a variações significativas da energia cinética, quantidade de movimento e transferência de massa, que são designados por difusidade da turbulência (Carvalho, 2002; Tennekes e Lumley, 2010).

Pode-se interpretar a turbulência como o movimento irregular, ou aleatório, de um fluido que leva à formação de vórtices de diferentes escalas. Os vórtices de maiores proporções formam-se devido à energia cinética do escoamento e vão transmitindo a energia para os vórtices mais pequenos até esta ser dissipada (Meireles, 2013; Tennekes e Lumley, 2010).

Presentemente, apenas existem soluções analíticas para as equações de Navier-Stokes em alguns casos muito particulares como, por exemplo, escoamentos laminares simples. Sousa (2012) refere que, a Simulação Numérica Direta (DNS - *Direct Numerical Simulation*), dispensa a utilização de um modelo de turbulência pois resolve todas as escalas do problema. No entanto, o modelo DNS exige uma grande capacidade computacional, pelo que está limitado a escoamentos que apresentam um pequeno número de Reynolds. Para o estudo de escoamentos turbulentos é normalmente necessário recorrer a modelos de turbulência, como por exemplo, o modelo Simulação dos Grandes Vórtices (LES - *Large Eddy Simulation*). Segundo Carvalho (2002), o modelo LES, ao contrário do modelo DNS, apenas resolve os problemas para escalas de maiores dimensões, exigindo uma menor capacidade computacional do que este último. Os modelos mais utilizados, visto que podem ser aplicados à generalidade dos problemas, são as equações *Navier Stokes* com média de *Reynolds* (RANS - *Reynolds Averaged Navier-Stokes*). Em comparação com o

LES estes modelos resolvem uma menor gama de escalas, facilitando a utilização dos computadores, já que exigem menos capacidade destes do que as opções descritas anteriormente. As Rans podem ser divididos em:

- Modelos de fecho de primeira ordem;
- Modelos de fecho de ordens superiores.

Os primeiros são compostos por modelos de zero, uma ou duas equações. Os últimos modelos são constituídos por dois fechos de maior aplicação, modelo $k-\varepsilon$ e o modelo $k-\varepsilon$ RNG (Sousa, 2012).

Apresenta-se na Figura 4 um esquema resumo dos modelos abordados.

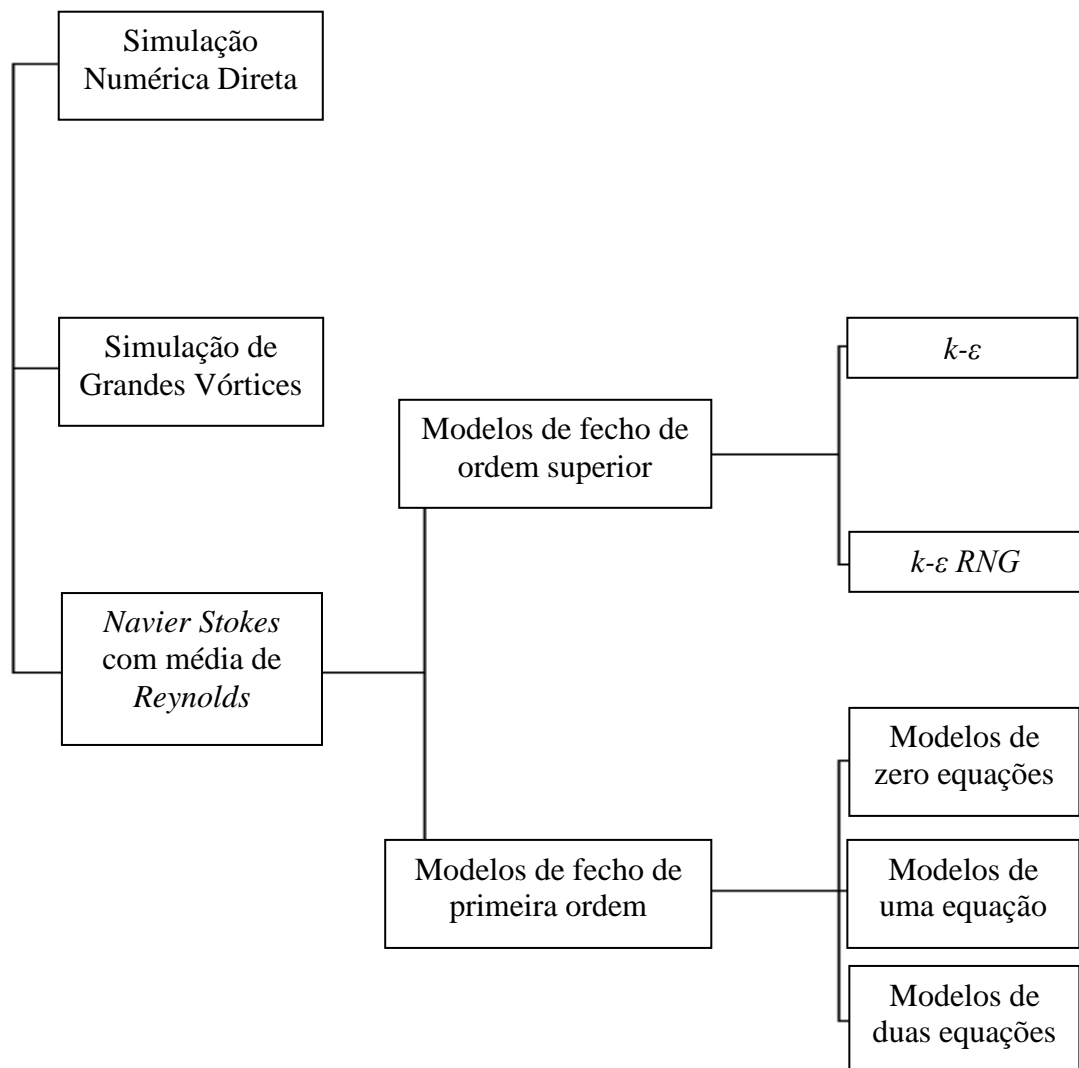


Figura 4 - Modelos de turbulência (adaptado de (Meireles, 2011))

As equações RANS são obtidas a partir das equações de *Navier-Stokes*, sendo os valores instantâneos de velocidade e pressão substituídos pelos respectivos valores médios e as suas flutuações locais. Isto é designado pela decomposição de Reynolds, e representa-se por:

$$\begin{cases} u = \bar{u} + u' \\ v = \bar{v} + v' \\ w = \bar{w} + w' \\ p = \bar{p} + p' \end{cases} \quad (62)$$

em que u , v e w representam a velocidade instantânea nas direções x , y e z respetivamente, \bar{u} , \bar{v} e \bar{w} são as velocidades médias nas três direções e u' , v' e w' correspondem à componente de flutuações. Da mesma forma, p é a pressão instantânea, \bar{p} é a pressão média e p' é a componente de flutuação.

Então, as equações RANS ficam da forma:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (63)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} \right] = \rho g_i + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} \quad (64)$$

em que a última parcela da equação (64) é denominada por tensões de Reynolds.

Recorrendo à hipótese de Boussinesq, admite-se que as tensões de Reynolds são proporcionais ao gradiente da velocidade média, pelo que se obtém:

$$-\overline{u_i' u_j'} = \nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (65)$$

Nesta hipótese, assume-se que a turbulência é isotrópica. Kolmogorov-Prandtl relacionaram a viscosidade turbulenta com a energia cinética turbulenta, k , e a sua taxa de dissipação turbulenta, ε , através da expressão:

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (66)$$

em que C_μ corresponde a um coeficiente empírico com valor de 0,09.

A energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação turbulenta podem ser obtidas pelas equações de transporte do modelo k - ε que são respetivamente:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_T \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (67)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_T \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) - C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left[\nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right] - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (68)$$

em que as constantes deste modelo são obtidas empiricamente. Mais recentemente, foi desenvolvido o modelo RNG k- ε que varia do anterior na forma como se obtém as constantes presentes nas equações.

2.3.FLOW-3D[®]

2.3.1. Códigos CFD

Segundo Versteeg e Malalasekera (1995), os códigos CFD são formados pelos seguintes elementos:

- i) Pré-processamento;
- ii) Simulação;
- iii) Pós-processamento.

2.3.1.1. Pré-processamento

Quando se inicia a modelação num *software* CFD, o primeiro passo é introduzir os parâmetros do problema em estudo numa interface de fácil aplicação, isto trata-se de pré-processamento. O utilizador vai realizar as seguintes atividades:

- Definir a geometria;
- Gerar a malha de cálculo;
- Ativar os modelos pretendidos
- Definir as propriedades do(s) fluido(s);
- Definir as condições de fronteira e as condições iniciais.

2.3.1.2. Simulação

Esta etapa corresponde à simulação numérica propriamente dita. Num código CFD as equações do movimento são resolvidas considerando métodos de discretização dos quais os mais utilizados são: as diferenças finitas, os volumes finitos e os elementos finitos. Estes métodos permitem obter uma solução aproximadamente das variáveis em jogo (e.g., velocidade, pressão).

2.3.1.3. Pós-processamento

Finalizada a etapa *solver*, é necessário analisar os resultados obtidos. Para isto são criadas visualizações gráficas que permitem ao utilizador observar os resultados. As ferramentas que permitem a visualização de resultados são:

- Exibição da geometria do domínio e da malha de cálculo;
- Observação dos vetores;
- Contorno de linhas e gráficos;
- Visualização dos resultados bidimensional e tridimensional;
- Monitorização das partículas;
- Manipulação da visualização (rotação, translação, escala, etc);
- Colorir os resultados em função de uma variável (velocidade, pressão, etc).

Mais recentemente, mas não menos importante, foi desenvolvida a opção de exportação de resultados para outro *software* com manipulação externa ao código.

2.3.2. Representação da geometria (4.4.2)

O método *FAVOR*TM (do inglês, *Fractional Area/Volume Obstacle Representation*), desenvolvido por Torrey *et al* (1985), Hirt e Sicilian (1985) e Sicilian (1990), é muito eficiente para a modelação de objetos em CFD, e apresenta muitas vantagens para definir geometrias mais complexas, pois permite definir o objeto numa malha regular. Este método consiste em definir frações de áreas e de volumes (Carvalho, 2002).

Começa-se por definir a geometria dos objetos, e os segmentos que são intersectados pelas linhas da face de cada célula, dão origem ao objeto criado pelo *FAVORTM* (FLOW-3D, 2013). Na Figura 5 têm-se um exemplo de aplicação deste método.

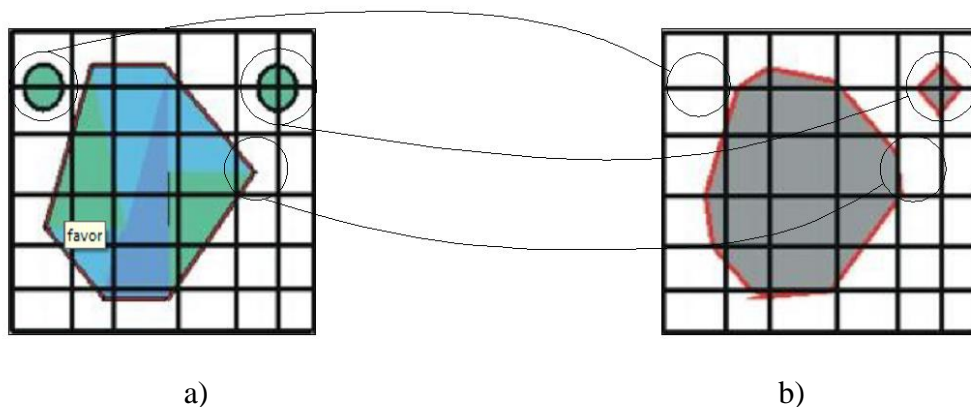


Figura 5 - Aplicação do método *FAVORTM*: a) objetos reais; b) representação dos objetos usando o método *FAVORTM* (FLOW-3D, 2013)

O *FAVORTM* introduz um pequeno erro na área fracionada perante determinados casos. Podem ocorrer três situações, que são apresentadas na Figura 5, que são sumariadas da seguinte forma:

- Situação 1: O objeto intersecta apenas uma linha da face de duas células. Nesta situação, o *FAVORTM* não reconhece o objeto.
- Situação 2: O objeto intersecta quatro linhas de quatro células. Nesta situação, o *FAVORTM* reconhece o objeto como um quadrado.
- Situação 3: O objeto é formado por duas linhas com direções diferentes que se intersecta no interior de uma célula. Deste modo, o objeto criado é formado por uma linha reta definida pelos pontos que intersectam as faces de cada célula, ou seja, uma linha reta a unir os dois pontos.

Para corrigir estes erros deve-se aumentar a resolução da malha (FLOW-3D, 2013).

2.3.3. Definição da malha (4.4.3)

Segundo Frank (2007), a geração da malha de cálculo é um processo importante, pelo que se deve adequar a malha não só às zonas de escoamento do modelo em estudo, como também às zonas de maior interesse, de forma a reproduzi-lo de uma forma realística. É

através da malha de cálculo, que se obtém os resultados das características físicas do escoamento (velocidade, pressão, etc). É importante referir que o refinamento da malha traduz resultados mais precisos, mas também um maior esforço computacional. É necessário conciliar a resolução da malha com o tempo de cada simulação e a memória ocupada, para que o estudo seja viável (Ferziger e Peric, 2002).

O domínio da malha é composto por vários volumes designados por células. As células são constituídas por faces, arestas e nós como se pode observar na Figura 6.

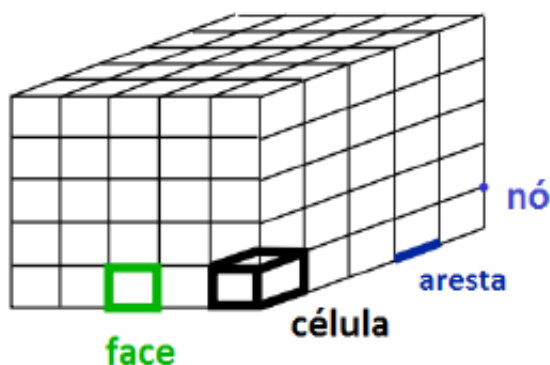


Figura 6 - Malha de cálculo de um modelo 3D (Silva, 2013)

É nas células que os modelos CFD resolvem, numericamente, as características físicas do escoamento. Deste modo, as simulações à malha aplicada, apresentam a solução do modelo em estudo. Sendo que a precisão dos resultados obtidos é proporcional, ao número de células da malha definida (Silva, 2013).

Franke (2007) esquematizou o processo de simulação da seguinte forma:

- i. Executar um cálculo simples, com o modelo em estudo, para conhecer a capacidade computacional disponível;
- ii. Gerar uma malha simples no modelo definido anteriormente, e executar uma simulação inicial;
- iii. Extrair os resultados da zona específica em estudo;
- iv. Refinar a malha, gerada anteriormente, voltando-se a extrair os resultados;
- v. Este processo é iterativo até que haja convergência nos resultados obtidos.

No domínio computacional, segundo Silva (2012), a ortogonalidade da malha de cálculo depende das linhas que constituem a malha, se estas apresentam um ângulo reto, ou não, entre si. Assim, as malhas podem ser ortogonais ou não ortogonais.

As malhas ortogonais, são representadas em coordenadas cartesianas ou cilíndricas. As malhas não ortogonais são hexaédricas e tetraédricas. No entanto, quando um modelo CFD é modelado com um tipo de malha não pode ser utilizado para outro tipo de malha, sendo que no *FLOW-3D*[®] só há malhas do tipo ortogonais (Carvalho, 2002). Na Figura 7 apresenta-se alguns exemplos dos tipos de malhas existentes.

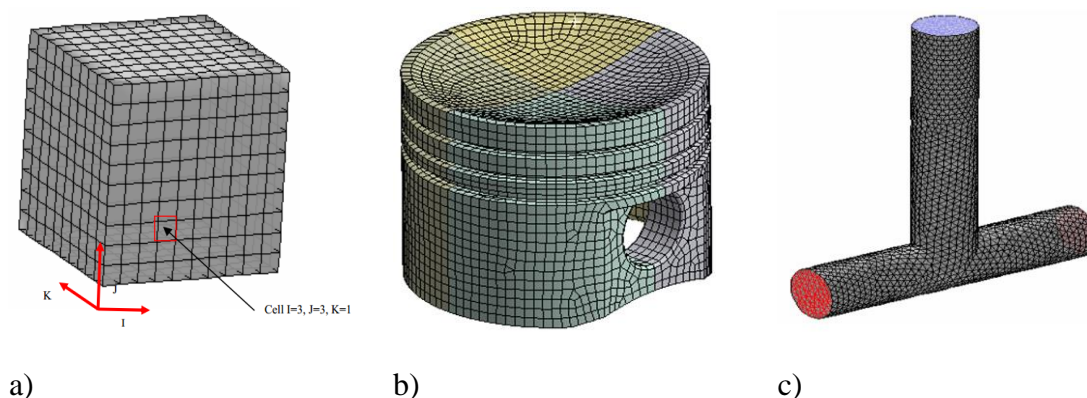


Figura 7 - Diferentes tipos de malhas: a) malha ortogonal; b) malha não ortogonal hexaédrica; c) malha não ortogonal tetraédrica (Silva, 2013)

Uma malha ortogonal pode ainda ser uniforme ou não uniforme. A malha uniforme, consiste num conjunto de linhas, paralelas numa dada direção, que se cruzam, apenas uma vez, com linhas, também paralelas noutra direção. Assim, o cruzamento de duas linhas, em 2D, e o cruzamento de 3 linhas, em 3D, corresponde a um ponto da malha. Numa malha uniforme, um ponto têm quatro ou seis pontos vizinhos, se o domínio for em 2D ou 3D, respetivamente. As células geradas neste tipo de malha são regulares, ou seja, têm o mesmo comprimento para cada direção.

Através de uma malha não uniforme, podem-se gerar malhas mais complexas, uma vez que cada célula é definida por pontos fixos, não existindo assim restrições relativamente ao número de pontos vizinhos. As células geradas não são regulares, ou seja, podem ter comprimentos diferentes, permitindo um melhor refinamento do modelo, localmente (Ferziger e Peric, 2002). Na Figura 8 apresenta-se exemplos de malhas uniforme e não uniforme.

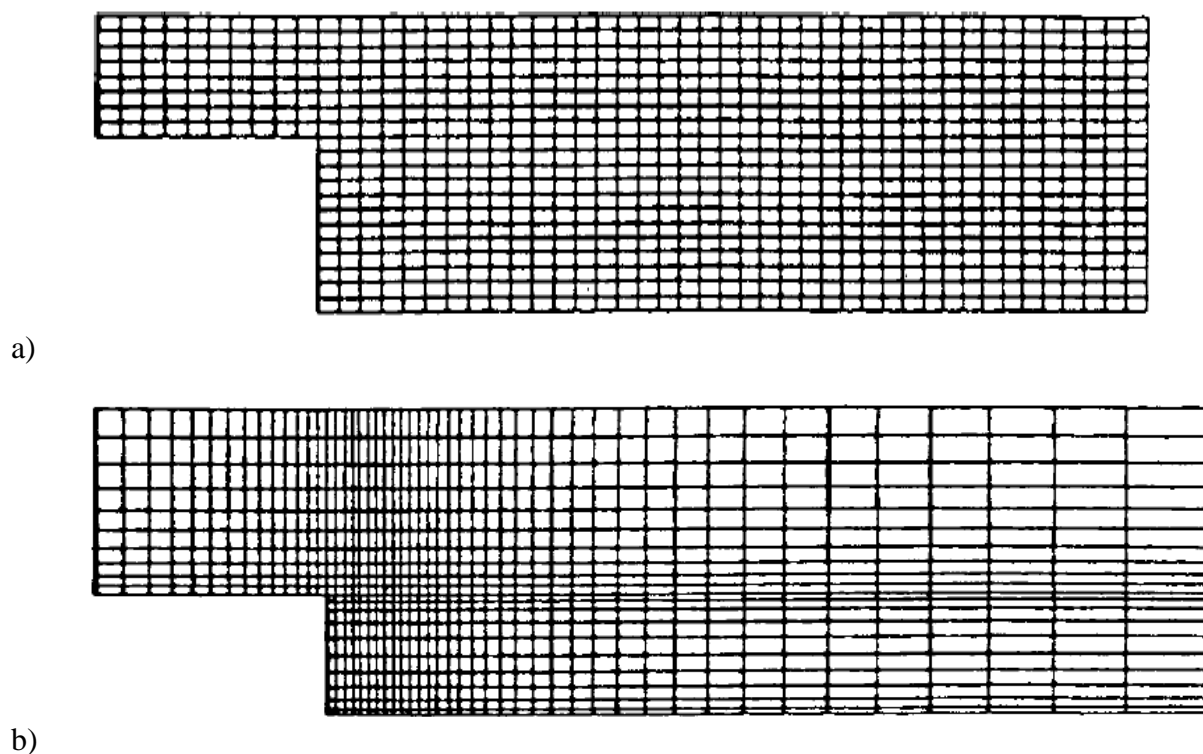


Figura 8 - Tipos de malha: a) uniforme; b) não uniforme (Wendt, 2008)

Quando, num modelo em estudo, a malha gerada abrange um elevado número de células, pode surgir problemas nomeadamente na precisão de resultados e o tempo de cada simulação pode ser demasiado longo. Para evitar estas situações é permitido definir vários blocos de malhas no mesmo modelo. O bloco deve ser criado no local de interesse para o estudo, evitando locais onde os resultados já são conhecidos (Silva, 2013).

2.3.4. Localização da superfície livre

Quando o objeto de estudo são escoamentos com superfície livre, é um desafio modelar numericamente a superfície livre, devido às diferentes condições de pressão, velocidade e densidade a que o fluido está sujeito. No *FLOW-3D*[®], a superfície livre é modelada pelo método *VOF* (do inglês, *Volume of Fluid*) (Hirt e Nichols, 1981).

Segundo Li *et al* (2012) o método *VOF* é representado por uma função F , que se trata de um campo escalar, com o propósito de traduzir as condições a que a célula da malha computacional está sujeita.

O valor de F varia entre zero e um. Este valor representa a fração de volume do fluido que essa mesma célula contém. Assim, uma célula com o valor zero corresponde a uma célula sem fluido, uma célula com o valor um correspondem a uma célula totalmente preenchida pelo fluido e as células em que o valor de F está entre zero e um corresponde à localização da superfície livre como se pode observar na Figura 9 (Meireles, 2013).

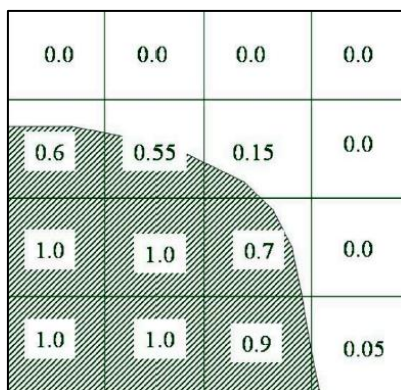


Figura 9 - Determinação da superfície livre através do método VoF (Barkhudarov, 2004)

Segundo Meireles (2011) a equação de transporte da função referida anteriormente corresponde a:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (U \cdot F) = 0 \tag{69}$$

O método VoF apresenta duas importantes vantagens relativamente a outros métodos, nomeadamente entre o *partial VoF* para o qual a simulação entra em linha de conta quer com as células preenchidas com água, quer com as células preenchidas com ar, e o *Re-meshing*, para o qual a malha é refeita a cada passo de cálculo. A primeira vantagem consiste no facto de utilizar apenas uma função para determinar a superfície livre, ocupando pouca memória computacional; a segunda vantagem é que os resultados são obtidos com grande precisão (Meireles, 2013).

2.3.5. Condições de fronteira adicionais

No programa *FLOW-3D*[®], os diversos tipos de escoamentos são representados pelas mesmas equações, mas os domínios destes divergem para os diferentes casos de estudo. As diferenças nos diversos tipos de escoamento devem-se às condições iniciais e de fronteira,

introduzidas em cada modelo. São estas que estabelecem as características físicas pretendidas para cada escoamento (Wendt, 2008).

A introdução das condições iniciais é a forma de caracterizar o modelo em estudo para o instante inicial de simulação. Permite definir, por exemplo, a altura do escoamento, o valor da pressão do fluido e as características do betão, entre outras. (Silva, 2013).

Depois de definidas as condições iniciais, introduzem-se as condições de fronteira conforme o modelo pretendido. As condições de fronteira aplicáveis pelo programa *FLOW-3D*[®] são:

- Simetria (*Symmetry*);
- Parede (*Wall*);
- Continuidade (*Continuative*);
- Periódica (*Periodic*);
- Pressão (*Specified Pressure*);
- Velocidade (*Specifie Velocity*);
- Sobreposição de malhas (*Grid overlay*);
- Saída do escoamento (*Out flow*);
- Oscilação (*Wave*);
- Caudal (*Volume flow rate*).

Os tipos de condições de fronteira mais aplicáveis são:

- Saída do escoamento (*Out Flow*): esta condição de fronteira aplica-se distante das perturbações do escoamento, uma vez que já não existem alterações significativas das variáveis físicas, com a exceção da pressão, do escoamento. É também, por esta razão, que se deve aplicar o mais a jusante possível da zona de estudo, pois previne a ocorrência de erros, evitando a sua propagação (Ferziger e Peric, 2002; Versteeg e Malalasekera, 1995);
- Pressão (*Specified Pressure*): A condição de pressão é utilizada, quando, para além desta, não se conhece as variáveis físicas do escoamento. Este tipo de condição de fronteira é utilizada, por exemplo, em escoamentos de superfície livre (Versteeg e Malalasekera, 1995);

- Simetria (*Symmetry*): Esta condição de fronteira caracteriza-se por não existir fluxo no limite da fronteira, ou seja, o valor das propriedades tangenciais do fluxo são nulas (Ferziger e Peric, 2002; Versteeg e Malalasekera, 1995);
- Parede (*Wall*): Permite especificar a aderência das partículas de uma fronteira sólida, ou seja, não existe movimentos de fluidos na sua superfície. No entanto, podem existir variações de temperatura e pode-se especificar o valor da rugosidade do material desejado (Ferziger e Peric, 2002; Pereira, 2010);

Sobreposição de malha (*Gird Overlay*): Quando uma malha de cálculo não ostente o refinamento desejada para a região de interesse, esta condição de fronteira permite refinar a malha para se obter resultados mais precisos (Flow 3D, 2013).

2.3.6. Método de discretização

O *FLOW-3D*[®] resolve as equações do movimento com base no método de volumes finitos ou diferenças finitas, sendo que o domínio computacional é subdividido em células hexaédricas, que não se sobrepõem, num referencial cartesiano, logo, a cada célula corresponde os valores médios das variáveis do escoamento, sendo neste caso, velocidade e pressão. O valor das variáveis está situado no centro de cada célula, com a exceção da velocidade, cujo valor se encontra no centro da face de cada célula (Savage e Johnson, 2001). Na Figura 10 pode observar-se a localização das variáveis numa célula tipo do *FLOW-3D*[®].

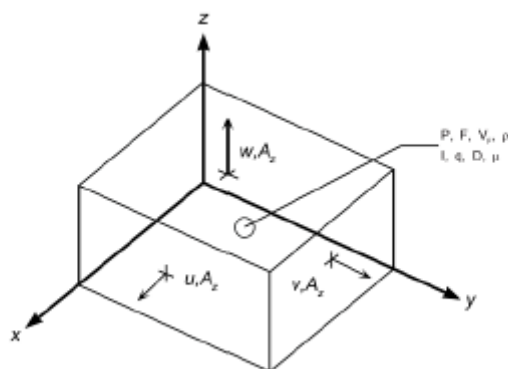


Figura 10 - Representação das variáveis numa célula tipo (Silva, 2013)

CAPÍTULO 3

ESTUDO NUMÉRICO

3. ESTUDO NUMÉRICO

3.1. Geometria do modelo

3.1.1. Definição do objeto

3.2. Convergência da malha

3.2.1. Considerações gerais

3.2.2. Caso de estudo – Bloco 1

3.2.3. Caso de estudo – Bloco 1 + bloco 2

3.2.4. Caso de estudo – Aplicação *grid overlay*

3.2.5. Caso de estudo – Bloco 1 + Bloco 2 + aplicação *grid overlay*

3.3. Convergência dos resultados no tempo de simulação

3.4. Análise de simulação das simulações numéricas

3.5. Análise de sensibilidade de dimensões do modelo computacional

3. ESTUDO NUMÉRICO

3.1. Geometria do modelo

Perante os objetivos propostos para a realização desta dissertação, elaborou-se um modelo de uma barragem com descarregador em orifícios, através do *software AutoCad-3D*[®]. Foi escolhido este *software* porque permite executar geometrias tridimensionais de grande complexidade, de uma forma mais rápida e eficaz que o *software FLOW-3D*[®].

O objeto de estudo trata-se de um modelo de uma barragem, obtido através de plantas fornecidas pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

3.1.1. Definição do objeto

O objeto de estudo é uma barragem do tipo abóbada com curvatura dupla. No entanto, como o interesse do estudo da presente dissertação é o descarregador, considerou-se a curvatura horizontal retilínea de desenvolvimento infinito, simplificando a elaboração do modelo. A curvatura vertical é reproduzida no corte do perfil central apresentado na Figura 11, onde também se pode observar o corte do orifício do descarregador.

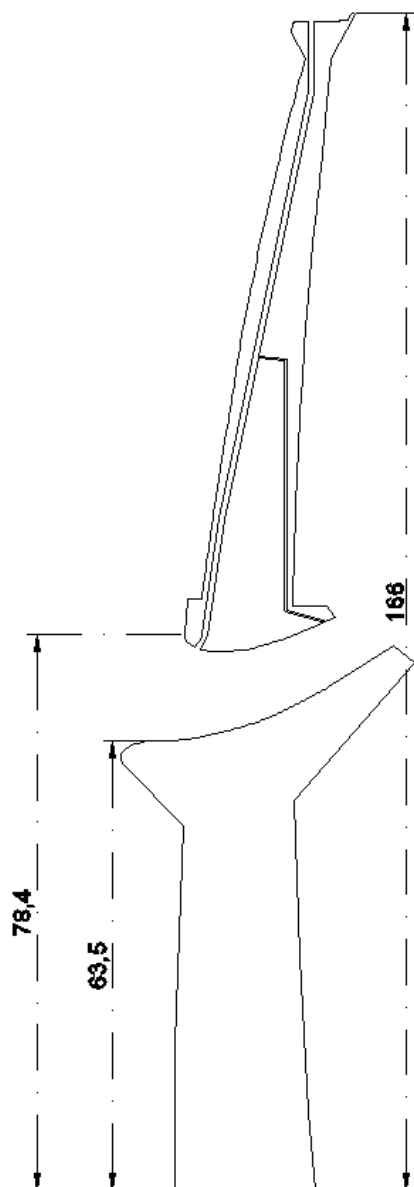


Figura 11 - Corte do perfil central da barragem em estudo

3.1.1.1. Corpo da barragem

O corpo da barragem é edificado em betão e com cerca de 170 metros, desde a fundação até à viga de coroamento. Tratando-se de uma barragem em betão, a rugosidade absoluta utilizado foi de 0,0152 milímetros (Lencastre, 1996).

De seguida, apresenta-se em perspetiva abstrata, nas Figura 12 e Figura 13, o modelo em estudo, pretendendo-se evidenciar as ranhuras das comportas de montante e as paredes de betão tanto de montante como de jusante.

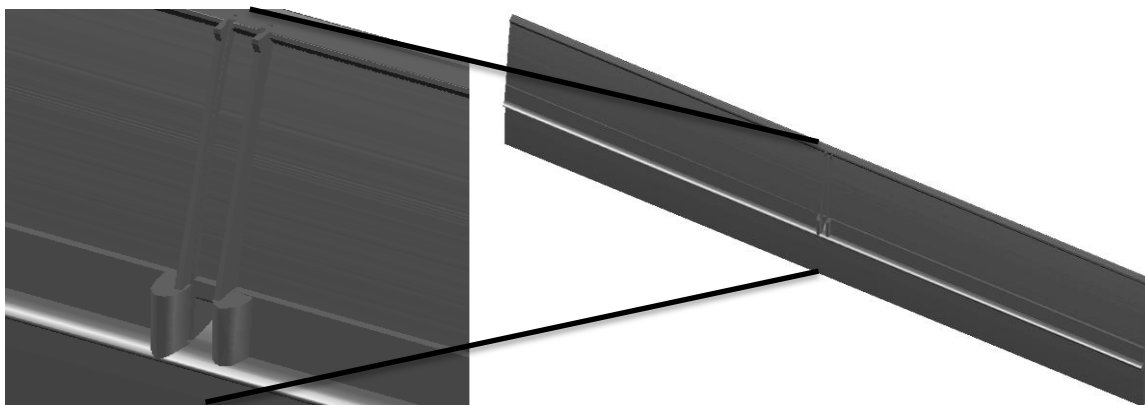


Figura 12- Viste de montante

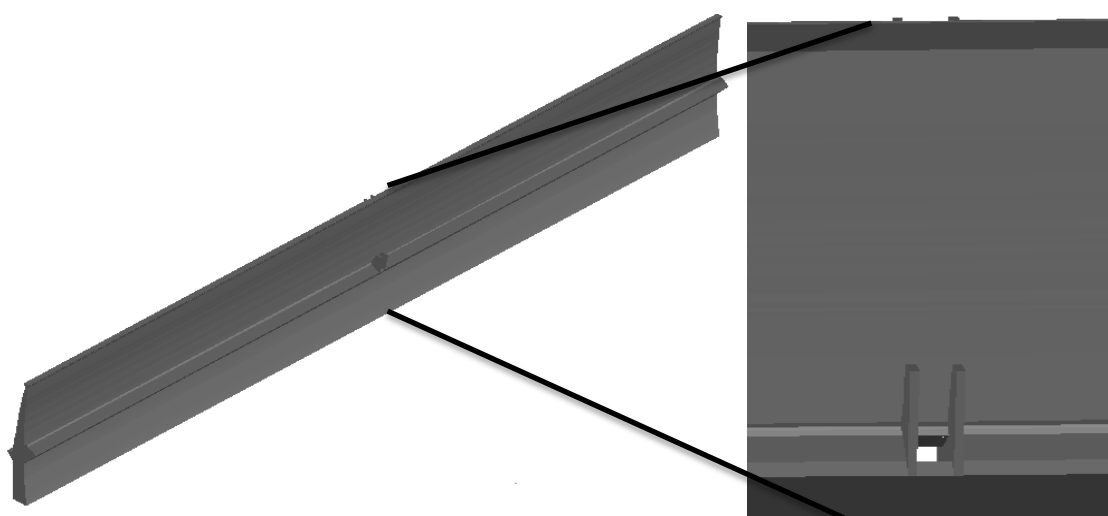


Figura 13 - Vista de jusante

3.1.1.2. Descarregador

Na Figura 11, pode-se observar o corte do descarregador do modelo estudado nesta dissertação. Como é possível observar, trata-se de um descarregador que funciona através de um orifício, usualmente utilizado em barragens de betão, devendo ser controlado por comportas. No modelo elaborado, o orifício está situado a uma cota de aproximadamente 70 metros. A altura do orifício não é uniforme, sendo que a montante apresenta uma altura de 14,9 metros e compreende 6 metros de largura.

Na Figura 14 representa-se a vista de montante do descarregador, já na Figura 15 pode-se observar a vista de jusante do mesmo.

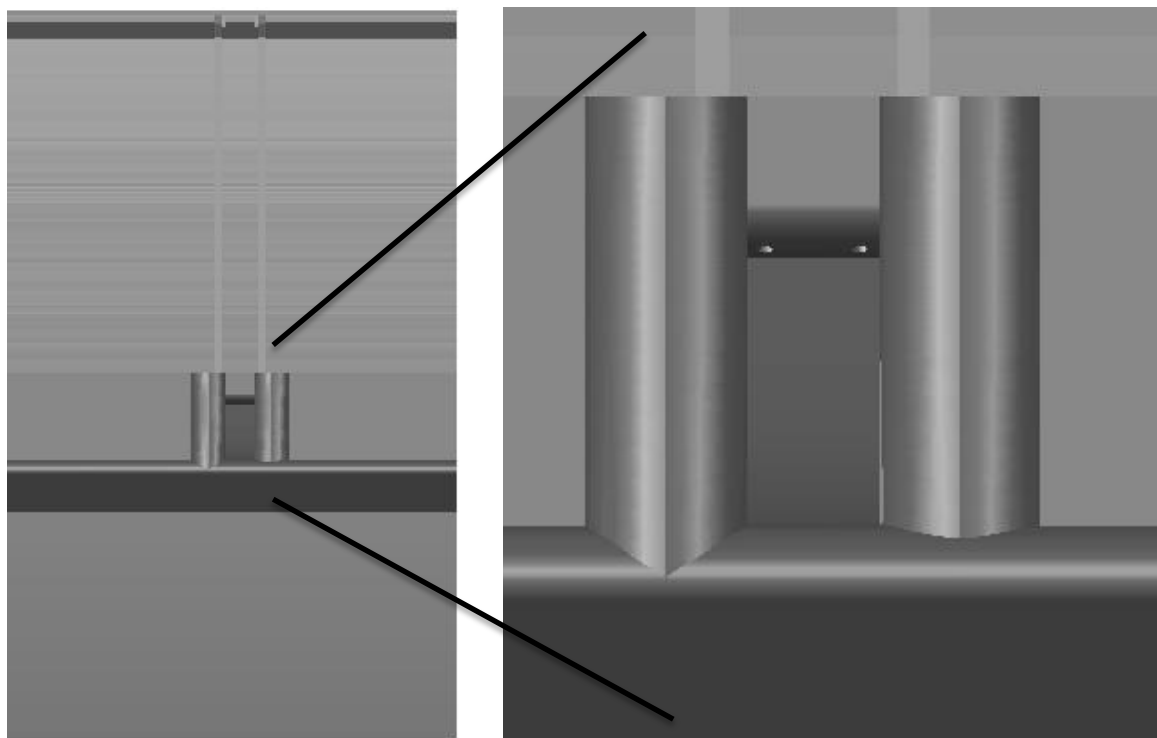


Figura 14 - Vista de montante do descarregador

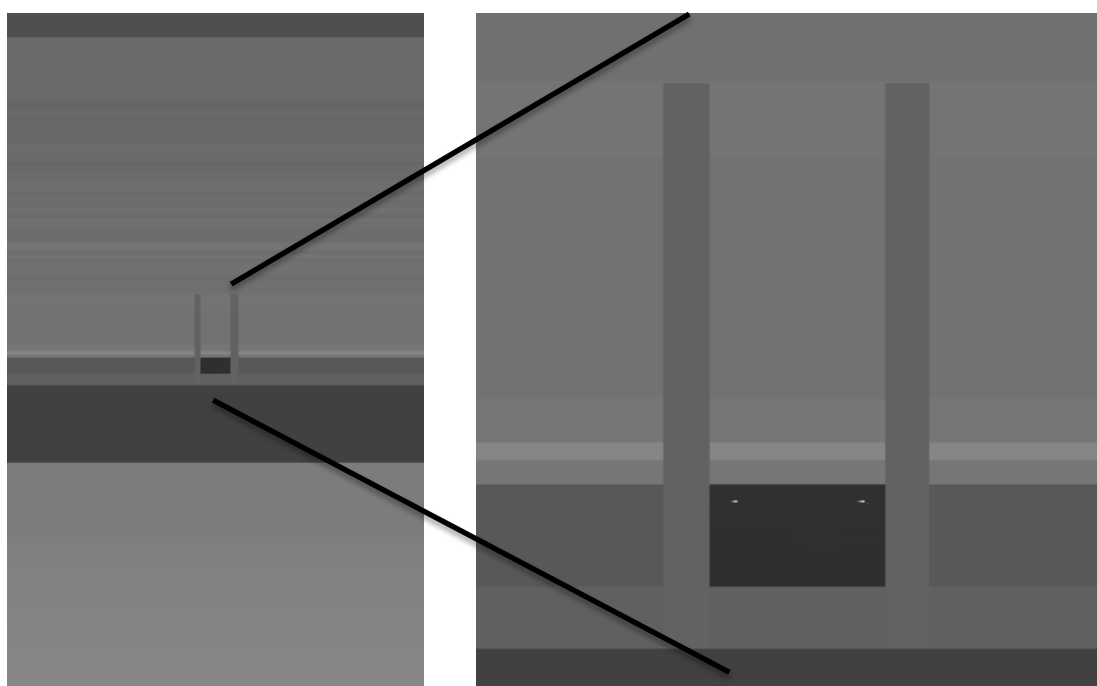


Figura 15 - Vista de jusante do descarregador

Com o intuito de apresentar a forma do interior do descarregador, ilustra-se na Figura 16, o modelo da barragem com um corte pelo centro do descarregador.

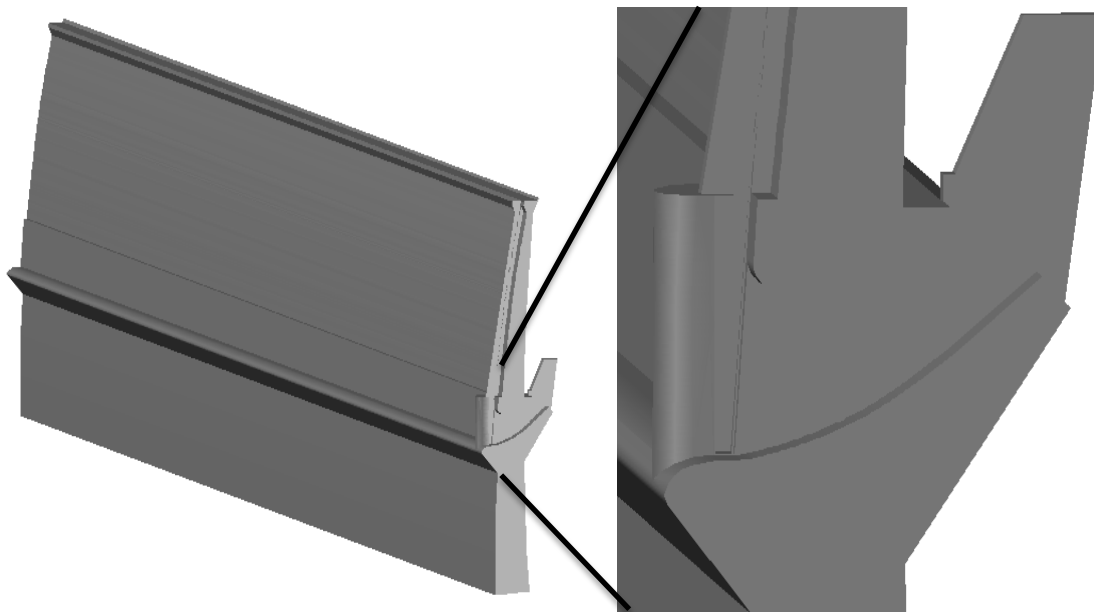


Figura 16 - Interior do descarregador

Na Figura 16 também se pode observar as paredes de betão a jusante do descarregador, cuja função é ajudar a direcionar o jato da água. É igualmente notória a existência de ranhuras nas comportas, que estão localizadas desde o topo da barragem até ao descarregador.

3.1.1.3. Tubagem de arejamento

O sistema de arejamento do descarregador é realizado através de tubagens. Existem dois sistemas de tubos, cada sistema é composto por tubos de 750 e 250 milímetros, que ligam o interior do descarregador ao topo da barragem. Na Figura 17 está representada uma perspetiva desta tubagem.

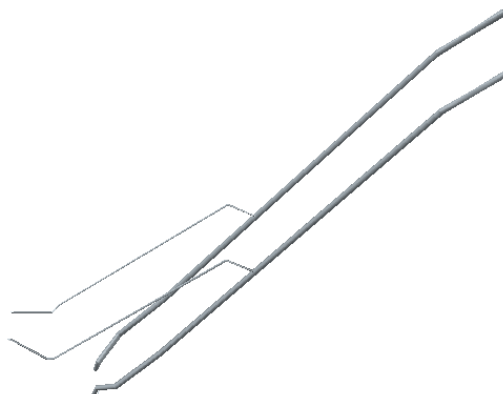


Figura 17 - Tubagem de arejamento

Na Figura 18 pode-se observar a localização da tubagem de arejamento no corpo da barragem onde se evidencia as saídas da tubagem no orifício do descarregador e no topo da barragem.

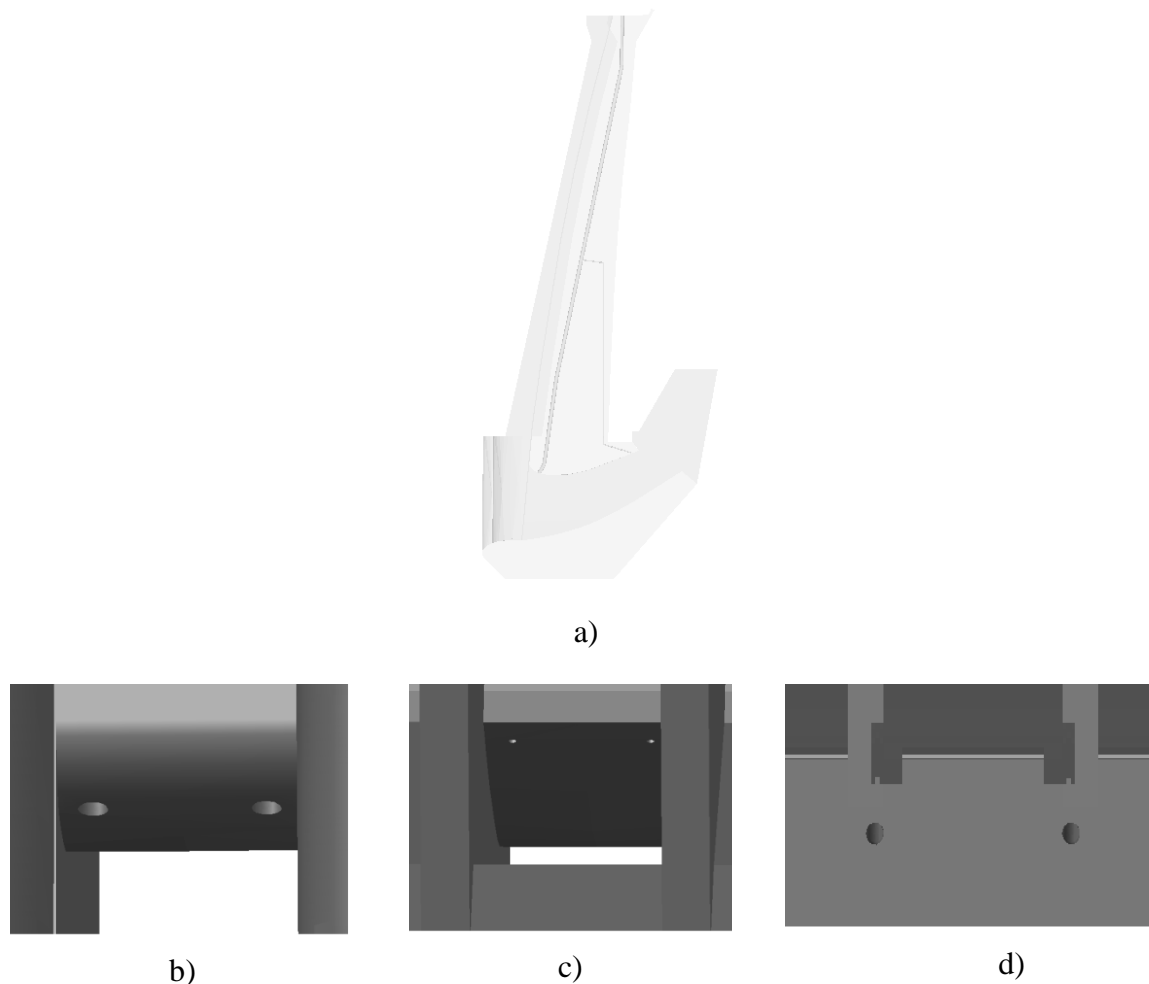


Figura 18- Localização da tubagem de arejamento: a) incorporação da tubagem no corpo da barragem, b) e c) saídas da tubagem no descarregador e d) saída da tubagem no topo da barragem

3.1.1.4. Localização geométrica do modelo

Finda a construção do modelo, foi fulcral localizá-lo geometricamente no espaço para que a modelação seja facilitada na utilização do programa *FLOW-3D*[®]. Deste modo, na Figura 19 está localizado a origem das coordenadas nas direções x, y e z, ou seja, o ponto $\langle 0|0|0 \rangle$. É importante acrescentar que o perfil representado na Figura 11 encontra-se no centro deste modelo, ou seja, para $y=500\text{m}$.

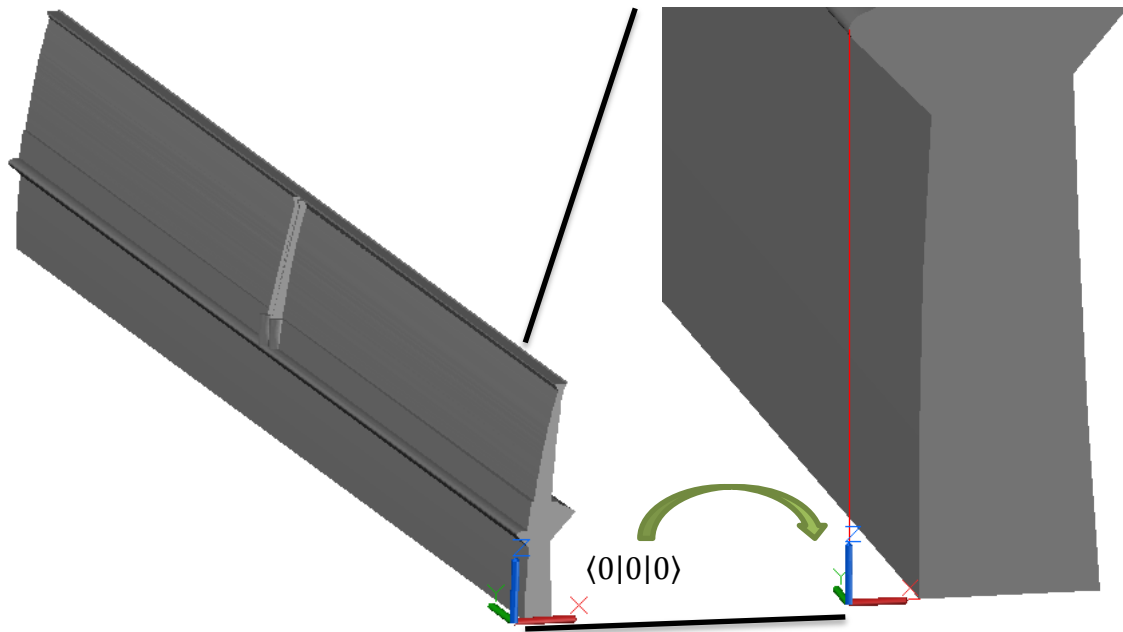


Figura 19 - Localização geométrica do modelo no espaço

3.1.1.5. Importação do sólido

Na realização do modelo em *FLOW-3D*[®], importou-se o ficheiro correspondente ao modelo *AutoCad-3D*[®] em formato *STereoLithography* (STL) para o programa *FLOW-3D*[®]. Na Figura 20 é apresentado o sólido, vista de montante e de jusante, que foi importado para o *FLOW-3D*[®].

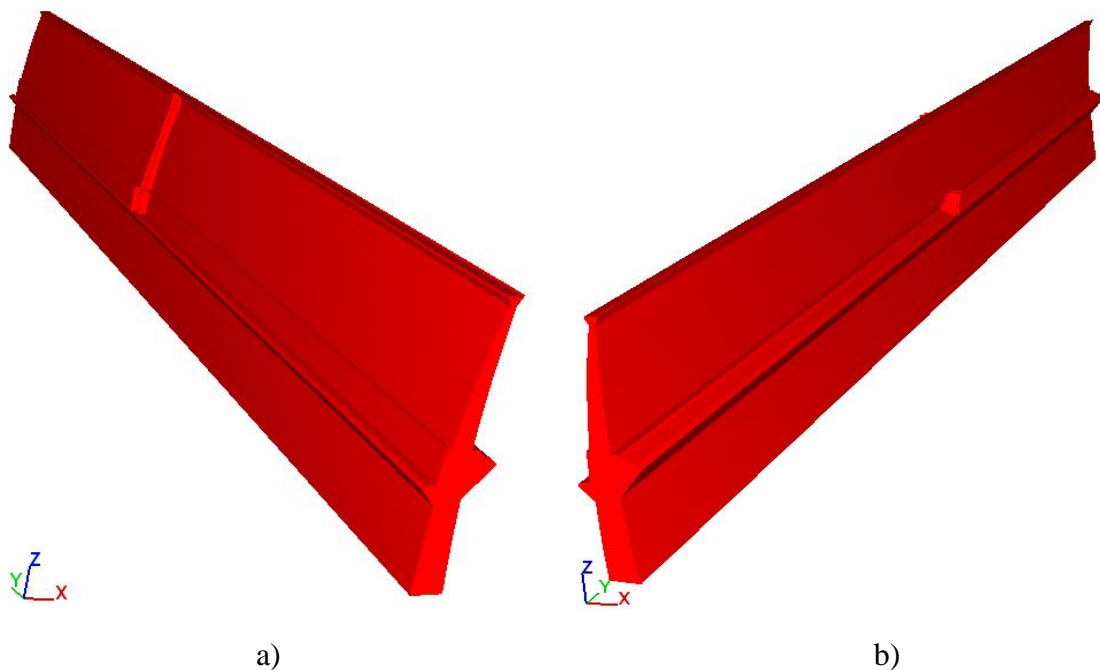


Figura 20 - Modelo importante: a) vista de montante e b) vista de jusante

3.2. Convergência da malha

3.2.1. Considerações gerais

Para iniciar as simulações foi necessário não só definir as condições iniciais e condições de fronteira do escoamento mas também a malha de cálculo. O processamento das condições de fronteira e das condições iniciais vai ser descrito de seguida, relativamente à malha de cálculo, sendo o processo introduzido no capítulo 4.

Perante o problema proposto, foram realizadas várias simulações no *software FLOW-3D®*, cujos resultados vão ser apresentados neste capítulo. A zona de interesse deste estudo é o interior do descarregador, mas pretende-se que este estudo seja o mais rigoroso possível, assim, vão-se gerar várias malhas de cálculo com o objetivo de se atingir uma malha suficientemente refinada para que os resultados obtidos sejam fiáveis. Assim, serão analisados em três locais específicos, apresentados na Figura 21:

- i. Na albufera;
- ii. Na entrada do descarregador;
- iii. No interior do descarregador.

Sempre que nada seja referido, os resultados no plano xy dirão respeito ao perfil central do descarregador (em y). Para o estudo do escoamento na albufera, vai ser gerada uma malha de cálculo, designada por bloco 1, que vai abranger a totalidade do escoamento, tratando-se de uma malha de grandes dimensões. De seguida, vai-se criar uma segunda malha de cálculo, designada por bloco 2, localizada no interior do bloco 1, para estudar com maior precisão a entrada e o interior do descarregador.

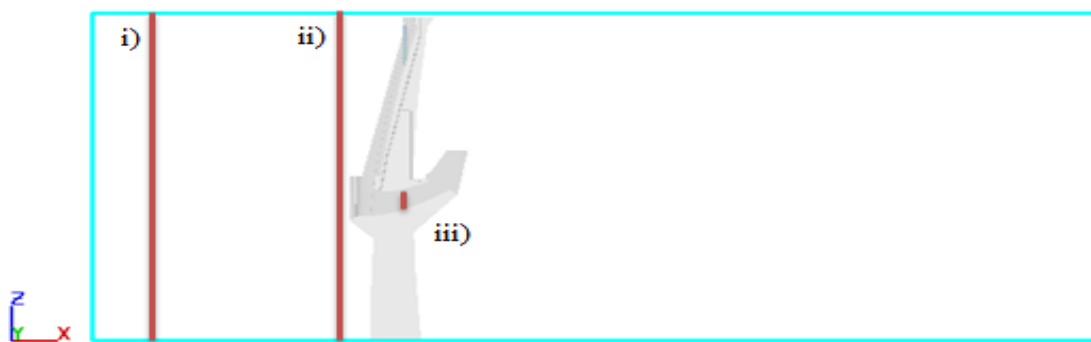


Figura 21 - Perfis estudados: a) na albufera (perfil i)); b) na entrada do descarregador (perfil ii) e c) no interior do descarregador (perfil iii))

O presente estudo centrou-se nos resultados de velocidade e pressão. A título de exemplo, são apresentados os resultados da pressão de uma simulação tipo deste escoamento, elaborada no *software FLOW-3D®*. Trata-se de uma apresentação genérica para que sejam perceptíveis algumas características do escoamento, como a trajetória do escoamento. São apresentadas na Figura 22 a vista superior, lateral e frontal. Finalmente, na Figura 23 pode observar-se uma vista geral do jato efluente do descarregador.

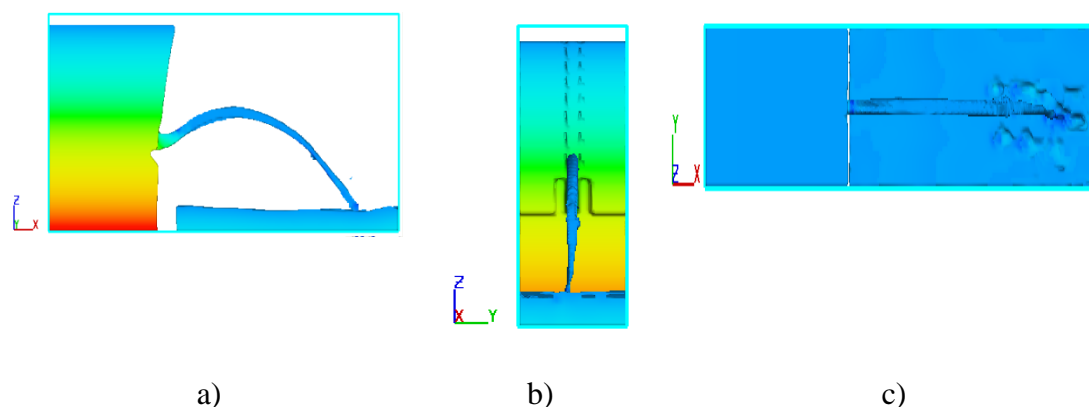


Figura 22 – Resultados da pressão de uma simulação genérica: a) vista lateral, b) vista frontal e c) vista superior

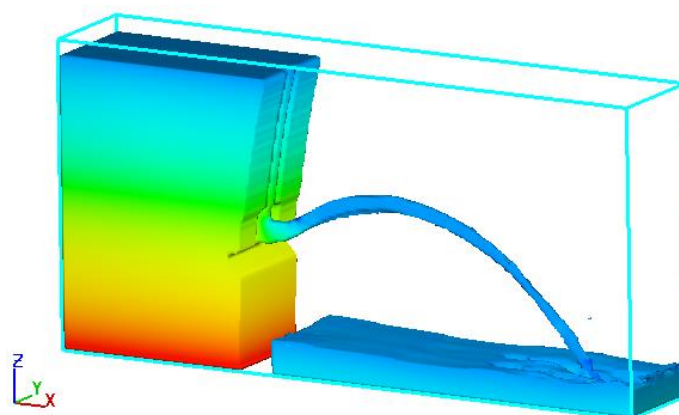


Figura 23 - Vista dos resultados da pressão de uma simulação genérica

Apresenta-se em seguida, na Tabela 1, o resumo de algumas características das simulações numéricas realizadas. Está representado a composição de cada simulação, isto é, o número de blocos que a compõem (1 ou 2) e as aplicações a que foram sujeitas (redução dos limites (R. L.) e a aplicação de *grid overlay* (G. O.)), bem como duração do tempo de cálculo computacional até ser atingida a convergência no tempo, o tempo de simulação e o número de células. No entanto, com o objetivo de diminuir esta duração, aplicou-se o

comando *restart* às simulações, para se partir de uma condição do escoamento mais próxima do final. O tempo volvido para cada simulação é de 30 segundos, no entanto, se se entender que a simulação convergiu no tempo, então dá-se por concluída.

Tabela 1 - Tempo de simulação e tempo de cálculo computacional das simulações

Simulação -	Composição	T. de simulação s	T. cálculo computacional (dias) h:min:seg	Nº de células -
01*	Bloco 1	60	01:44:57	185911
02*	Bloco 1	60	05:22:37	309962
03	Bloco 1	90	18:01:27	585686
04*	Bloco 1	30	10:14:33	950744
05*	Bloco 1+2	30	08:50:46	619361
06*	Bloco 1+ 2	30	09:47:02	753686
07*	Bloco 1+2	30	21:27:43	865417
08*	Bloco 1+2	30	18:05:23	999885
09*	Bloco 1+2 + G. O.	30	18:52:37	610528
10*	Bloco 1+2 + G. O.	30	(1)03:38:59	918768
11*	Bloco 1+2 + G. O.	20	22:32:32	1186112
12*	Bloco 1+2 + G. O.	30	(1)14:39:59	1348808
13*	Bloco 1+2 + G. O.	10	17:17:09	1348808
14*	Bloco 1+2 + G. O.	10	14:11:00	1348808
15*	Bloco 1+2 + G. O.	10	16:15:19	1348808
16*	Bloco 1+2 + G. O.	10	20:42:33	1348808
17*	Bloco 1+2 + G. O.	10	18:08:06	1348808
18*	Bloco 1+2+R. L.+G. O.	40	22:43:49	1233143
19*	Bloco 1+2 +R. L.	40	(1)4:54:03	937741
20*	Bloco 1+2 +R. L.+G. O.	10	(1)04:55:08	1233141
21*	Bloco 1+2 +R. L.	40	(1)02:03:09	937741
22*	Bloco 1+2 +R. L.+G. O.	10	(1)02:10:38	1233141
23*	Bloco 1+2 +R. L.	40	(1)01:45:03	937741
24*	Bloco 1+2 +R. L.+G. O.	10	(1)05:01:04	1233141
25*	Bloco 1+2 +R. L.	40	(1)00:34:33	937741
26*	Bloco 1+2 +R. L.+G. O.	10	(1)05:20:54	1233141
27*	Bloco 1+2 +R. L.	40	(1)03:45:53	937741
28*	Bloco 1+2 +R. L.+G. O.	10	(1)03:52:14	1233141
29*	Bloco 1+2 +R. L.	40	(1)6:32:26	937741
30*	Bloco 1+2 +R. L.+G. O.	10	(1)02:40:21	1233141
31*	Bloco 1+2 +R. L.	40	(1)4:23:12	937741
32*	Bloco 1+2 +R. L.+G. O.	10	(1)00:10:38	1233141

Ao refinar da malha de cálculo, ocorre entre simulação 01 e a simulação 12 (assunto aprofundado nos capítulos seguintes). As simulações assinaladas com um asterisco são as

simulações que tiveram início numa outra simulação através do comando *restart*. E como se pode observar na tabela, a duração do tempo de cálculo computacional das simulações aumenta à medida que se incrementa a malha de cálculo com a exceção da simulação 07 que apresenta uma duração superior à esperada.

3.2.2. Caso de estudo - Bloco 1

Condições iniciais e condições de fronteira:

Seguidamente à importação do sólido procede-se à criação da malha. A malha de cálculo foi definida segundo os planos x, y e z e são definidos os valores mínimos e máximos para as mesmas direções. Na definição destes valores, no total são seis, definem-se as condições de fronteira tendo sido utilizados três tipos de condições de fronteira diferentes:

- Para $X_{\text{mín.}}$: Pressão (P);
- Para $X_{\text{máx.}}$: Pressão (P);
- Para $Y_{\text{mín.}}$: Simetria (S);
- Para $Y_{\text{máx.}}$: Simetria (S);
- Para $Z_{\text{mín.}}$: Parede (W);
- Para $Z_{\text{máx.}}$: Simetria (S).

Na Figura 24 pode-se verificar as condições de fronteira aplicadas no *FLOW-3D*[®].

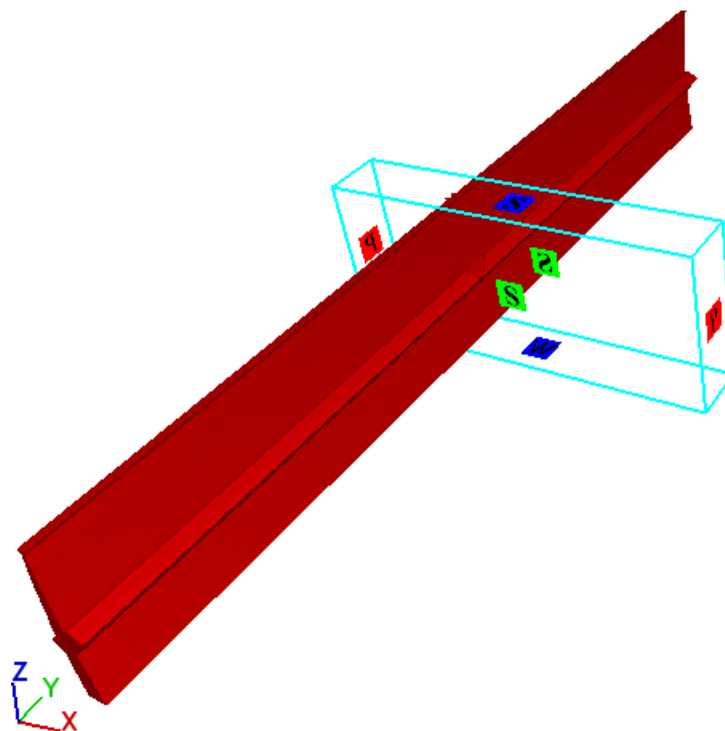


Figura 24 - Condições de fronteira aplicadas ao bloco 1

Em $X_{\text{mín.}}$, definiu-se a altura do fluido a jusante, no valor de 15 metros.

Relativamente às condições iniciais, apenas se definiu a altura inicial da água na albufeira, cujo valor considerado foi de 161,5 metros.

Malha de cálculo

Paralelamente, definiu-se os valores da malha de cálculo, criada de forma a abranger a totalidade do escoamento por se tratar do local de interesse neste estudo.

Como o escoamento vai decorrer segundo a direção x , foi considerado um maior comprimento neste eixo. Segundo a direção z , é importante referir que a altura da malha deve conter a altura da barragem, uma vez que se tem em conta que a albufeira vai estar repleta de água e, por ultimo, na direção y apenas se considera o comprimento necessário para que não haja influência sobre o jato do escoamento.

Como já foi referido no capítulo 2, as malhas de cálculo são compostas por células, sendo que no programa *FLOW-3D*[®], para cada eixo, introduz-se o número de células e os limites inferiores e superiores da malha. Garante-se, assim, que a malha é constituída por células cúbicas. Portanto, elaborou-se a malha de cálculo apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Primeira malha de cálculo elaborada no *FLOW-3D*[®]

		C. células m	Nº células por eixo -	C. da malha m	Nº de células total da malha -
Simulação 01	x	3	133	399	185911
	y		21	63	
	z		57	171	

Na Figura 25 pode-se observar a malha de cálculo gerada no programa *FLOW-3D*[®].

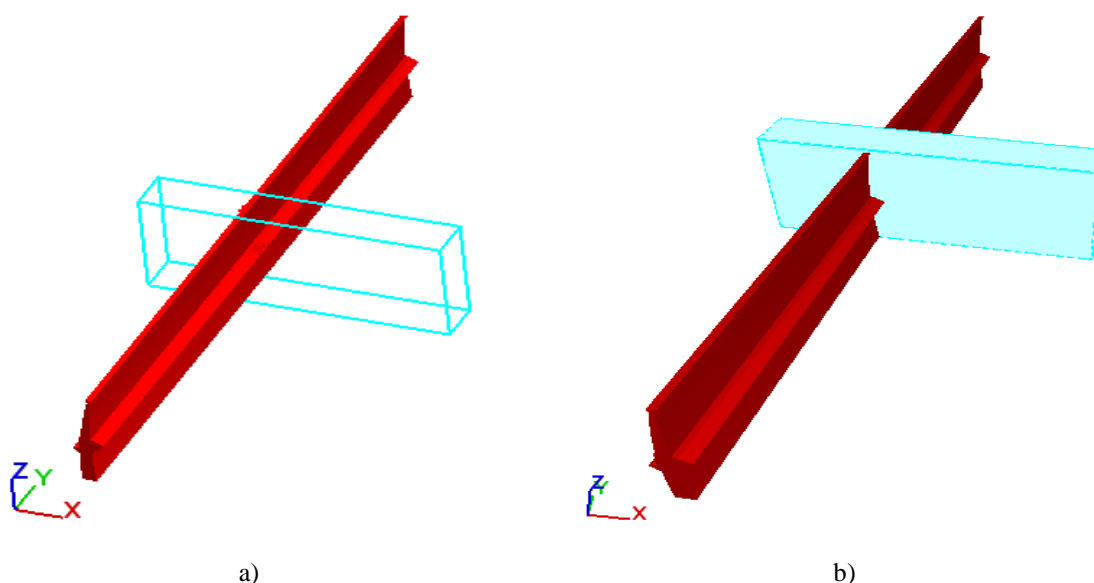


Figura 25 - Malha de cálculo aplicada ao modelo: a) limites de cada direção, b) composição da malha de cálculo gerada

A simulação 01 representa a primeira malha de cálculo gerada, composta por 185911 células de 3 metros de comprimento, traduzindo uma malha de cálculo grosseira. Seguidamente, refina-se a malha com o objetivo de se estudar a convergência da malha para se obter valores credíveis. O processo de refinamento consiste em diminuir o comprimento das células, e uma vez que o comprimento da malha é aproximadamente igual, então vai-se aumentando do número de células por eixo e consequentemente o número total de células que constituem a malha. Este facto leva a que a duração de cada simulação aumente com o avanço do processo de refinamento. No entanto, quando se configura novamente a malha de cálculo, aplica-se o comando *restart* da simulação anterior. Apresenta-se na Tabela 3 o refinamento posterior da malha até que o *software* assim o permitisse.

Tabela 3 - Refinamento da malha de cálculo do bloco 1

		C de células	Nº Células por eixo	C. da Malha	Nº de células total da malha
		m	-	m	-
Simulação 02	x	2,5	160	400	309962
	y		25	62,5	
	z		68	170	
Simulação 03	x	2	200	400	585686
	y		31	62	
	z		85	170	
Simulação 04	x	1,7	235	399,5	950744
	y		37	62,9	
	z		100	170	

Conseguiu-se atingir, na simulação 04, uma malha de cálculo constituída por 950744 células com comprimento de 1,5 metros e a duração desta simulação foi de 10 horas, 14 minutos e 33 segundos.

Apresentação e discussão de resultados obtidos

Geralmente, a comparação de resultados das várias simulações é realizada através das variáveis pressão e velocidade. Como já foi referido, no estudo do bloco 1 apenas se analisa os resultados da zona da albufeira, assim sendo, elaborou-se os gráficos para a variável pressão, apresentado na Figura 26.

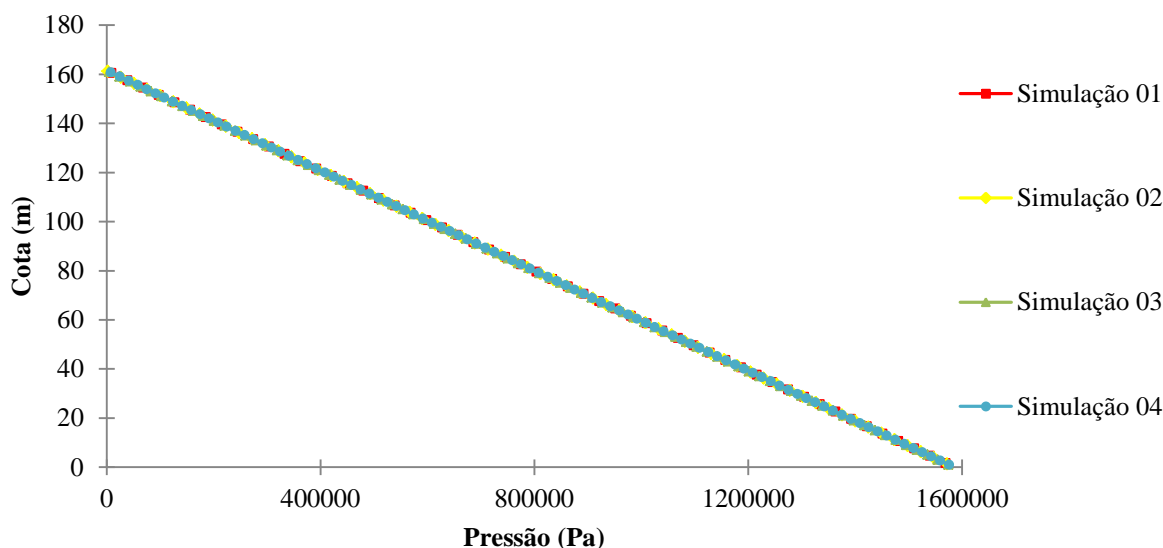


Figura 26 – Resultados do perfil de pressões na secção i) da albufeira para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1

Tal como era esperado, os resultados da pressão para as diferentes simulações realizadas são aproximadamente iguais, sendo que o valor desta variável decresce com a altura, em que no fundo da albufeira, ou seja, zona considerada de cota nula, o valor da pressão é de $1,6 \times 10^6$ Pascais e à superfície a pressão é nula. Assim, uma vez que os resultados estão de acordo com o espectável, pode-se considerar estas simulações válidas.

A Tabela 4 apresenta os erros obtidos entre as simulações 01 e 04.

Os resultados são comparados através do erro relativo das simulações 01, 02 e 03 em relação à simulação correspondente à malha de cálculo mais refinada, ou seja, a simulação 04.

O erro relativo calculou-se da seguinte forma:

$$Er_i(\%) = \frac{E_i - E_{04}}{E_{04}} \times 10 \quad (70)$$

em que, i varia de 01 e 03.

Tabela 4 – Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações de 01 a 04

Cota m	E(Simulação 01- Simulação 04) %	E(Simulação 02 – Simulação 04) %	E(Simulação 03 – Simulação 04) %
10	0,0	0,0	0,0
20	0,0	0,0	0,0
30	0,0	0,0	0,0
40	0,0	0,0	0,0
50	0,0	0,0	0,0
60	0,0	0,0	0,0
70	0,0	0,0	0,0
80	0,0	0,0	0,0
90	0,0	0,0	0,0
100	0,0	0,0	0,0
110	0,0	0,0	0,0
120	0,0	0,0	0,0
130	0,0	0,0	0,0
140	0,1	0,0	0,0
150	0,2	0,1	0,1
160	2,0	1,2	1,0

Como os resultados da pressão são muito semelhantes para as várias simulações, verifica-se que qualquer das malhas parece conduzir a uma solução correta.

Seguidamente vão-se apresentar, na Figura 27 os resultados relativos à velocidade do escoamento na direção x, a direção do escoamento.

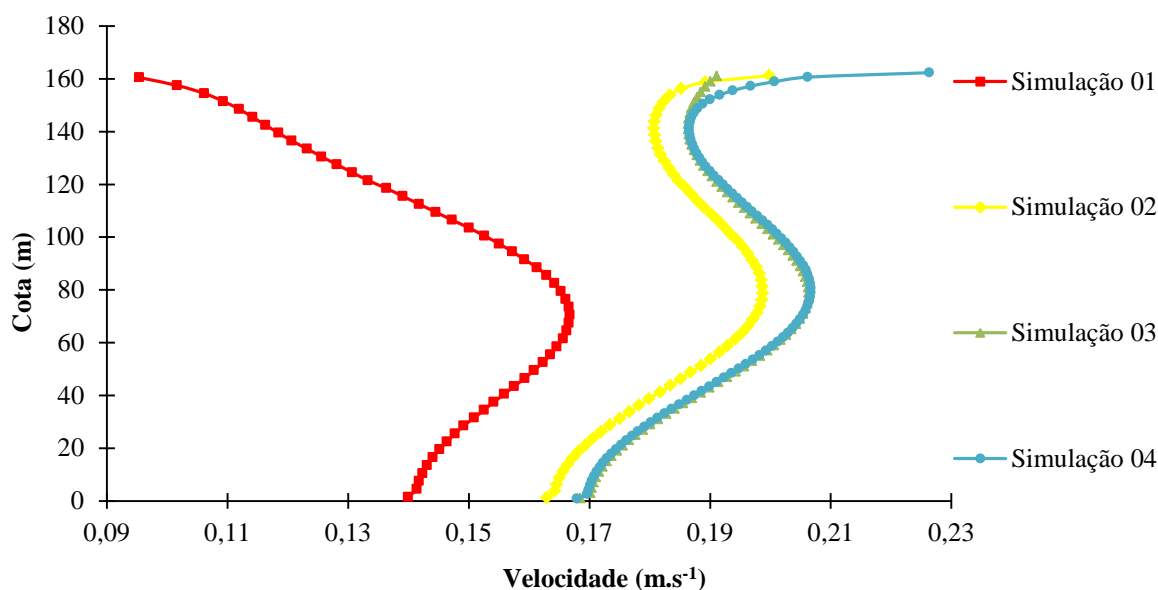


Figura 27 - Resultados do perfil de velocidades na secção i) da albufeira para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1

Pelo gráfico obtido, verifica-se que os valores da velocidade são muito próximos de zero traduzindo que existe pouco movimento de fluido, o que já era esperado uma vez que se está a estudar a zona de albufeira. Contudo, para as cotas entre os 60 e os 100 metros, verifica-se um aumento da velocidade que se deve ao facto de este ser o nível de localização do descarregador, zona onde é esperado um aumento da velocidade ao efeito de chamada do mesmo.

Neste gráfico consegue-se perceber a proximidade dos resultados das simulações à medida que se foi refinando a malha de cálculo. Como se pode verificar, os resultados da simulação 04 são muito semelhantes aos resultados da simulação 03, comprovando a convergência da malha. Apresenta-se na Tabela 5 o resultado do erro relativo da velocidade entre as simulações 01 e 04.

Tabela 5 - Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 01 a 04

Cota m	E(Simulação 01- Simulação 04) %	E(Simulação 02 – Simulação 04) %	E(Simulação 03 – Simulação 04) %
10	16,8	3,3	-0,2
20	16,8	3,4	-0,2
30	16,8	3,4	-0,2
40	17,0	3,5	-0,2
50	17,3	3,6	-0,1
60	17,9	3,7	0,0
70	18,8	3,8	0,1
80	20,1	3,9	0,2
90	21,9	3,9	0,3
100	24,1	3,8	0,3
110	26,8	3,7	0,3
120	29,8	3,5	0,3
130	33,1	3,3	0,1
140	36,7	3,1	0,1
150	41,3	3,5	0,8
160	52,8	4,7	6,6

Com o cálculo do erro relativo entre as várias simulações, para a variável velocidade, percebe-se que os resultados da simulação 03 são muito semelhantes aos da simulação 04, como também se pode verificar no gráfico da Figura 27, pelo que se conclui que a simulação 03 é a mais eficiente, uma vez que, para além dos resultados mais semelhantes com a simulação 04, o tempo de cálculo computacional é inferior por beneficiar de uma malha de cálculo mais leve. Resumindo, a malha de cálculo que define o bloco 1 é a malha de cálculo representada pela simulação 03.

3.2.3. Caso de estudo – Bloco 1 + bloco 2

Findo o estudo da albufeira através do bloco 1, vai-se introduzir um outro bloco de forma a refinar a malha de cálculo na zona do descarregador, por se tratar do local de maior interesse para este estudo, completando assim o estudo do escoamento e da convergência da malha.

Condições iniciais e condições de fronteira

Dado que este bloco será introduzido no bloco 1, as condições iniciais do modelo mantêm-se abrangendo também o bloco 2.

Relativamente às condições de fronteira, o programa *FLOW-3D*[®] define automaticamente a condição de fronteira do tipo simetria para os três planos, x, y e z, tanto para os valores mínimos como para os máximos. Na Figura 28 podem-se observar as condições de fronteira aplicadas a este bloco.

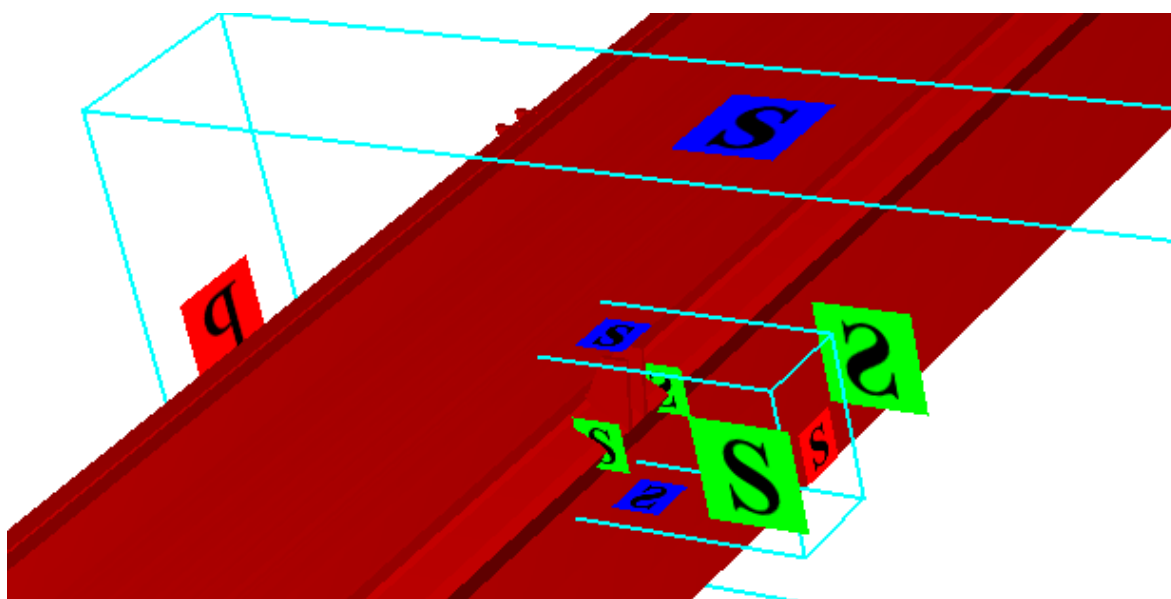
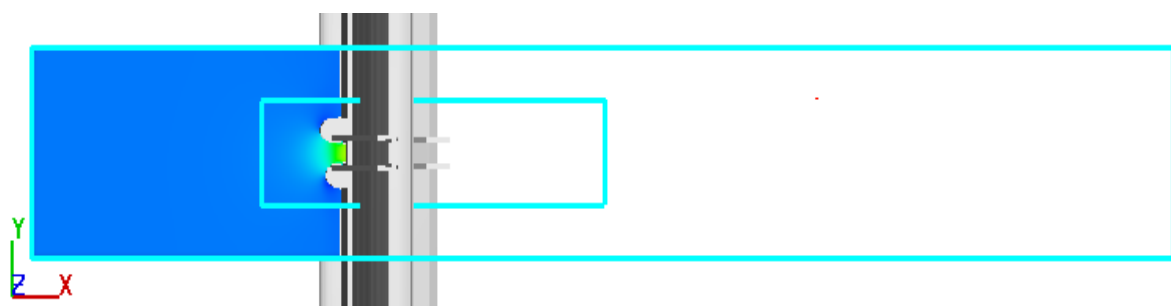


Figura 28 - Condições de fronteira do bloco 2

Malha de cálculo

Os limites do bloco 2 foram definidos para que os valores da velocidade com alterações significativas ficassem no seu interior. Estes limites podem ser observados na Figura 29.



a)

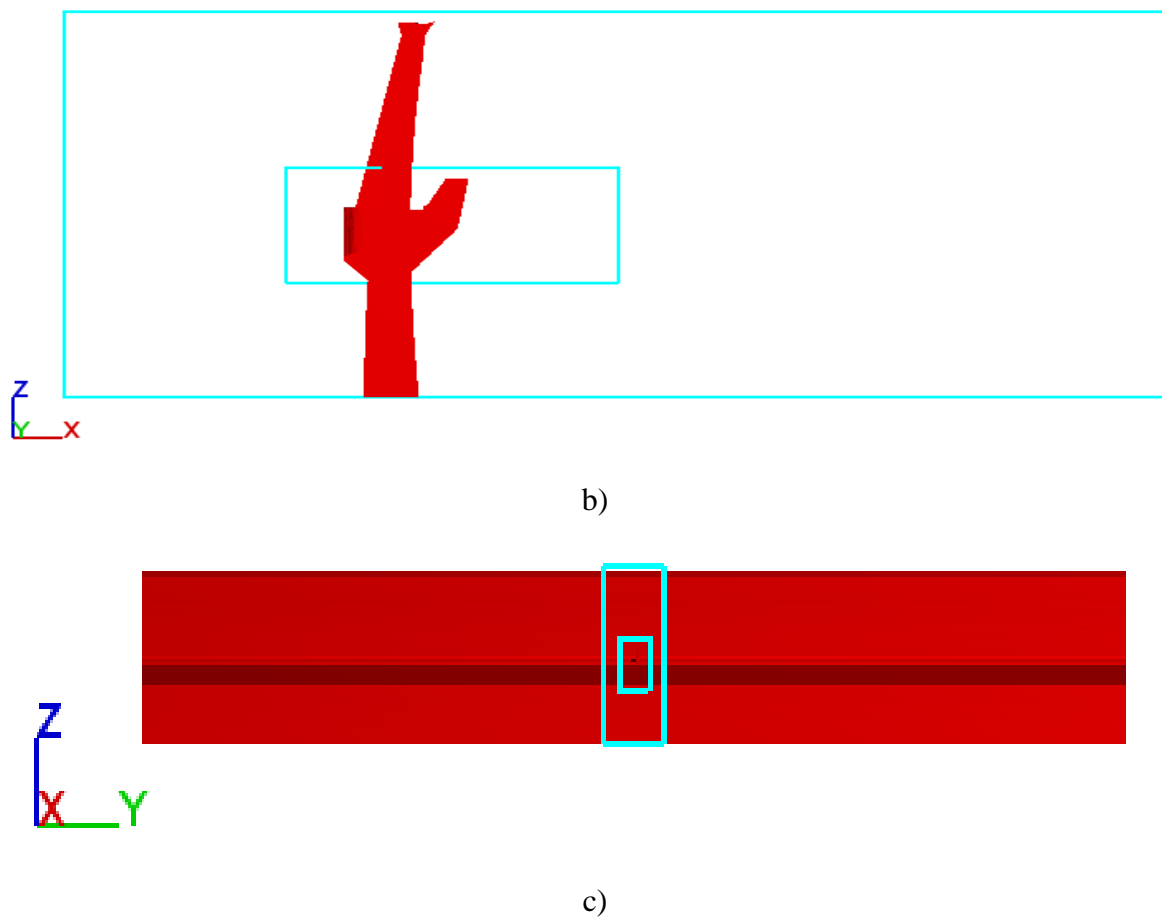


Figura 29 – Definição dos limites dos blocos 1 e 2: a) no plano xy, b) no plano xz, c) no plano yz

Na Figura 30 representa-se a grelha da malha de cálculo do bloco 2, incorporado no bloco 1.

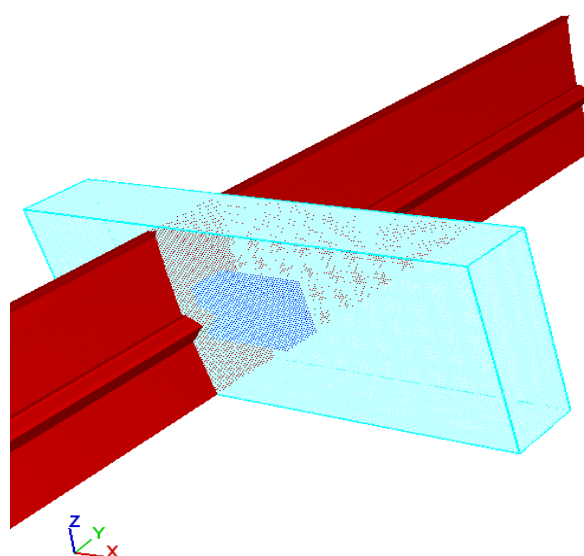


Figura 30 - Malha de cálculo do bloco 2

Foram realizadas mais quatro simulações, cujas malhas de cálculo são representadas na Tabela 6. A malha de cálculo do bloco 1 vai manter-se para estas simulações, pelo que não são representadas nesta fase.

Tabela 6 - Refinamento da malha de cálculo do bloco 1 + bloco 2

		C. de Células	Nº células por eixo	C. da Malha	Nº real de células da malha
		m	-	m	-
Simulação 05	x	1,5	80	120	619361
	y		21	31,5	
	z		34	51	
Simulação 06	x	1	120	120	753686
	y		31	31	
	z		51	51	
Simulação 07	x	0,9	134	120,6	865417
	y		35	31,5	
	z		56	50,4	
Simulação 08	x	0,75	160	120	999885
	y		41	30,75	
	z		68	51	

Analogamente ao estudo do bloco 1, na elaboração do bloco 2 começou-se por se considerar com uma malha mais grosseira para se refinar seguidamente. Logo, a malha de cálculo da simulação 05 foi definida com 619361 células, em que cada célula apresenta 1,5 metros de comprimento, tendo levado 8 horas, 50 minutos e 46 segundos a simular. A malha de cálculo mais refinada que se obteve a simulação 08, apresenta células com 0,75 metros de comprimento, com um total de 999885 células, tendo simulado durante 18 horas, 5 minutos e 24 segundos.

Apresentação e discussão dos resultados obtidos

Para o bloco 2 foi realizado o estudo de duas zonas, entrada e interior do descarregador, e apresentando-se os resultados obtidos para ambas as zonas. Para o estudo da entrada do descarregador, segundo a direção z, a malha de cálculo está definida, aproximadamente, entre os 50 e os 100 metros, no entanto os resultados foram apenas estudados entre os 60 e os 90 metros, uma vez que os resultados das células localizadas na fronteira do bloco 2 podem estar sujeitos a erros devido à passagem de células de diferentes dimensões entre os dois blocos.

Entrada do descarregador:

Apresentam-se no gráfico da Figura 31, os resultados obtidos da pressão das simulações elaboradas para a entrada do descarregador.

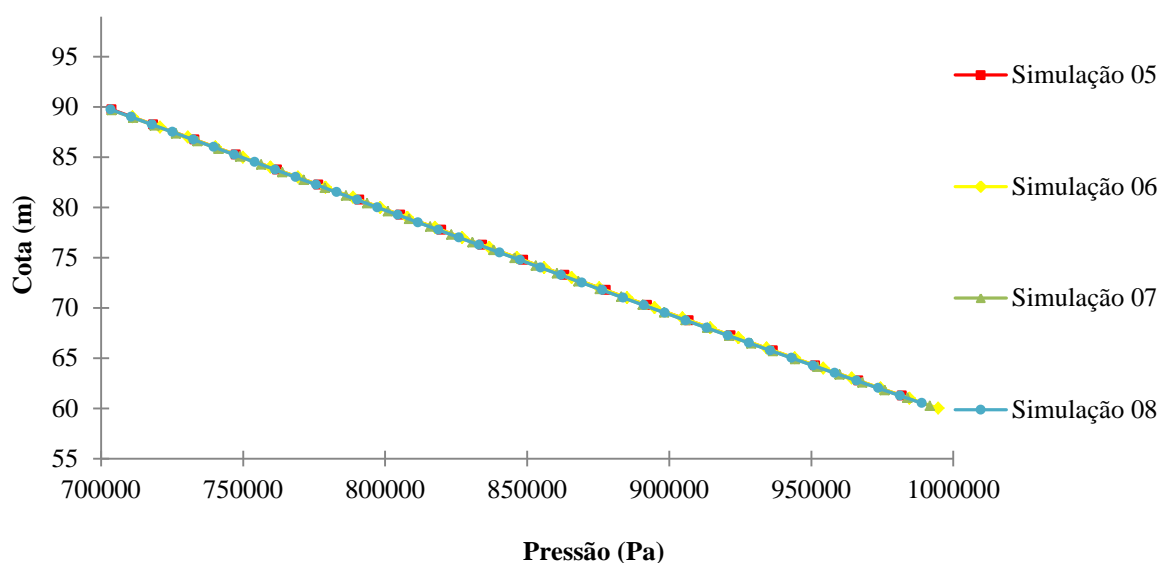


Figura 31 - Resultados do perfil de pressões na secção ii) da entrada do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2

Neste gráfico, tal como nos gráficos de pressão anteriormente apresentados, os resultados são semelhantes para as várias simulações, tal como esperado. O valor da pressão para a cota de 90 metros é aproximadamente de $7,0 \times 10^5$ Pascals e para a cota de 60 metros é de $1,0 \times 10^6$ Pascals. É importante referir que estes valores coincidem com os valores do gráfico da Figura 26 uma vez que ambos os perfis de estudo são em superfície livre.

Foi calculado o erro relativo entre as simulações 05, 06 e 07 relativamente à simulação que corresponde à malha mais refinada. O resultado do erro relativo entre as simulações 05 e a 08 é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 – Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações 05 a 08 na entrada do descarregador

Cota m	E(Simulação 05- Simulação 08) %	E(Simulação 06 – Simulação 08) %	E(Simulação 07 – Simulação 08) %
60	0,1	0,1	0,0
65	0,1	0,1	0,0
70	0,1	0,1	0,0
75	0,1	0,1	0,0
80	0,1	0,1	0,0
85	0,1	0,1	0,0
90	0,1	0,0	0,0

Tal como no gráfico da Figura 31, nesta tabela também se verifica que os resultados da pressão são muito semelhantes para as várias simulações, ou seja, mais uma vez, fica demonstrado que qualquer das malhas conduz a uma solução correta. Seguidamente, na Figura 32, mostra-se o gráfico dos resultados obtidos para a velocidade, das simulações 05 a 08 elaboradas para a entrada do descarregador.

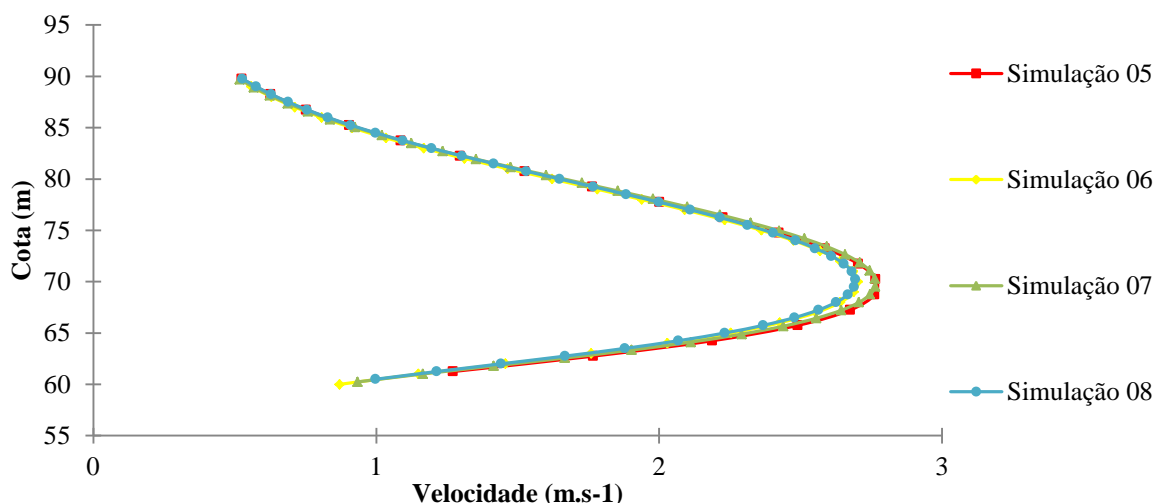


Figura 32 - Resultados do perfil de velocidades na secção ii) da entrada do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2

Uma vez que se está a estudar uma zona mais próxima do descarregador, a velocidade do fluido aumenta ligeiramente, verificando-se o maior aumento para a cota de 70 metros, cujo valor da velocidade é de 2,7 metros por segundo.

Para esta variável também se realizou a comparação dos resultados obtidos graficamente através do cálculo do erro relativo das simulações 05 a 08 apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 05 a 08 na entrada do descarregador

Cota m	E(Simulação 05- Simulação 08) %	E(Simulação 06 – Simulação 08) %	E(Simulação 07 – Simulação 08) %
60	4,1	0,1	0,4
65	4,8	1,0	3,6
70	2,7	0,4	2,6
75	0,8	0,5	2,0
80	0,3	1,6	0,9
85	0,4	2,6	1,1
90	0,4	3,3	2,5

Analisando o gráfico da Figura 32, verifica-se que os resultados da simulação 05 e da simulação 07 são muito semelhantes, tal como os da simulação 06 e da simulação 08. O mesmo se conclui na Tabela 8 uma vez que o erro relativo da velocidade da comparação entre a simulação 06 e a simulação 08 é inferior à comparação da simulação 05 e 07 com a simulação 08. Ainda no gráfico da Figura 32, verifica-se a aproximação das simulações 05 e 06 à simulação 08 e como os erros relativos da velocidade são pequenos, então considerou-se que a malha convergiu para a simulação 08.

Interior do descarregador:

Na Figura 33, apresenta-se os resultados obtidos da variável pressão das simulações elaboradas para o interior do descarregador.

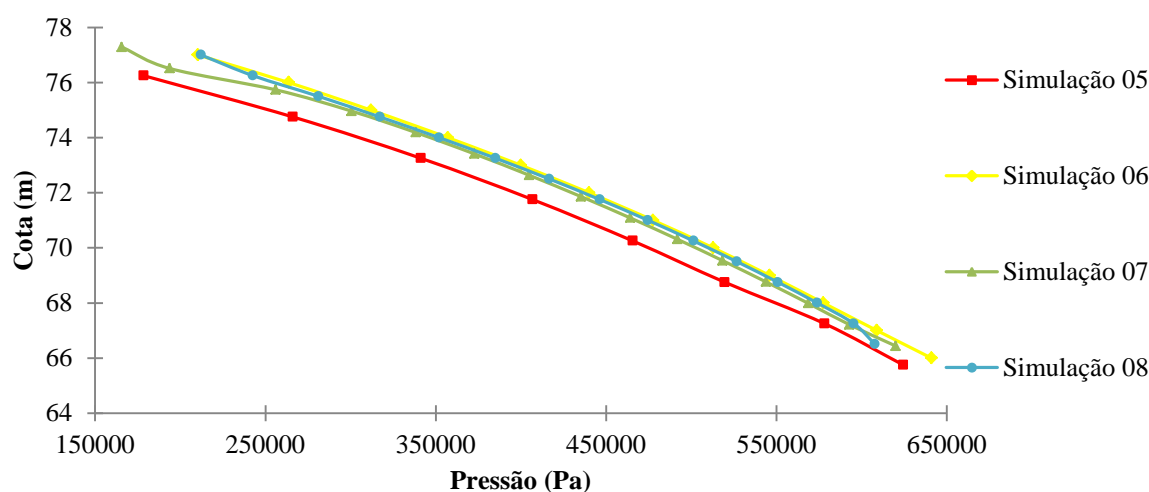


Figura 33 - Resultados do perfil de pressões na secção iii) do interior do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2

Pela análise deste gráfico, continua-se a verificar que o valor da pressão diminui com o aumento da altura de água, para cotas de 70 metros obteve-se, aproximadamente, pressões de $2,0 \times 10^5$ Pascais e para cotas de 66 metros obteve-se, aproximadamente, pressões de $6,3 \times 10^5$. No entanto, o valor desta diminuiu comparativamente às outras simulações e nota-se uma discrepância nos resultados. Esta situação é devida ao facto do estudo ser no interior do descarregador.

Foi calculado o erro relativo entre as simulações 05, 06 e 07 relativamente à simulação que corresponde à malha mais refinada. O resultado do erro relativo entre as simulações 05 e a 08 é mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações 05 a 08 no interior do descarregador

Cota m	E(Simulação 05- Simulação 08) %	E(Simulação 06 – Simulação 08) %	E(Simulação 07 – Simulação 08) %
67	-2,3	1,6	0,1
68	-4,4	0,6	-1,0
69	-5,9	0,6	-1,2
70	-6,9	0,6	-1,4
71	-8,1	0,6	-1,6
72	-9,3	0,8	-1,5
73	-11,0	1,1	-1,5
74	-13,7	1,5	-1,5
75	-17,6	2,2	-2,2
76	-24,4	3,2	-8,1

Na tabela anterior verifica-se uma aproximação das simulações 05, 06, 07 à simulação 08, salientando que as duas últimas já apresentam resultados semelhantes uma vez que o erro relativo é relativamente pequeno. O mesmo se verifica no gráfico da Figura 33, onde se pode observar a proximidade dos resultados das simulações 06 e 07 à simulação 08. A Figura 34 apresenta-se os resultados obtidos da velocidade das simulações elaboradas para a entrada do descarregador.

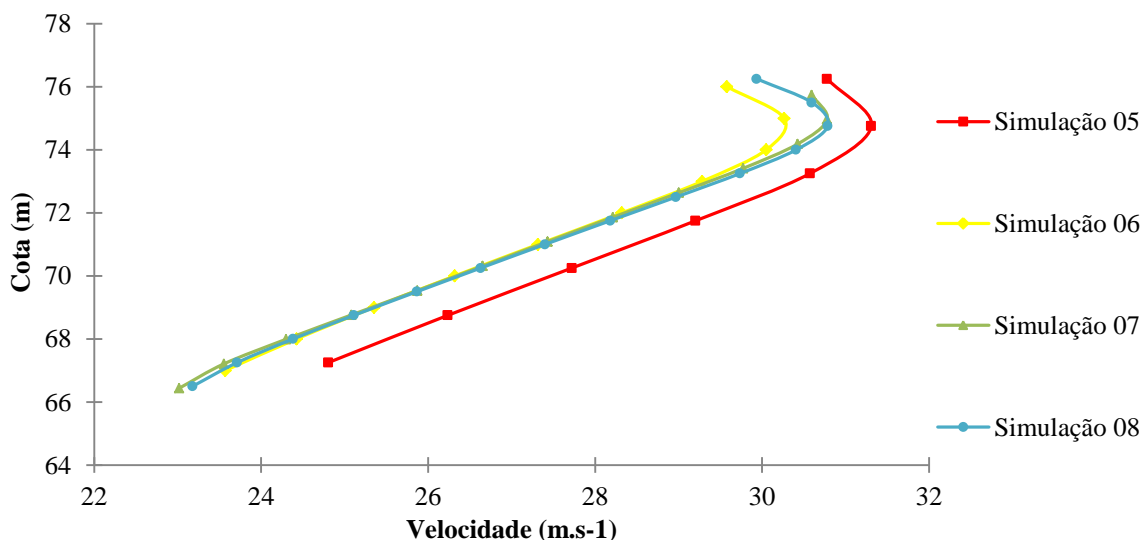


Figura 34 - Resultados do perfil de velocidades na secção iii) do interior do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2

Neste último gráfico, tal como esperado, verifica-se um aumento da velocidade do fluido, atingindo um máximo de, aproximadamente, 31 metros por segundo. Este facto ocorre por

se tratar do estudo no interior do descarregador. A comparação dos resultados obtidos graficamente é realizada através do cálculo do erro relativo da velocidade entre as simulações 05 a 08, que é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 05 a 08 no interior do descarregador

Cota m	E(Simulação 05- Simulação 08) %	E(Simulação 06 – Simulação 08) %	E(Simulação 07 – Simulação 08) %
67	-3,8	0,2	-0,5
68	4,7	0,2	-0,3
69	4,4	-0,1	-0,2
70	4,2	-0,2	-0,1
71	3,9	-0,3	-0,2
72	3,5	-0,4	-0,3
73	2,9	-0,7	-0,4
74	1,8	-1,2	-0,5
75	1,6	-1,5	0,2
76	2,4	-1,9	1,5

Também nesta tabela se verifica uma aproximação das simulações 05, 06 e 07 à simulação 08. Esta convergência dos resultados verifica-se igualmente no gráfico da Figura 34, em que os gráficos das simulações 07 e 08 coincidem.

Assim, pela análise dos gráficos e do cálculo do erro relativo das variáveis pressão e velocidade conclui-se que o bloco 2 converge na simulação 08. Tanto na entrada como no interior do descarregador as simulações do bloco 2 convergem para a simulação 08, então significa que este bloco é definido pela malha de cálculo desta simulação, ou seja, é composto por células cúbica de 0,75 metros de lado.

3.2.4. Caso de estudo – Aplicação de *grid overlay*

Nesta fase do estudo, o domínio do modelo é definido pela malha de cálculo representada pela simulação 03, cujas células apresentam 2 metros de comprimento e é constituída por 185911 células, que corresponde ao bloco 1. Também já se definiu a malha de cálculo do bloco 2, representada pela simulação 08, em que apresenta células com 0,75 metros de comprimento, com um total de 999885 células. Como ainda se pretende refinar o domínio do modelo aplicou-se a condição de fronteira *grid overlay*, uma vez que permite reduzir o

domínio, permitindo refinar a malha de cálculo no local de interesse, ou seja, a malha de cálculo do bloco 2.

Condições iniciais e condições de fronteira

A condição de fronteira foi aplicada em $X_{máx}$. uma vez que o escoamento a partir da saída do descarregador não é relevante para os locais de estudo do problema (albufeira, entrada e interior do descarregador). Na Figura 35 observa-se a condição de fronteira, *grid overlay*, aplicado a jusante do modelo no *FLOW-3D*[®].

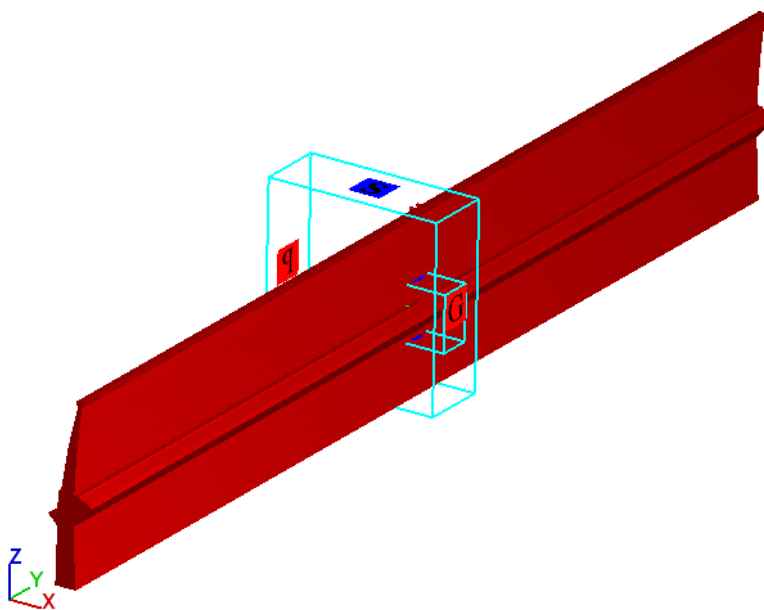


Figura 35 - Aplicação da condição de fronteira *grid overlay*

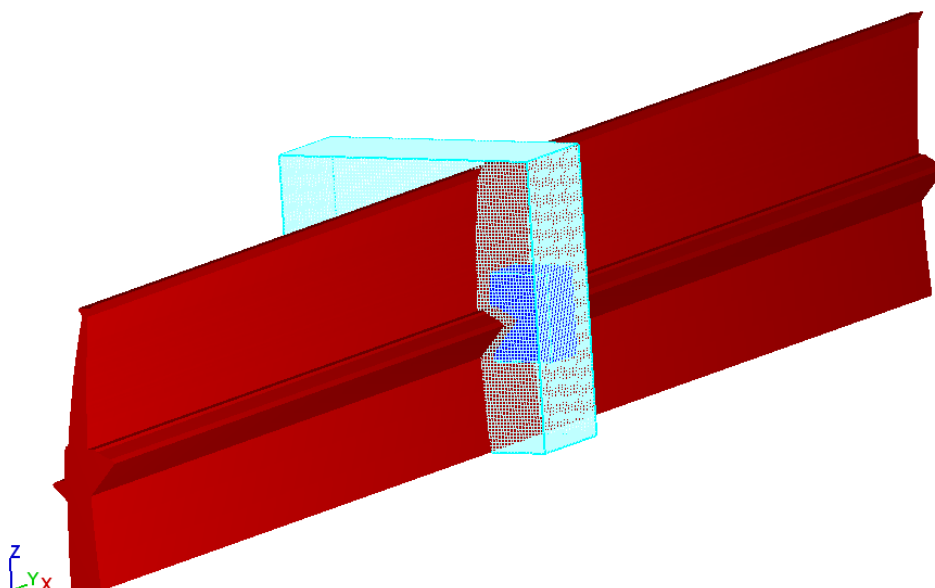
Malha de cálculo

Para demonstrar que os resultados não se alteram com a aplicação do *grid overlay* realizou-se a simulação 09 com as mesmas características que a simulação 08 e aplicou-se o *grid overlay* em $X_{máx}$, comparando-se os resultados de seguida. Dado que a saída do descarregado está localizada, aproximadamente, em $x_{máx} = 42m$, aplicou-se o *grid overlay* para $x_{máx} = 62m$. Assim, a malha de cálculo da simulação 09 é representada na Tabela 11.

Tabela 11 - Malha de cálculo com a aplicação do *grid overlay*

		C. de células	Nº células por eixo	C. da Malha	Nº de células real da malha
		m	-	m	-
Simulação 09	x	2	81	162	610528
	y		31	62	
	z		85	170	
	x	0,75	110	82,5	
	y		41	30,75	
	z		68	51	

A simulação 09 é composta por células com o mesmo comprimento que a simulação 08, no entanto a primeira é composta por 610528 células e simulou durante 18 horas, 52 minutos e 37 segundos. Na Figura 36 está representada a malha de cálculo, definida anteriormente, que foi gerada no programa *FLOW-3D*[®].

**Figura 36 - Grelha da malha de cálculo depois da aplicação do *grid overlay***

De seguida vai-se comparar-se a simulação 08 e a simulação 09 para se perceber a influência da aplicação *grid overlay*.

Apresentação e discussão dos resultados obtidos

A comparação dos resultados foi elaborada para as variáveis pressão e velocidade, tanto na entrada como no interior do descarregador.

Entrada do descarregador:

Para a comparação das duas simulações elaborou-se o gráfico da Figura 37 com os resultados da variável pressão para as simulações 08 e 09 na entrada do descarregador.

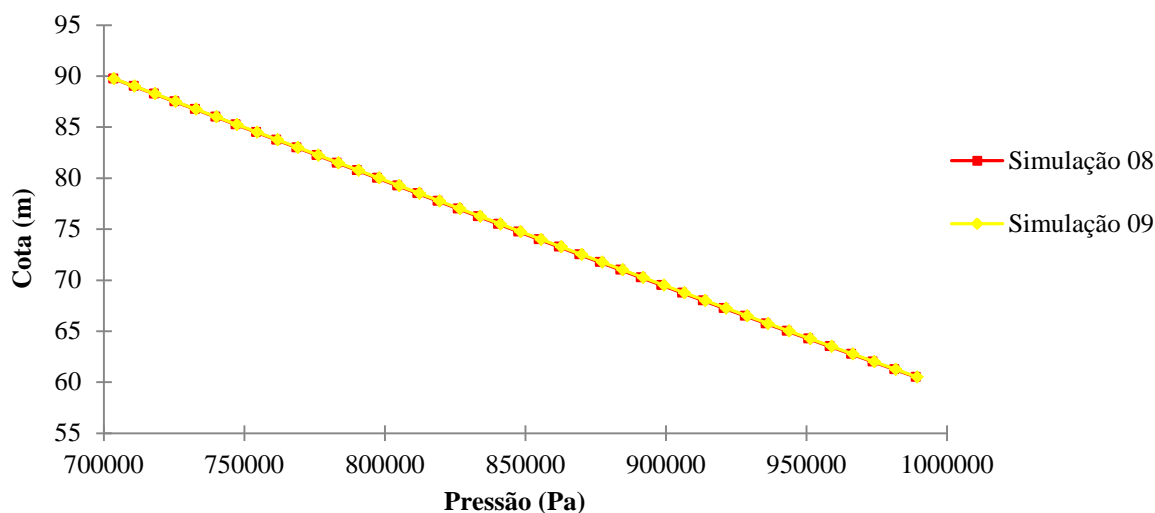


Figura 37 - Resultados do perfil de pressões na secção ii) da entrada do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente à aplicação do *grid overlay*

Os valores das duas simulações coincidem, tal com expectável, no entanto na discussão de resultados vai-se elaborar uma comparação numérica que permitirá tirar melhores conclusões. Na Tabela 12 apresenta-se o cálculo do erro relativo da pressão entre simulações 08 e 09 na entrada do descarregador.

Tabela 12 - Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações 08 e 09 na entrada do descarregador

Cota m	E(Simulação 08 - simulação 09) %
60	-0,05
65	-0,08
70	-0,10
75	-0,09
80	-0,08
85	-0,05
90	-0,03

O erro relativo entre as simulações é praticamente nulo, permitindo concluir que os resultados são muito semelhantes como também se observou no gráfico da Figura 37. Também foi realizado o gráfico da Figura 38 com os resultados da variável velocidade das simulações 08 e 09 na entrada do descarregador.

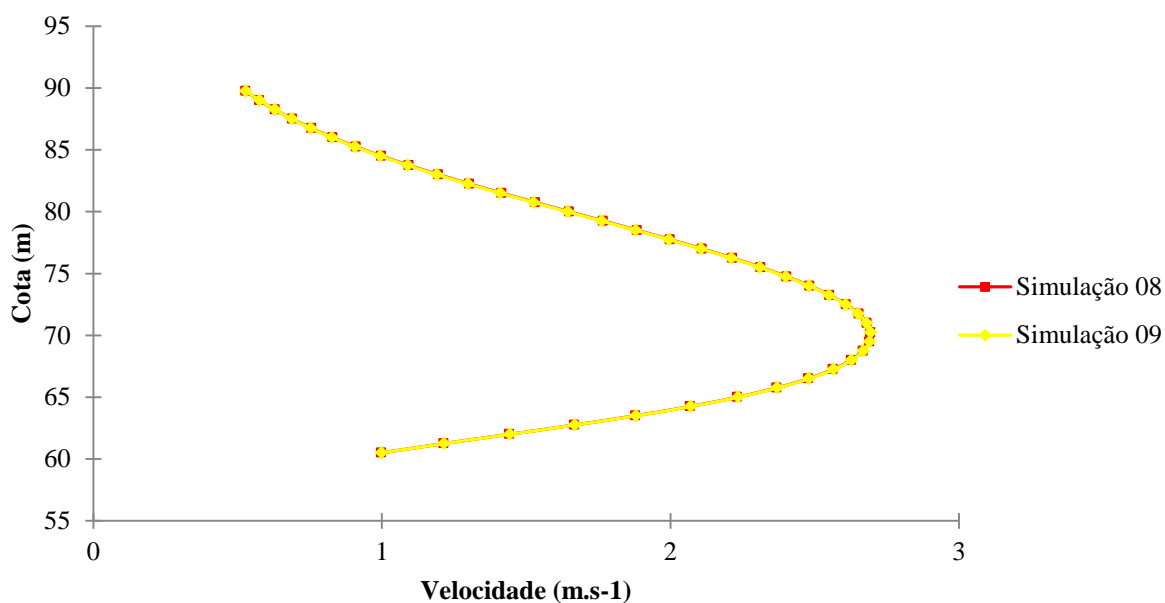


Figura 38 - Resultados do perfil de velocidades na secção ii) da entrada do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente à aplicação do *grid overlay*

Como era esperado, os valores das duas simulações coincidem, no entanto na discussão de resultados vai-se elaborar uma comparação numérica que permitirá tirar melhores conclusões. Na Tabela 13 apresenta-se o cálculo do erro relativo da velocidade entre simulações 08 e 09 na entrada do descarregador.

Tabela 13 - Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 08 e 09 na entrada do descarregador

Cota m	E(Simulação 08 - simulação 09) %
60	-0,05
65	-0,12
70	-0,02
75	0,11
80	0,27
85	0,32
90	-0,16

Também aqui o erro relativo entre as simulações é praticamente nulo, permitindo concluir que os resultados são muito semelhantes como também se observou no gráfico da Figura 38.

Interior do descarregador:

Para a comparação das duas simulações elaborou-se o gráfico da Figura 39 com os resultados da variável pressão das simulações 08 e 09 no interior do descarregador

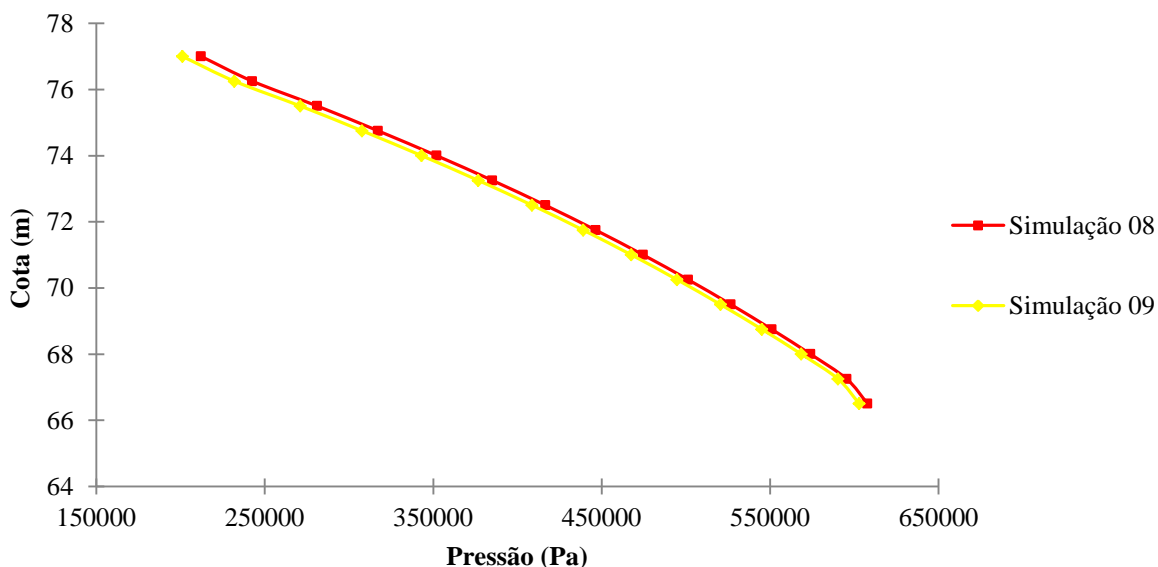


Figura 39 - Resultados do perfil de pressões na secção iii) no interior do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente à aplicação do *grid overlay*

No interior do descarregador existe alguma discrepância dos resultados, no entanto na discussão de resultados vai-se elaborar uma comparação numérica que permitirá tirar melhores conclusões. Na Tabela 14 apresenta-se o cálculo do erro relativo da pressão entre simulações 08 e 09 no interior do descarregador.

Tabela 14 - Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações 08 e 09 no interior do descarregador

Cota m	E(Simulação 08 - simulação 09) %
66,50	0,8
67,25	0,9
68,00	0,9
68,75	1,1
69,50	1,2
70,25	1,3
71,00	1,5
71,75	1,7
72,50	1,9
73,25	2,2
74,00	2,5
74,75	3,0
75,50	3,6
76,25	4,4
77,00	5,2

Numa análise aos resultados do erro relativo obtido entre as simulações, verificando-se um aumento do erro nas cotas a partir dos 74 metros, no entanto, para cotas inferiores o erro é menor, permitindo concluir que os resultados são muito semelhantes como também se observou no gráfico da Figura 39. O gráfico da Figura 40 apresenta os resultados da variável velocidade para as simulações 08 e 09 no interior do descarregador.

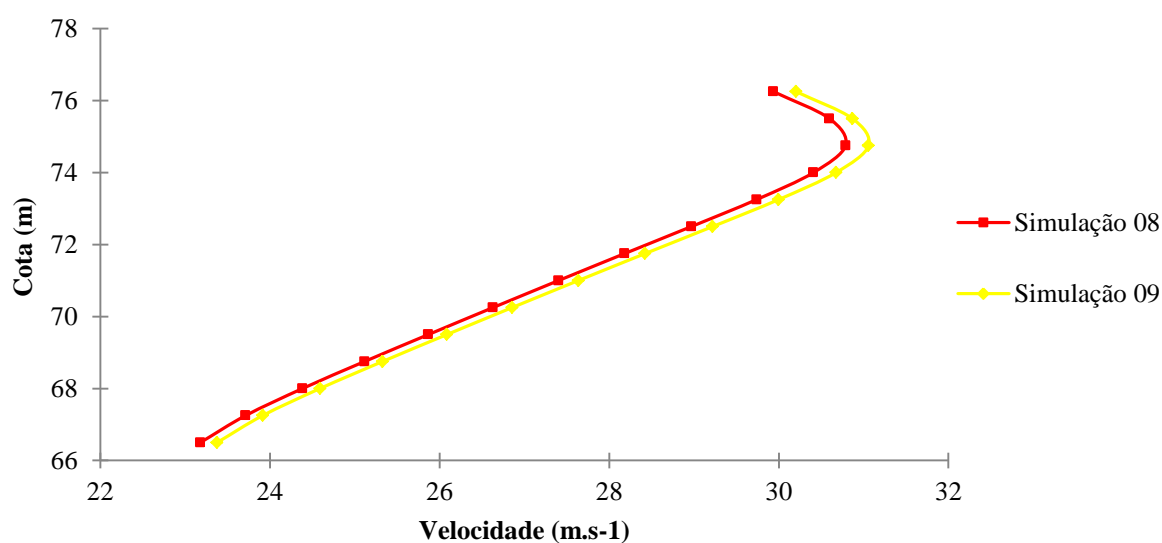


Figura 40 - Resultados do perfil de velocidades na secção iii) no interior do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente à aplicação do *grid overlay*

No interior do descarregador existe alguma discrepância dos resultados, no entanto vai elaborar-se uma comparação numérica que permitirá tirar melhores conclusões. Para esta variável comparou-se os resultados através do cálculo do erro relativo entre as simulações, como nos casos anteriores. Assim, na Tabela 15 apresenta-se o cálculo do erro relativo da velocidade entre simulações 08 e 09 no interior do descarregador.

Tabela 15 - Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 08 e 09 no interior do descarregador

Cota m	E(Simulação 08 - simulação 09) %
66,50	-0,9
67,25	-0,8
68,00	-0,8
68,75	-0,8
69,50	-0,8
70,25	-0,8
71,00	-0,8
71,75	-0,9
72,50	-0,9
73,25	-0,9
74,00	-0,9
74,75	-0,9
75,50	-0,9
76,25	-0,9
77,00	-0,9

Neste caso, também o erro relativo entre as simulações é praticamente nulo, permitindo concluir que os resultados são muito semelhantes como se observou igualmente no gráfico da Figura 40.

Resumindo, os resultados entre as duas simulações apresentam erros relativos muito pequenos, demonstrando que os resultados são muito semelhantes pelo que se conclui que a aplicação do *grid overlay* permite melhorar o refinamento do bloco 2

3.2.5. Caso de estudo – Bloco 1 + bloco 2 + aplicação *grid overlay*

Ao refinar a malha de cálculo do bloco 2 é conseguida aplicando o *grid overlay* em $x_{máx.} = 62m$ para todas as simulações efetuadas. Portanto, as condições de fronteira são as mesmas da simulação 09, apresentada na Figura 35.

Malha de cálculo

Para além da simulação 09, foram realizadas mais três simulações aplicando o *grid overlay*. A malha de cálculo de cada simulação é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Refinamento da malha de cálculo com *grid overlay*

		C. de células	Nº células por eixo	C. da Malha	Nº de células real da malha
		m	-	m	-
Simulação 10	x	2	81	162	918768
	y		31	62	
	z		85	170	
	x	0,6	136	81,6	
	y		51	30,6	
	z		84	50,4	
Simulação 11	x	2	81	162	1186112
	y		31	62	
	z		85	170	
	x	0,55	150	82,5	
	y		55	30,25	
	z		91	50,05	
Simulação 12	x	2	81	162	1349808
	y		31	62	
	z		85	170	
	x	0,5	160	80	
	y		61	30,5	
	z		100	50	

Conseguiu-se refinar a malha de cálculo até à simulação 12 obtendo-se células com 0,5 metros de comprimento. Esta simulação é composta por 1349808 células e o tempo de cálculo computacional foi de 1 dia, 14 horas, 39 minutos e 59 segundos.

Apresentação e discussão dos resultados obtidos

A comparação dos resultados foi elaborada para as variáveis pressão e velocidade, tanto na entrada como no interior do descarregador.

Entrada do descarregador:

Apresenta-se o gráfico na Figura 41 com os resultados obtidos de pressão para as simulações 09 a 12 na entrada do descarregador.

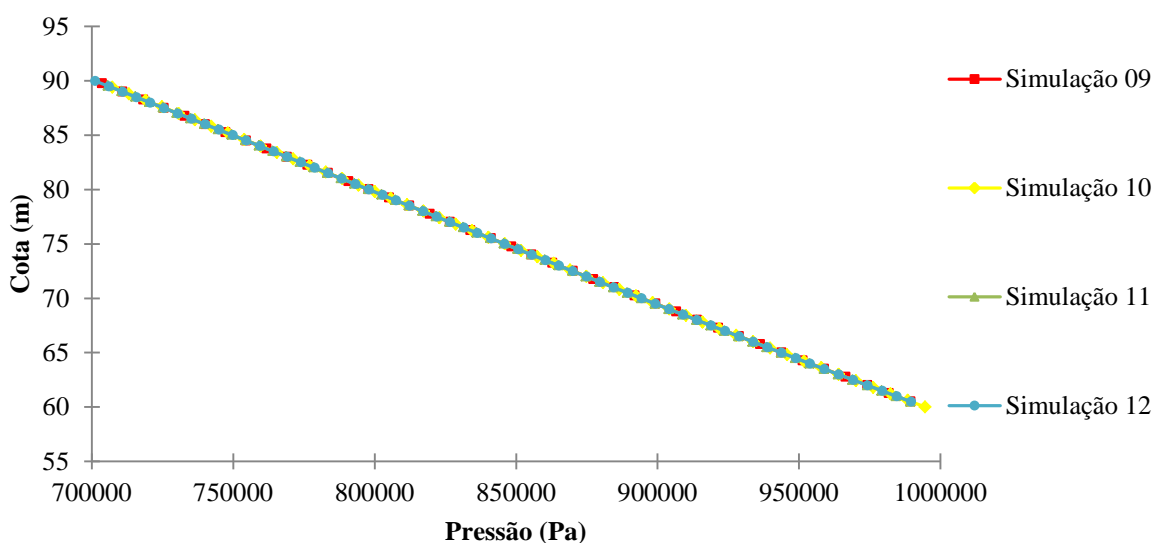


Figura 41 - Resultados do perfil de pressões na secção ii) da entrada do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2 + aplicação do *grid overlay*

Neste gráfico, tal como nos gráficos de pressão anterior, os resultados são semelhantes para as várias simulações, tal como esperado. O valor da pressão para a cota de 90 metros é de, aproximadamente, $7,0 \times 10^5$ Pascals, e para a cota de 60 metros é de $1,0 \times 10^6$ Pascals. É importante referir que estes valores coincidem com os valores do gráfico da Figura 26 e da Figura 31 uma vez que ambos os perfis de estudo são com superfície livre. Na Tabela 17 apresenta-se o cálculo do erro relativo da pressão para as simulações 09 a 12.

Tabela 17 - Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações de 09 a 12 na entrada do descarregador

Cota m	E(Simulação 09 - simulação 10) %	E(Simulação 10 - simulação 12) %	E(Simulação 11 - simulação 12) %
60	0,0	0,0	0,0
65	0,0	0,1	0,0
70	0,0	0,1	0,0
75	0,0	0,1	0,0
80	0,0	0,1	0,0
85	0,0	0,1	0,0
90	0,0	0,0	0,0

Mais uma vez se verifica que os resultados da pressão são muito semelhantes para as várias simulações, ou seja, nada permite concluir para a definição da malha. Apresenta-se de seguida, na Figura 42 o gráfico cos resultados obtidos da velocidade para as simulações 09 a 12 na entrada do descarregador.

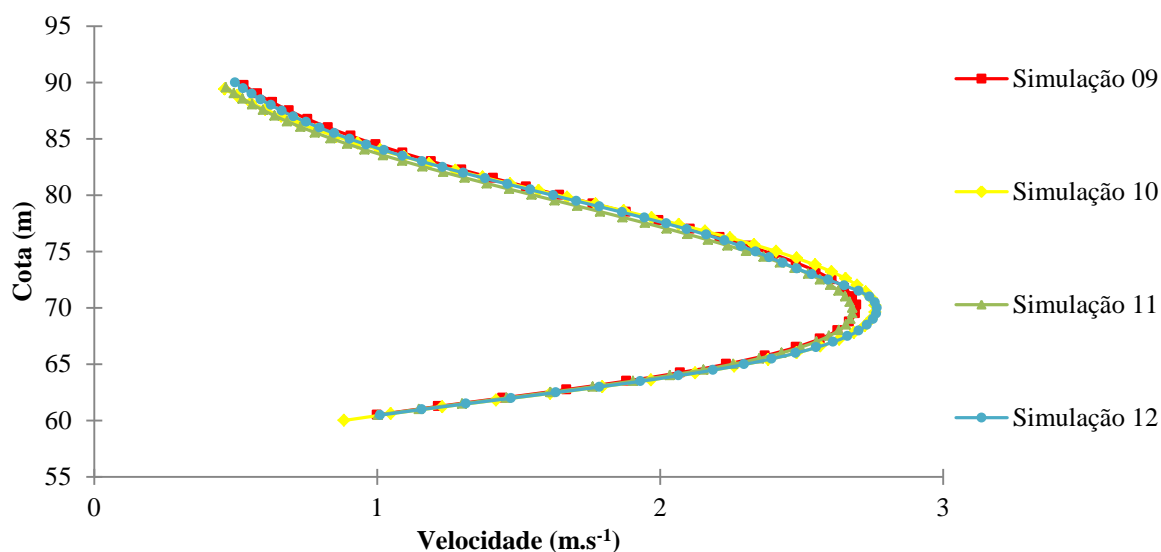


Figura 42 - Resultados do perfil de velocidades na secção ii) da entrada do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2 + aplicação do *grid overlay*

Tal como no gráfico da Figura 32 a velocidade do fluido para a cota de 70 metros, cujo valor da velocidade é de 2,7 metros por segundo. Na Tabela 18 apresenta-se o cálculo do erro relativo da velocidade, cuja finalidade é comparar os resultados obtidos no gráfico da Figura 42.

Tabela 18 - Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 09 a 12 na entrada do descarregador

Cota m	E(Simulação 09 - simulação 10) %	E(Simulação 10 - simulação 12) %	E(Simulação 11 - simulação 12) %
60	-1,1	0,2	-1,2
65	-3,0	0,0	-2,0
70	-2,7	-0,2	-3,2
75	1,5	3,2	-1,2
80	1,6	1,2	-4,1
85	3,9	-2,2	-6,7
90	3,4	-15,4	-10,8

Tal como se pode observar no gráfico da Figura 42, a simulação 09 e a simulação 11 estão muito semelhantes, tal como a simulação 10 e a simulação 12. O mesmo se conclui na Tabela 18 uma vez que o erro relativo da velocidade da comparação entre a simulação 10 e a simulação 12 é inferior à comparação da simulação 09 e 11 com a simulação 12. No entanto, as comparações do erro relativo das três simulações são muito pequenas, pelo que se conclui que a malha convergiu na simulação 12.

Interior do descarregador:

Apresenta-se de seguida, na Figura 43, os resultados obtidos de pressão das simulações 09 a 12 no interior do descarregador.

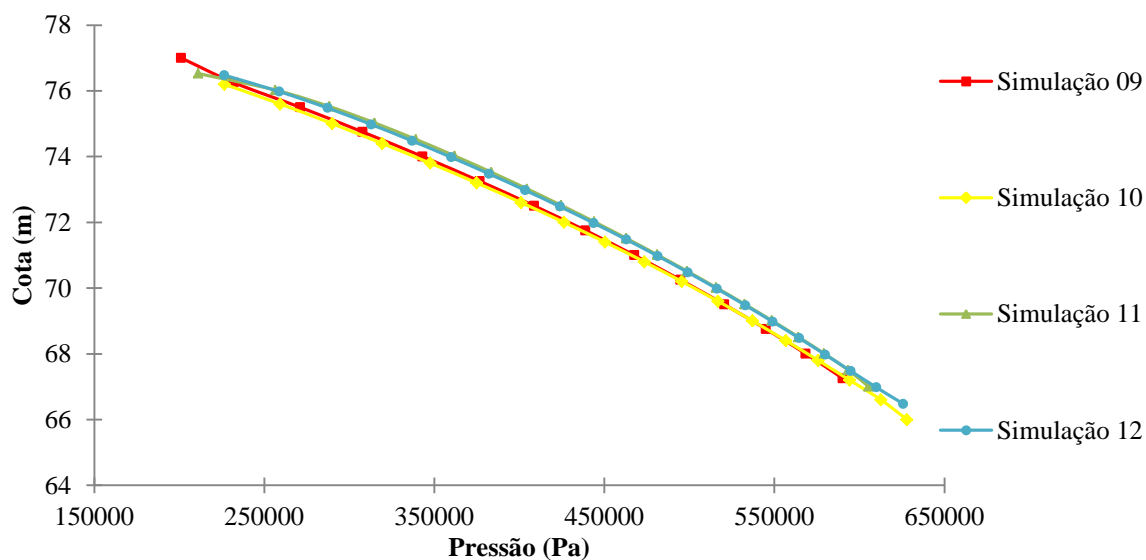


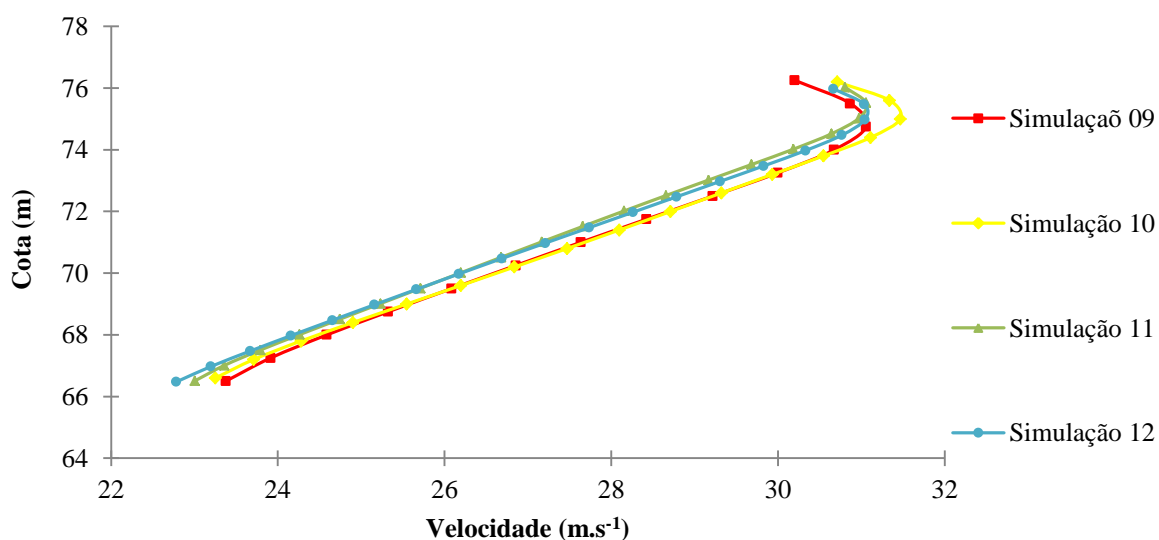
Figura 43 - Resultados do perfil de pressões na secção iii) no interior do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2 + aplicação do *grid overlay*

No interior do descarregador obteve-se resultados muito semelhantes aos do gráfico da Figura 33, em que para cotas de 70 metros obteve-se, aproximadamente, pressões de $2,0 \times 10^5$ Pascais e para cotas de 66 metros obteve-se, aproximadamente, pressões de $6,3 \times 10^4$ Pascais. Na Tabela 19 apresenta-se o erro relativo da pressão das simulações 09 a 12 no interior do descarregador.

Tabela 19 - Erros relativos dos resultados da pressão para as simulações 09 a 12 no interior do descarregador

Cota m	E(Simulação 09 - simulação 10) %	E(Simulação 10 - simulação 12) %	E(Simulação 11 - simulação 12) %
67	-2,4	-1,5	-0,7
68	-1,8	-1,7	0,1
69	-2,1	-2,0	0,1
70	-2,4	-2,5	0,1
71	4,9	-3,1	0,2
72	-3,1	-3,7	0,4
73	-3,7	-4,7	0,7
74	-4,4	-5,8	1,1
75	-5,2	-7,0	1,4
76	-4,8	0,4	0,2

Pela análise da tabela anterior verifica-se uma aproximação das simulações 09, 10, 11 à simulação, salientando que os dois últimos já apresentam resultados semelhantes uma vez que o erro relativo é pequeno. O mesmo se verifica no gráfico da Figura 43, onde se pode observar a proximidade dos resultados da simulação 11 à simulação 12. Na Figura 44 mostra-se os resultados conseguidos da velocidade das simulações 09 a 12 no interior do descarregador.

**Figura 44 - - Resultados do perfil de velocidades na secção iii) no interior do descarregador para as simulações na malha de cálculo correspondente ao bloco 1 + bloco 2 + aplicação do *grid overlay***

Neste gráfico obtiveram-se resultados semelhantes ao gráfico da Figura 34 em que se verifica um aumento da velocidade do fluido, atingindo um máximo de, aproximadamente,

31 metros por segundo. Com o objetivo de comparar os resultados do gráfico da Figura 44, apresenta-se de seguida, na Tabela 20, o erro relativo dos resultados obtidos.

Tabela 20 - Erros relativos dos resultados da velocidade para as simulações 09 a 12 no interior do descarregador

Cota m	Simulação 09 - Simulação 12 %	Simulação 10 – Simulação 12 %	Simulação 11 – Simulação 12 %
67	2,2	1,4	0,6
68	1,7	1,3	0,3
69	1,6	1,4	0,1
70	1,5	1,6	-0,1
71	-2,4	1,6	-0,3
72	1,4	1,5	-0,5
73	1,4	1,4	-0,6
74	1,1	1,3	-0,6
75	-0,2	1,4	-0,3
76	-0,8	6,9	0,5

Também nesta tabela se verifica uma aproximação das simulações 09, 10 e 11 à simulação 12. Esta convergência dos resultados também se verifica no gráfico da Figura 44, em que os gráficos das simulações 11 e 12 coincidem.

Assim, pela análise dos gráficos e do cálculo do erro relativo das variáveis pressão e velocidade conclui-se que o bloco 2 com a aplicação do *grid overlay* converge na simulação 12, significando que o bloco 2 é constituído pela malha de cálculo desta simulação, ou seja, células cúbicas com 0,5 metros de lado.

3.3. Convergência dos resultados no tempo de simulação

Como já foi referido no capítulo 3.2.1, para cada simulação o tempo de cálculo computacional foi estipulado em 30 segundos, dependendo ser inferior ou superior mediante a estabilização dos resultados. Procede-se seguidamente ao esclarecimento desta análise.

Para que se considere que os resultados estejam em regime permanente, analisa-se os gráficos *Mass-averaged mean kinetic energy* e *Mass-averaged turbulente energy* em função do tempo de simulação, que traduzem a variação dos resultados da energia cinética e da energia de turbulência no decorrer do tempo de simulação.

De seguida apresenta-se um exemplo dos gráficos mencionados anteriormente, para uma simulação tipo. A simulação designada foi a 12 por se tratar da simulação cuja malha de cálculo melhor define o modelo em estudo. Apresentam-se na Figura 45 e na Figura 46 os gráficos *Mass-averaged mean kinetic energy* e *Mass-averaged turbulente energy* em função do tempo de simulação, respetivamente.

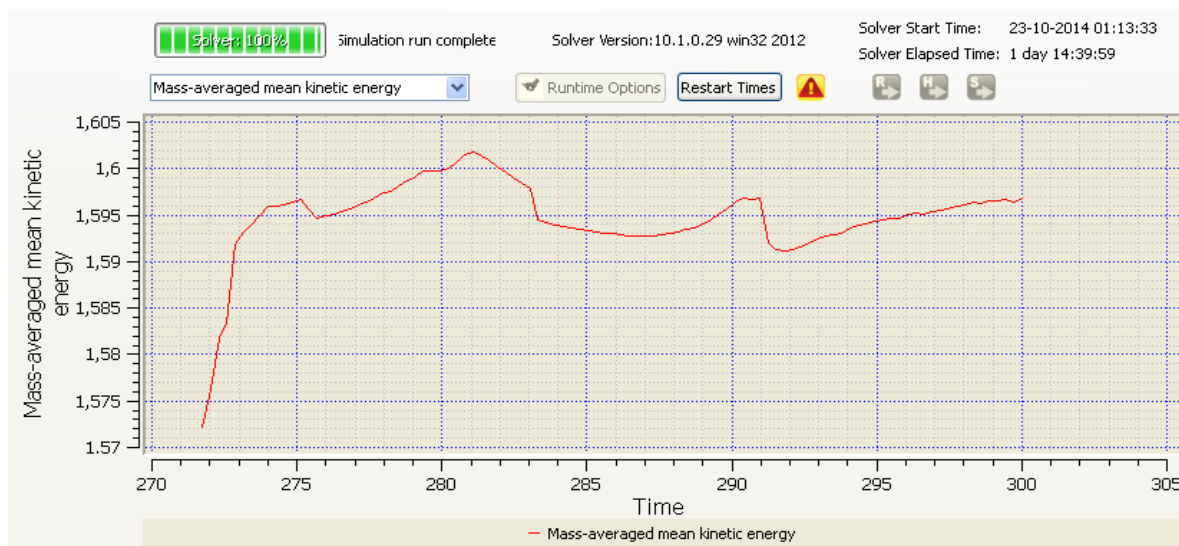


Figura 45 - Gráfico mass-averaged mean kinetic energy da simulação 12

No gráfico apresentado anteriormente, verifica-se que a partir do segundo 275 a energia cinética varia entre 1,59 e 1,60, assim, considera-se que a energia cinética já se encontra em regime permanente.

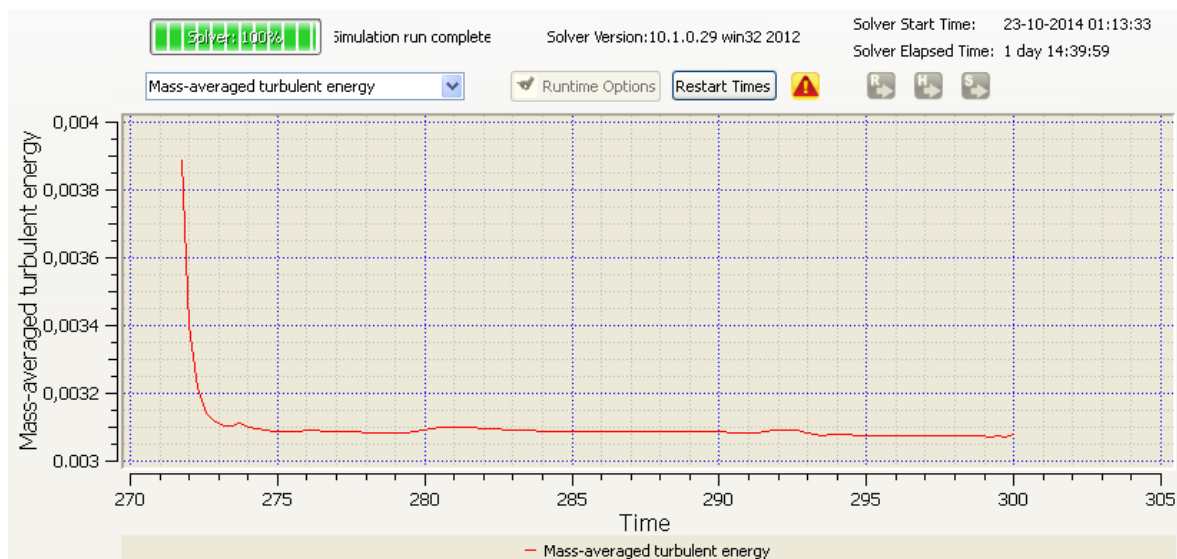


Figura 46 - Gráfico mass-averaged turbulent energy: a) dos 0 aos 30 segundos, b) dos 30 aos 60 segundos, c) dos 60 aos 90 segundos

Neste último gráfico verifica-se que a energia de turbulência já se encontra em regime permanente, uma vez que não existe variação desta a partir do segundo 273, mantendo-se aproximadamente no valor de 0,0031.

Assim, uma vez que ambos os gráficos se encontram em regime permanente, significa que a simulação já se encontra em regime permanente.

De seguida, vai estudar-se a convergência temporal de resultados da simulação 12. Para se estudar a convergência dos resultados desta simulação vão comparar-se os resultados dos últimos instantes da mesma. Sendo que, a simulação 12 teve início ao segundo 270 e findou aos 300, este estudo vai realizar-se nos instantes 290, 295, 299 e 300 segundos para as variáveis pressão e velocidade na entrada e no interior do descarregador.

Entrada do descarregador:

Para o estudo a convergência da simulação 12 na entrada do descarregador elaborou-se o gráfico da Figura 47 que traduz os valores da pressão.

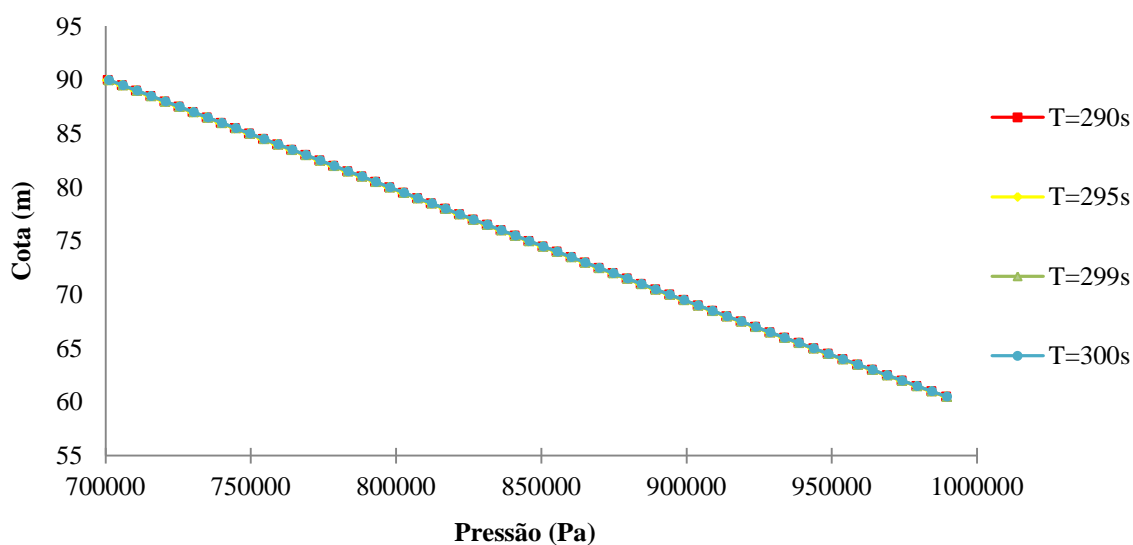


Figura 47 – Resultados do perfil de pressões da convergência dos resultados no tempo da simulação 12 na entrada do descarregador

No gráfico anterior verifica-se que os resultados para os diferentes instantes coincidem. Na Figura 48 está representado o gráfico que traduz os valores da velocidade.

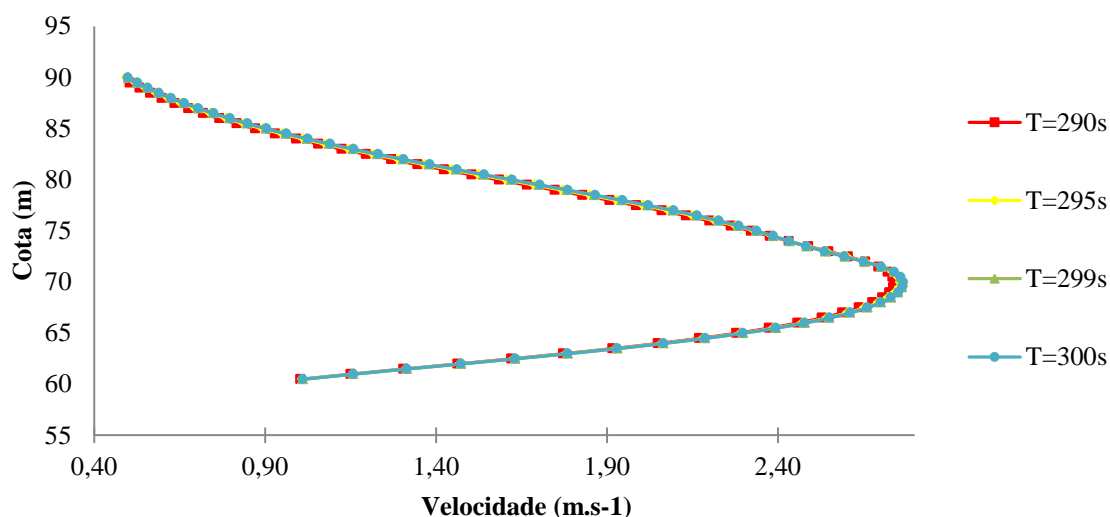


Figura 48 - Resultados do perfil de velocidades da convergência dos resultados no tempo da simulação 12 na entrada do descarregador

Observando os resultados obtidos no gráfico anterior, verifica-se que estes são muito semelhantes para os diferentes instantes.

Interior do descarregador:

Para o estudo a convergência da simulação 08 na entrada do descarregador elaborou-se o gráfico da Figura 49 que traduz os valores da pressão.

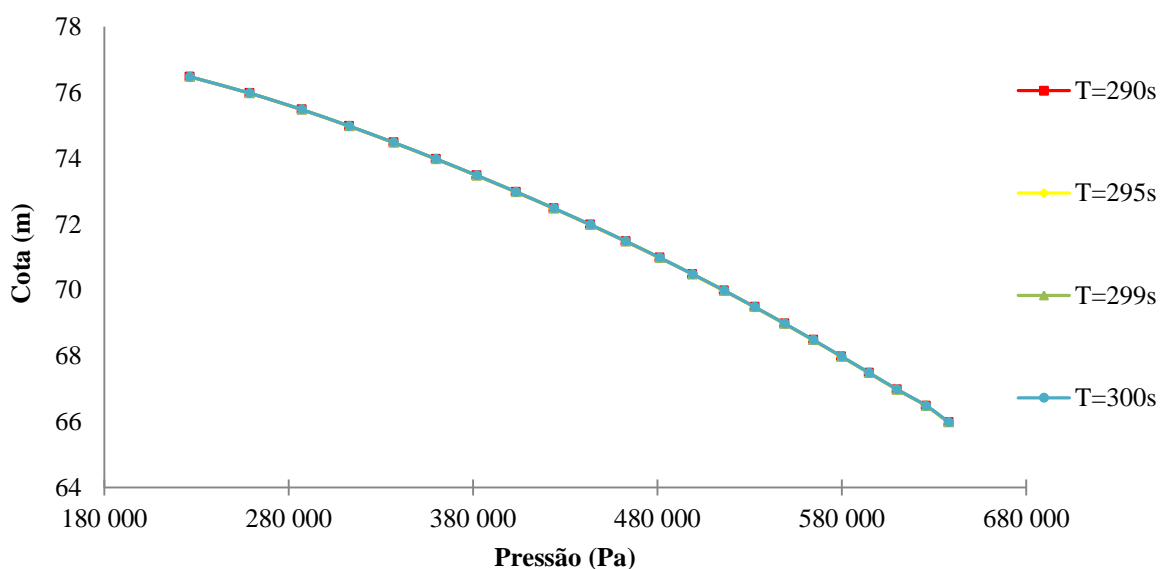


Figura 49 - Resultados do perfil de pressões da convergência dos resultados no tempo da simulação 12 no interior do descarregador

Pela análise do gráfico anterior, verifica-se que os resultados obtidos nos diferentes instantes são equivalentes. Na Figura 50 está representado o gráfico que traduz os valores da velocidade.

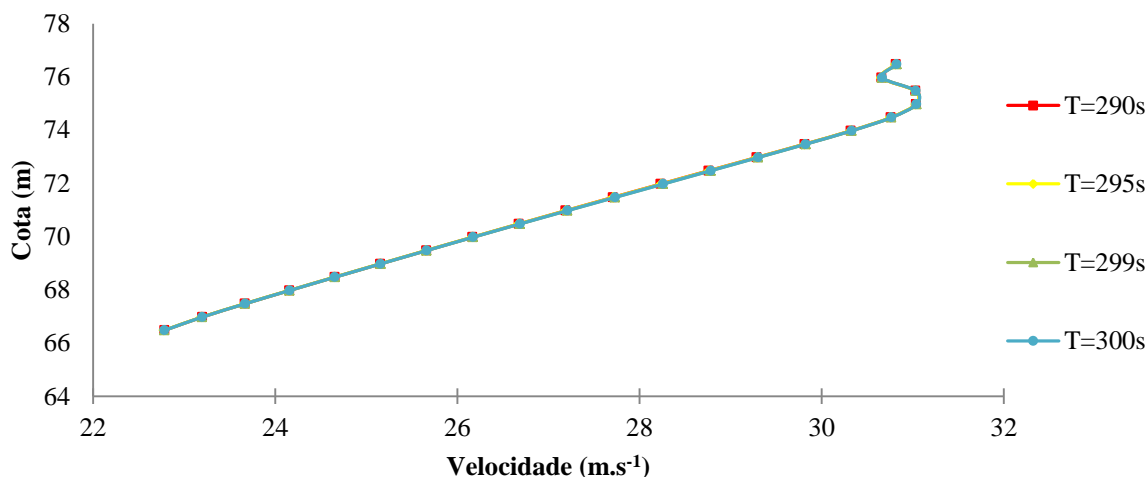


Figura 50 - Resultados do perfil de pressões da convergência dos resultados no tempo da simulação 12 no interior do descarregador

Neste gráfico, mais uma vez, mostra-se que os resultados para os diferentes instantes são muito idênticos.

Resumindo, uma vez que os resultados obtidos para ambas as variáveis na entrada e no interior do descarregador são coincidentes, confirma-se a convergência temporal da simulação 12.

3.4. Análise de sensibilidade das simulações numéricas

Definida a malha de cálculo do modelo em estudo, vai-se efetuar uma análise de sensibilidade das simulações numéricas. As simulações efetuadas anteriormente foram realizadas considerando para modelo de turbulência k-ε RNG, para a superfície livre a opção automática da advecção da superfície livre e primeira ordem para a advecção de quantidade de movimento.

A análise de sensibilidade do presente subcapítulo vai centrar-se:

- No modelo de turbulência:
 - k-ε RNG;
 - k-ε;

- Na advecção da superfície livre:
 - Um fluido, superfície livre;
 - Método Lagrangiano unidimensional (*split*);
 - Método Lagrangiano multidimensional (*unsplit*);
- No termo de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento:
 - Esquema de 2ª ordem com critério de *monotonicity*.

Para estes modelos vai-se comparar o tempo de cálculo computacional despendido e os resultados obtidos.

Malha de cálculo

Como se vai comparar as simulações executadas com a simulação 12, então estas apresentam a mesma malha de cálculo que a simulação 12, já apresentada na Tabela 16.

Nas simulações elaboradas alterou-se relativamente à simulação 12 os seguintes parâmetros, nas respetivas simulações:

- Simulação 13 – Modelo de turbulência: k-ε;
- Simulação 14 – Advecção da superfície livre: Um fluido, superfície livre;
- Simulação 15 - Advecção da superfície livre: Método Lagrangiano unidimensional (*split*);
- Simulação 16 – Advecção da superfície livre: Método Lagrangiano multidimensional (*unsplit*);
- Simulação 17 – No termo de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento: Esquema de 2ª ordem com critério de *monotonicity*.

Apresentação e discussão dos resultados obtidos

Relativamente ao tempo de cálculo computacional despendido por cada simulação, este foi apresentado na Figura 51 e relativamente aos resultados obtidos, vai-se apresentar os resultados para das variáveis pressão e velocidade, para o perfil iii), ou seja, no interior do descarregador, como se pode observar na Figura 21.

Os modelos k-ε caracterizam os fenômenos de turbulência dos escoamentos através de duas propriedades básicas: energia cinética turbulenta e dissipação turbulenta (Silva, 2013). Relativamente aos modelos de turbulência em estudo, o modelo k-ε RNG, que advém do modelo k-ε, apresentando como principal diferença a obtenção das constantes são derivadas explicitamente. Também ostenta uma dissipação da energia turbulenta, reduzindo a viscosidade e melhorando os resultados da velocidade (Sousa, 2012). Assim, segundo o FLOW-3D (2013), o modelo k-ε RNG exige mais esforço computacional.

Primeiramente, compara-se as simulações relativas aos modelos de turbulência, ou seja, as simulações 12 e 13 cujos resultados da variável pressão apresentam-se no gráfico da Figura 51.

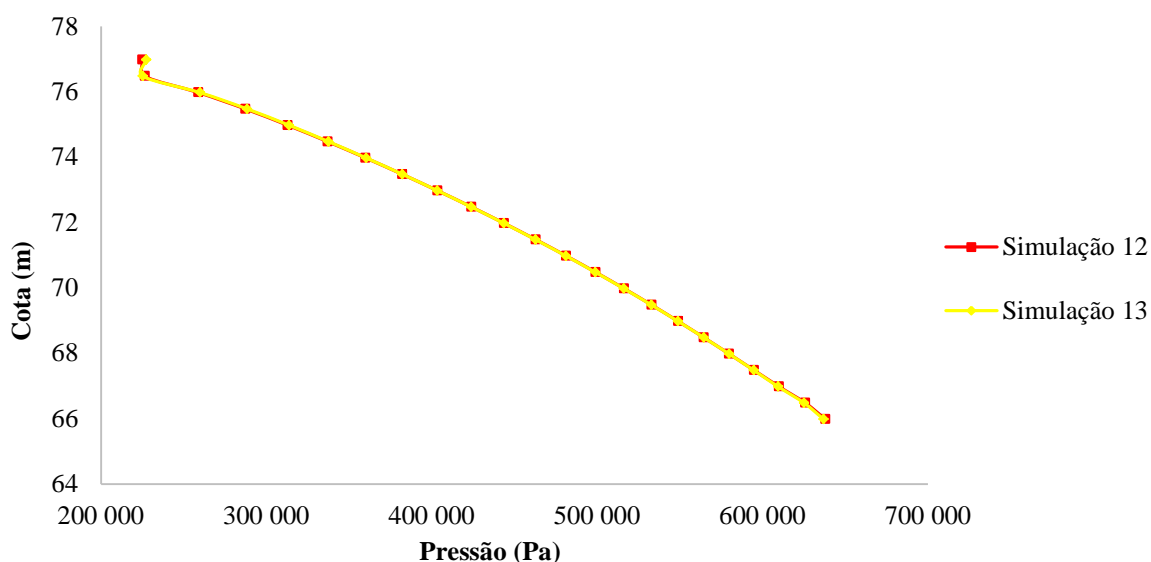


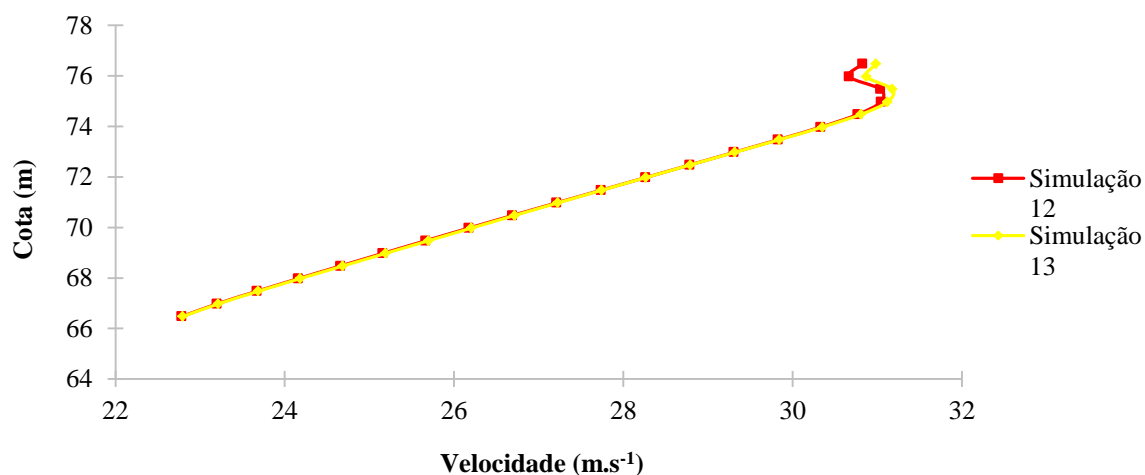
Figura 51 – Resultados do perfil de pressões para as simulações dos modelos de turbulência

Pela análise do último gráfico, verifica-se que os resultados são muito semelhantes para as diversas simulações. No entanto, com a intenção de comparar os resultados obtidos, elaborou-se a Tabela 21 com o cálculo do erro relativo desses resultados.

Tabela 21 - Cálculo do erro relativo da variável pressão dos modelos de turbulência

Cota m	E(Simulação 12 - simulação 13) %
66,5	0,1
67,0	0,1
67,5	0,0
68,0	0,0
68,5	0,0
69,0	0,0
69,5	0,0
70,0	0,0
70,5	0,0
71,0	0,0
71,5	0,0
72,0	0,0
72,5	0,0
73,0	0,0
73,5	0,0
74,0	-0,1
74,5	-0,2
75,0	-0,3
75,5	-0,4
76,0	-0,4
76,5	0,6

O maior erro relativo obtido foi de 0,6% para a cota 76,5 metros, confirmando a semelhança do que se verifica no gráfico da Figura 51. Os resultados relativos à variável velocidade são exibidos no gráfico da Figura 52.

**Figura 52 - Resultados do perfil de velocidades para as simulações dos modelos de turbulência**

Como se pode observar no gráfico anterior, os resultados também são muito parecidos nas duas simulações, verificando-se uma ligeira diferença entre os 74 e 77 metros. Também para esta variável, foi calculado o erro relativo dos resultados que se apresenta na Tabela 22.

Tabela 22 - Cálculo do erro relativo da variável velocidade dos modelos de turbulência

Cota m	E(Simulação 12 - simulação 13) %
66,5	0,0
67,0	-0,1
67,5	-0,1
68,0	-0,1
68,5	-0,1
69,0	-0,1
69,5	-0,1
70,0	-0,1
70,5	-0,1
71,0	-0,1
71,5	0,0
72,0	0,0
72,5	0,0
73,0	0,0
73,5	0,0
74,0	-0,1
74,5	-0,1
75,0	-0,3
75,5	-0,5
76,0	-0,7
76,5	-0,5

Como já verificado, os resultados obtidos são muito semelhantes. Assim, também nesta variável o maior valor do erro relativo é inferior a 1%, sendo de 0,7% para a cota de 76 metros. Tal como esperado, a simulação 13, correspondente ao modelo k-ε, apresenta menor tempo de cálculo computacional que a simulação 12, correspondente ao modelo k-ε RNG, tendo demorado 17 horas, 17 minutos e 9 segundos para realizar 10 segundos de tempo de simulação, enquanto a simulação 12 demorou 1 dia, 14 horas, 39 minutos e 59 segundos para efetuar 30 segundos de simulação. Assim, o modelo de turbulência k-ε é o mais eficiente, uma vez que apresenta resultados semelhantes para um tempo de cálculo computacional menor.

As quatro simulações realizadas para a comparação dos modelos advecção da superfície livre são muito semelhantes entre si, cuja principal finalidade é definir a superfície livre do escoamento. A opção um fluido, superfície livre é usada tipicamente quando existe um fluido, determinando a percentagem desse fluido para cada célula. Os métodos Lagrangiano unidimensionais e multidimensionais são adequados para escoamentos de um ou dois fluidos, apresentando grande precisão para modelos de escoamentos tridimensionais complexos. O método Lagrangiano multidimensional apresenta menor erro de volume acumulado que as outras opções aqui utilizados (Flow-3D, 2013).

Continuamente, apresenta-se os resultados relativos aos modelos advecção da superfície livre. No gráfico da Figura 53 mostra-se os resultados da variável pressão das simulações 12,14,15 e 16.

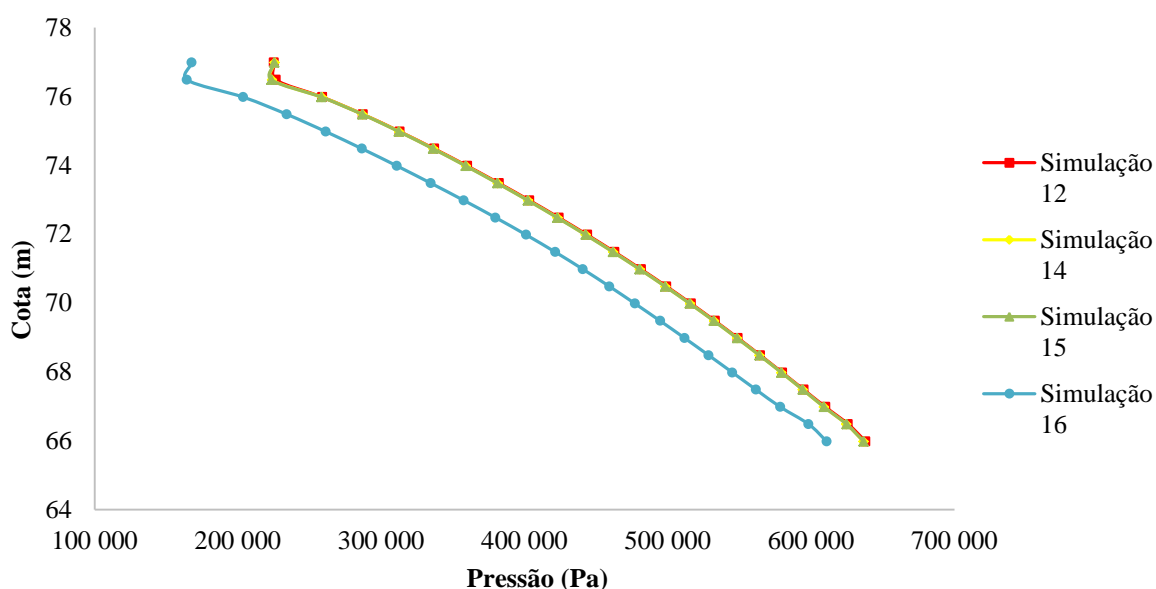


Figura 53 - Resultados do perfil de pressões para as simulações dos modelos de advecção da superfície livre

No gráfico, observando-se os resultados obtidos, averigua-se que as simulações 12, 14 e 15 apresentam resultados equivalentes, ao contrário da simulação 16 que mostra resultados divergentes. Para se perceber melhor a diferença entre as simulações, calculou-se o erro relativo das simulações 14, 15 e 16 relativamente à simulação 12. O resultado do erro relativo é apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Cálculo do erro relativo da variável pressão dos modelos de advecção da superfície livre

Cota m	E(Simulação 12 - simulação 14) %	E(Simulação 12 - simulação 15) %	E(Simulação 12 - simulação 16) %
66,5	0,2	0,2	4,3
67,0	0,2	0,2	5,0
67,5	0,1	0,1	5,4
68,0	0,1	0,1	5,8
68,5	0,1	0,1	6,2
69,0	0,1	0,1	6,6
69,5	0,1	0,1	7,0
70,0	0,1	0,2	7,3
70,5	0,2	0,2	7,7
71,0	0,2	0,2	8,1
71,5	0,2	0,2	8,6
72,0	0,2	0,3	9,2
72,5	0,2	0,3	9,9
73,0	0,2	0,3	10,8
73,5	0,2	0,3	11,8
74,0	0,2	0,3	12,8
74,5	0,2	0,3	14,0
75,0	0,1	0,2	15,3
75,5	0,1	0,2	17,0
76,0	0,1	0,3	19,2
76,5	1,2	1,4	24,0

Como ficou demonstrado no gráfico da Figura 53, o erro relativo entre as simulações 12 e 16 é maior que as restantes simulações, verificando-se uma maior percentagem de erro a partir dos 73 metros. Nesta tabela também se verifica a proximidade dos resultados entre a simulação 12 e a 14 e 15, sendo que só a cota de 76,5 metros apresenta percentagem maior que 1%. Apresenta-se, de seguida, na Figura 54, os gráficos das simulações 12, 14, 15 e 16 que correspondentes aos modelos advecção da superfície livre para a variável velocidade.

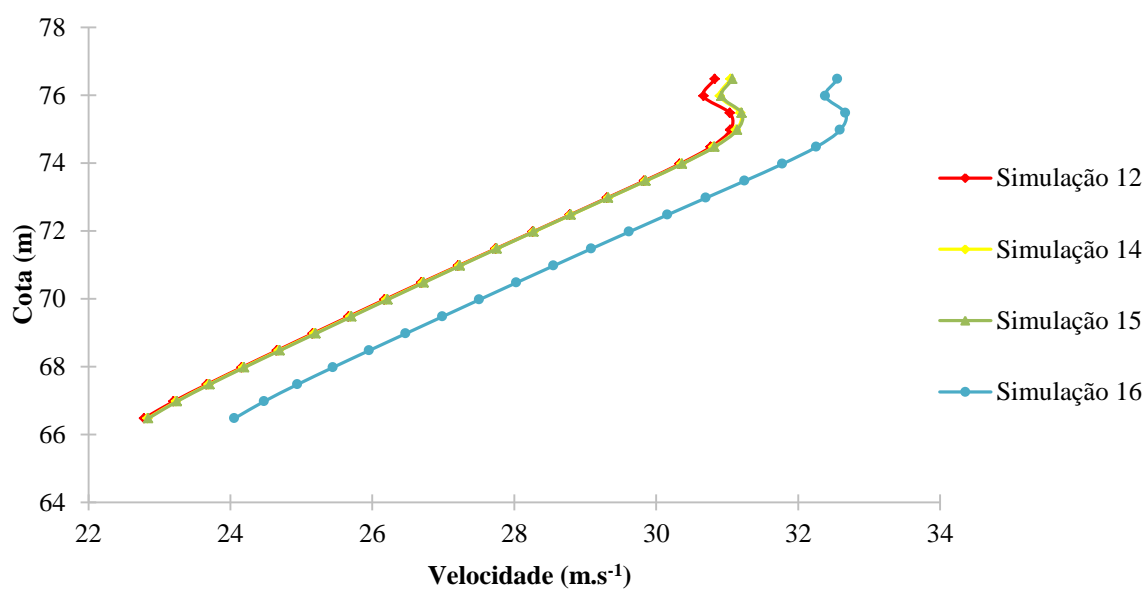


Figura 54 - Resultados do perfil de velocidades para as simulações dos modelos de advecção da superfície livre

Os resultados obtidos para esta variável são semelhantes aos resultados obtidos para a variável pressão, em que os resultados das simulações 12, 14 e 15 são muito parecidos e os resultados da simulação 16 também difere das restantes. Neste caso também se calculou o erro relativo entre a simulação 12 e as simulações 14, 15 e 16. O erro relativo é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Cálculo do erro relativo da variável velocidade dos modelos de advecção da superfície livre

Cota m	E(Simulação 12 - simulação 14) %	E(Simulação 12 - simulação 15) %	E(Simulação 12 - simulação 16) %
66,5	-0,2	-0,3	-11,3
67,0	-0,2	-0,2	-5,6
67,5	-0,1	-0,2	-5,5
68,0	-0,1	-0,2	-5,4
68,5	-0,1	-0,2	-5,4
69,0	-0,1	-0,2	-5,3
69,5	-0,1	-0,2	-5,3
70,0	-0,1	-0,2	-5,2
70,5	-0,1	-0,1	-5,1
71,0	-0,1	-0,1	-5,0
71,5	0,0	-0,1	-5,0
72,0	0,0	0,0	-4,9
72,5	0,0	0,0	-4,9
73,0	-0,1	-0,1	-4,8
73,5	-0,1	-0,1	-4,8
74,0	-0,1	-0,1	-4,8
74,5	-0,1	-0,2	-4,9
75,0	-0,3	-0,3	-5,0
75,5	-0,5	-0,5	-5,2
76,0	-0,8	-0,8	-5,5
76,5	-0,7	-0,8	-5,6

Confirmando os resultados do gráfico da Figura 54, o erro relativo entre a simulação 12 e 16 é superior relativamente ao erro relativo entre a simulação 12 e as simulações 14 e 15. Assim, demonstra-se que as simulações 14 e 15 apresentam resultados idênticos à simulação 12, ao contrário da simulação 16. Para este modelo, também a simulação 12 foi a que apresentou menor tempo de cálculo computacional despendido. Por outro lado a simulação 16 foi a que ostentou maior tempo de cálculo computacional, tendo demorado 20 horas, 42 minutos e 33 segundos para simular 10 segundos. No entanto, segundo o *FLOW-3D* (2013) a simulação 16 é a que apresenta maior precisão nos resultados, sendo a simulação mais adequada dos modelos de advecção da superfície livre.

No programa *FLOW-3D*[®], os modelos de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento do tipo primeira ordem podem ser utilizados na maioria dos casos de estudo embora apresentem uma difusão numérica de alguns parâmetros, neste caso, a viscosidade artificial. Na opção de 2ª ordem com critério de *monotonicity* é usada

para estudos em que seja necessário dedicar uma maior atenção às velocidades do escoamento (Flow-3D, 2013).

Finalmente, apresenta-se o último modelo de comparação no gráfico da Figura 55, a opção 2ª ordem com critério de *monotonicity*, com as simulações 12, 17.

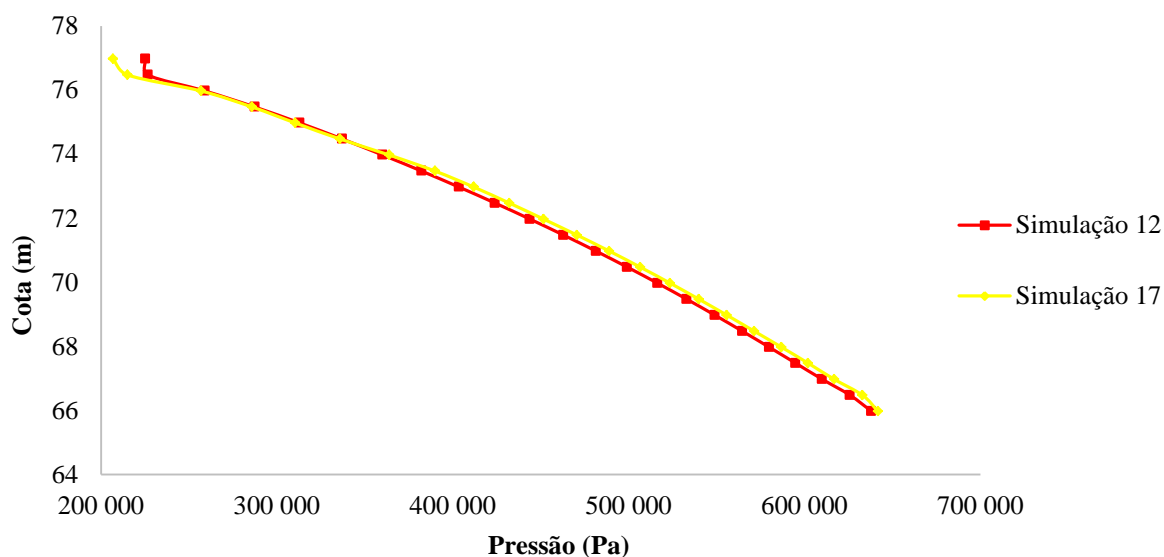


Figura 55 - Resultados do perfil de pressões para as simulações dos modelos de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento

Realizando-se uma análise ao gráfico, verifica-se uma ligeira diferença nos resultados entre as duas simulações. Foi calculado o erro relativo, para se comprovar os resultados obtidos, que é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Cálculo do erro relativo da variável pressão dos modelos de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento

Cota m	E(Simulação 12 - simulação 17) %
66,5	-1,1
67,0	-1,1
67,5	-1,2
68,0	-1,2
68,5	-1,2
69,0	-1,2
69,5	-1,3
70,0	-1,4
70,5	-1,5
71,0	-1,6
71,5	-1,7
72,0	-1,7
72,5	-1,9
73,0	-2,1
73,5	-2,0
74,0	-1,0
74,5	0,4
75,0	0,8
75,5	0,5
76,0	0,9
76,5	5,1

Os valores do erro relativo entre as simulações 12 e 17 estão entre 0,4 e os 2%, com a exceção das cotas 73 e 76,5 metros, em que são obtidos erros de 2,1 e de 5,1%, respectivamente, sendo que, o valor de 5,1% é o maior valor do erro relativo para todas as cotas. No gráfico da Figura 56 estão indicados os resultados obtidos da variável velocidade.

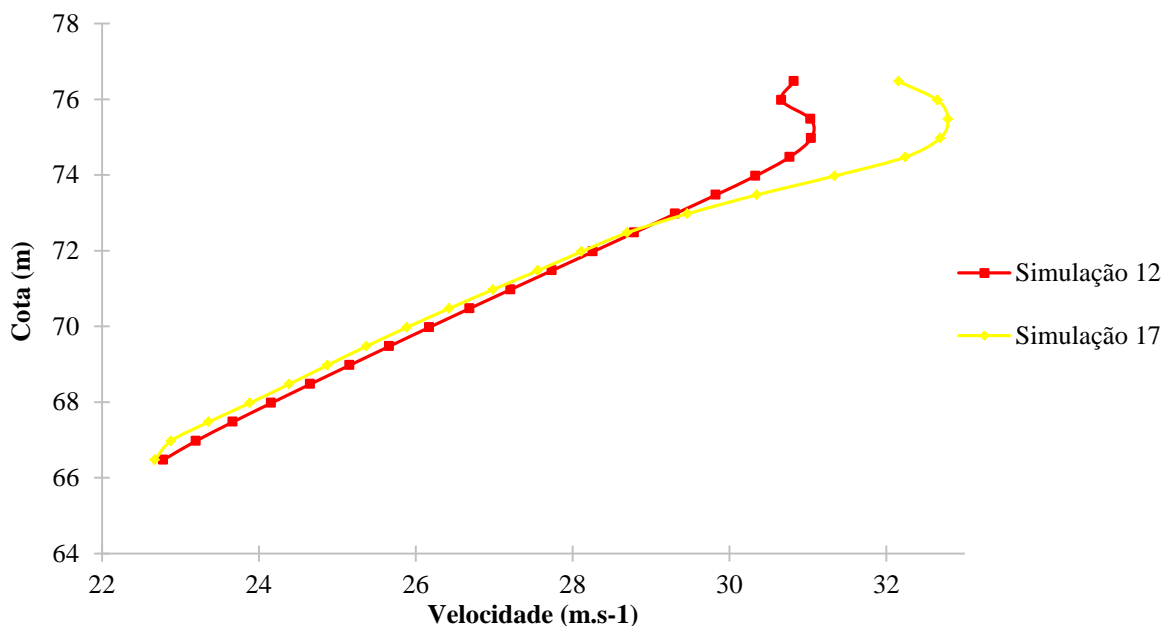


Figura 56 - Resultados do perfil de velocidades para as simulações dos modelos de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento

Também nos resultados desta variável se verifica uma ligeira diferença dos resultados obtidos, sendo que essa diferença é mais acentuada a partir da cota correspondente aos 74 metros. De seguida, apresenta-se a Tabela 26 com o cálculo do erro relativo que traduz os resultados obtidos no gráfico da Figura 56.

Tabela 26 - Cálculo do erro relativo da variável velocidade dos modelos de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento

Cota m	E(Simulação 12 - simulação 17) %
66,5	0,5
67,0	1,4
67,5	1,3
68,0	1,1
68,5	1,1
69,0	1,1
69,5	1,1
70,0	1,1
70,5	1,0
71,0	0,8
71,5	0,6
72,0	0,5
72,5	0,3
73,0	-0,5
73,5	-1,7
74,0	-3,3
74,5	-4,8
75,0	-5,3
75,5	-5,6
76,0	-6,5
76,5	-4,3

Tal como esperado, a partir da cota de 74 metros o valor do erro relativo aumenta relativamente às cotas inferiores, atingindo um valor máximo de 6,5%. A simulação 17 também apresenta um tempo de cálculo computacional superior à simulação 12, tendo simulado 10 segundos durante 18 horas, 8 minutos e 6 segundos. Conclui-se que a simulação 17 apresenta maior precisão de resultados, representando a opção mais correta para os modelos advecção da equação de conservação da quantidade de movimento

Resumindo, embora o tempo de cálculo computacional seja superior, os resultados mais precisos acontecem para as seguintes opções: modelos de turbulência - k-ε, modelos de advecção da superfície livre- Método Lagrangiano multidimensional (*unsplit*) e modelos de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento - 2ª ordem com critério de *monotonicity*.

3.5. Análise de sensibilidade de dimensões do domínio computacional

Definida a malha de cálculo do modelo, vai-se estudar os limites do domínio utilizados e a influência destes nos resultados obtidos. O objetivo pretendido é reduzir a malha de cálculo do bloco na zona de albufeira nas direções x e y sem que os resultados mostrem de alterações significativas e desta forma reduzir o domínio do modelo e os tempos da duração das simulações. Para o estudo do volume, as condições de fronteira mantêm-se do domínio precedente que já foram mencionadas em capítulos anteriores.

Os valores reduzidos foram obtidos mediante a alteração dos resultados da variável velocidade e os comprimentos dos eixos x e y . Segundo a direção x reduziu-se, em x_{\min} , três quartos da distância entre os limites do bloco 1 e o bloco 2, sendo que esta distância é de aproximadamente 80 metros, ou seja, reduziu-se 60 metros. Na direção y reduziu-se, em ambos os lados, y_{\min} e y_{\max} , um terço da distância entre o bloco 1 e o bloco 2, dado que esta distância corresponde a aproximadamente 15 metros, ou seja, reduziu-se em 5 metros em cada lado. Assim sendo, na Figura 57 ilustra-se os limites reduzidos, em que os novos limites estão contornados a vermelho.

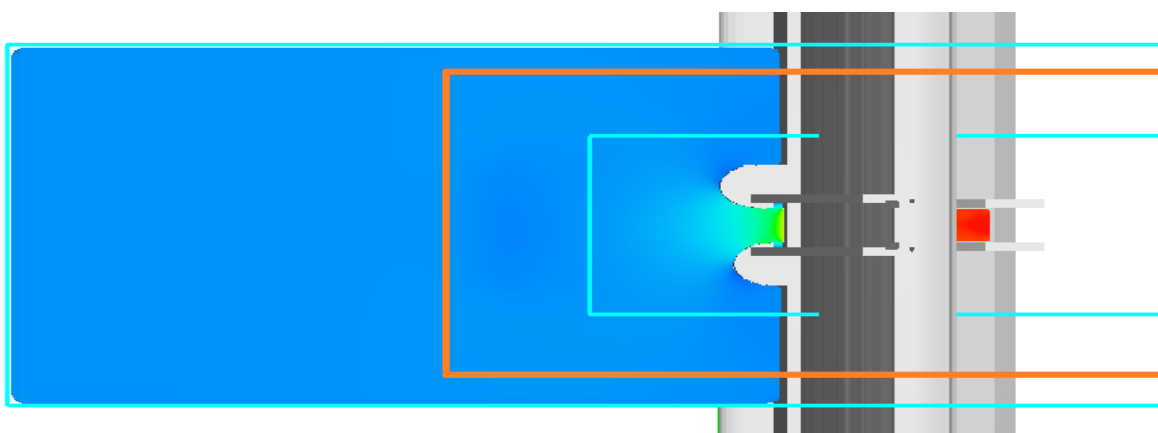


Figura 57 - Limites de redução em x e y

Malha de cálculo

Mediante estas reduções, foi elaborada uma simulação correspondente cuja malha de cálculo é apresentada seguidamente. A simulação 18, representada na Tabela 27, traduz a redução da malha mencionada anteriormente.

Tabela 27 - Malha de cálculo para a redução de volume do domínio

		C. de células	Nº células por eixo	C. da Malha	Nº de células real da malha
		m	-	m	-
Simulação 18	x	2	50	100	1233143
	y		25	50	
	z		85	170	
	x	0,5	160	80	
	y		61	30,5	
	z		100	50	

Esta simulação é composta por 1233143 células e o tempo de cálculo computacional foi de 22 horas, 43 minutos e 49 segundos. Através do comando *restart*, teve início na simulação 12, pelo que a dimensão das células para ambos os blocos mantém-se, alterando-se somente os limites da malha de cálculo. Assim, da simulação 12 para a simulação 18 houve uma redução de 116665 células e uma diminuição em 15 horas, 56 minutos e 10 segundos. Na Figura 58 representa-se a malha de cálculo, que corresponde à simulação 13, gerada no programa *FLOW-3D*[®]

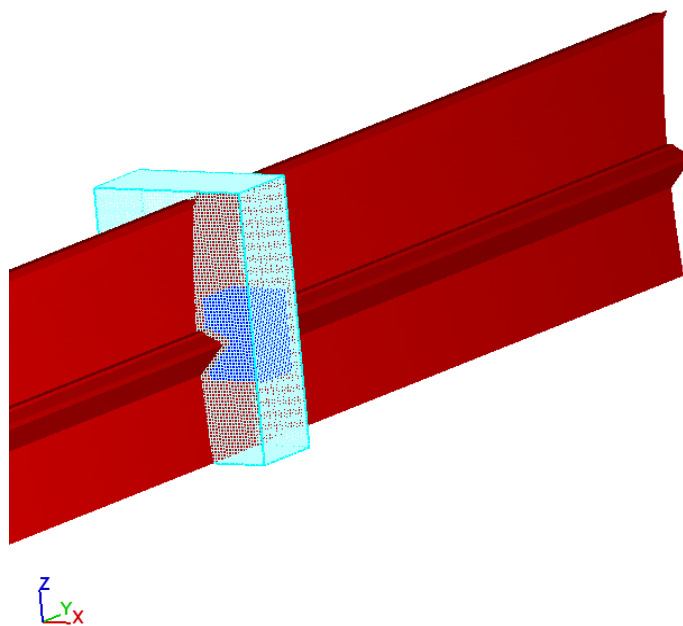


Figura 58 - Malha de cálculo correspondente à simulação 13

De seguida, apresentam-se os resultados obtidos na simulação em que também se comparam com os resultados da simulação 12 para que, através destes, se perceba a influência da redução da malha de cálculo.

Apresentação e discussão dos resultados obtidos

A comparação dos resultados foi elaborada para as variáveis pressão e velocidade, no entanto, diferente dos casos de estudos anteriores, para o estudo do volume do modelo serão estudados os resultados no interior do descarregador, em três perfis indicados seguidamente:

- a) Para $x = 9,75m$;
- b) Para $x = 19,75m$;
- c) Para $x = 20,75m$.

Os três perfis são também indicados na Figura 59.

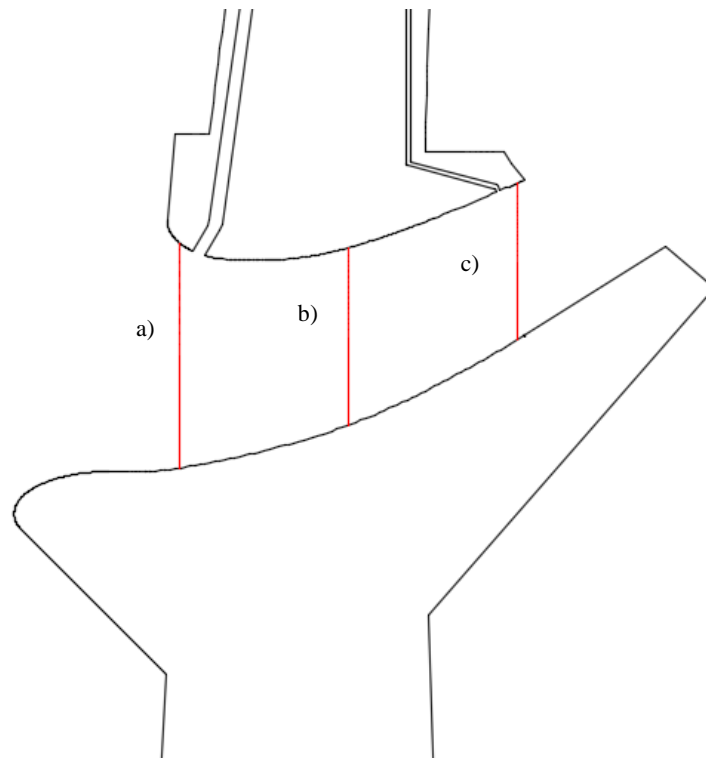


Figura 59 - Perfis de estudo no interior do descarregador

Apresenta-se o gráfico, na Figura 60, com os resultados obtidos de pressão das simulações 12 e 18 para o perfil a).

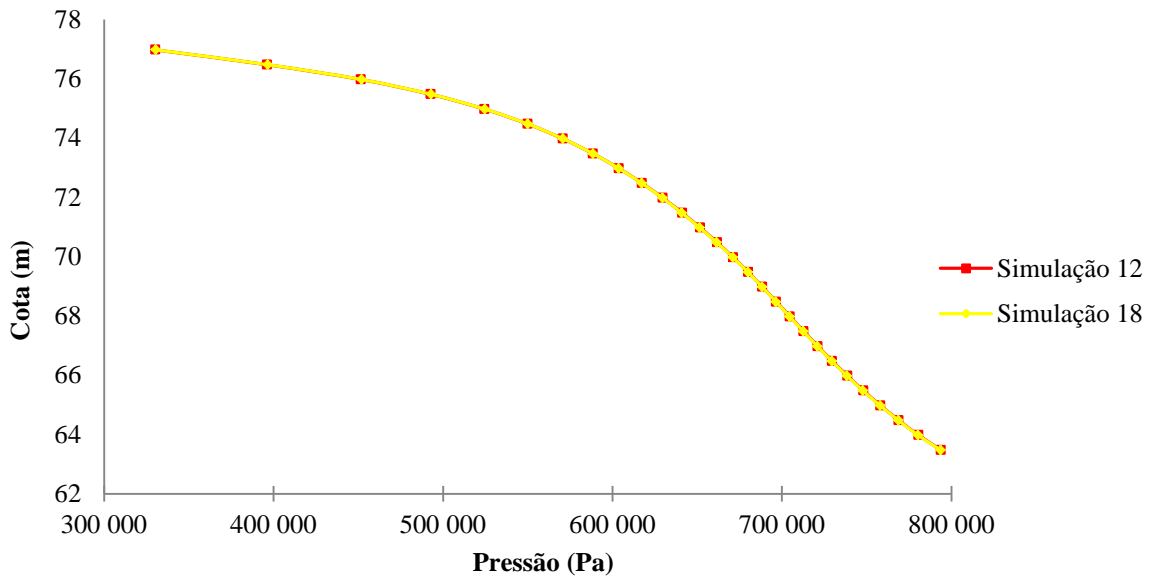


Figura 60 – Resultados do perfil de pressões das simulações 12 e 18 para o perfil a)

Na Figura 61, exibe-se o gráfico com os resultados obtidos da velocidade das simulações 12 e 13 para o perfil a).

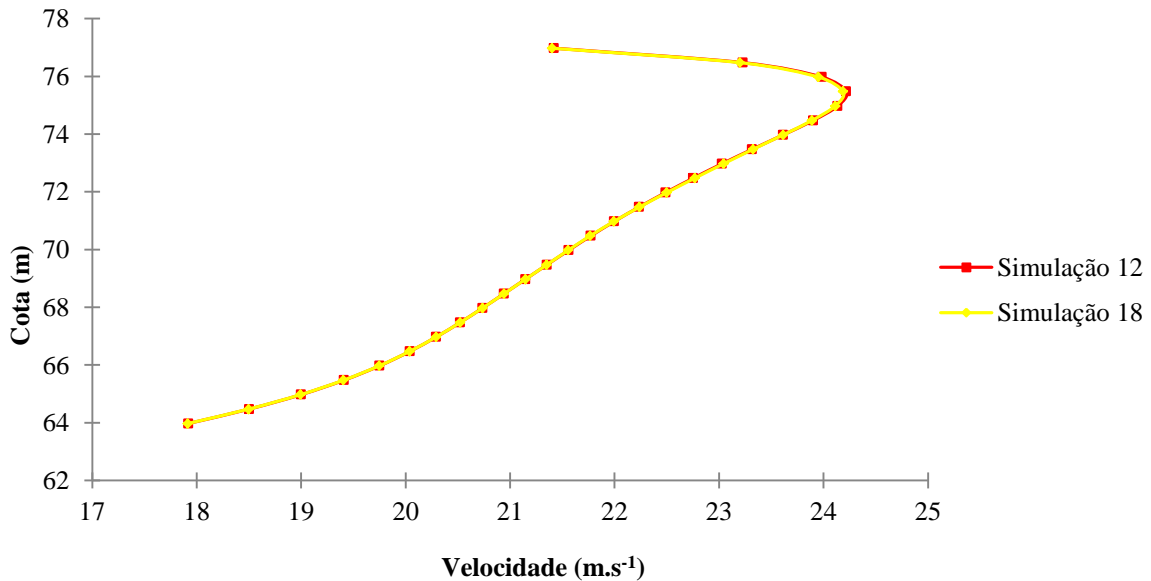


Figura 61 - Resultados do perfil de velocidades das simulações 12 e 18 para o perfil a)

Como forma de comparar os resultados obtidos nas simulações 12 e 18, elaborou-se uma tabela com os valores das variáveis pressão e velocidade para as mesmas cotas. Assim, calculou-se o erro relativo com o objetivo de se poder comparar as simulações do perfil a) que se apresenta na Tabela 28.

Tabela 28 - Erro relativo das simulações 12 e 18 para o perfil a)

Cota m	Pressão %	Velocidade %
63,475	0,03	0,02
63,975	0,03	0,03
64,475	0,03	0,03
64,975	0,03	0,03
65,475	0,04	0,02
65,975	0,04	0,02
66,475	0,04	0,01
66,975	0,04	0,00
67,475	0,03	0,00
67,975	0,03	0,00
68,475	0,03	0,00
68,975	0,02	0,00
69,475	0,02	0,01
69,975	0,03	0,02
70,475	0,04	0,03
70,975	0,04	0,01
71,475	0,04	-0,01
71,975	0,03	-0,05
72,475	0,03	-0,06
72,975	0,02	-0,06
73,475	0,00	-0,04
73,975	-0,01	0,00
74,475	-0,02	0,05
74,975	-0,03	0,09
75,475	-0,05	0,13
75,975	-0,07	0,14
76,475	-0,11	0,12
76,975	-0,07	0,09

Na Tabela 28 obteve-se resultados próximos de zero, assegurando a conformidade dos resultados entre as simulações, também observados nos gráficos da Figura 60, para a pressão e da Figura 61, para a velocidade. Na Figura 62, expõe-se o gráfico com os resultados obtidos de pressão das simulações 12 e 18 para o perfil b).

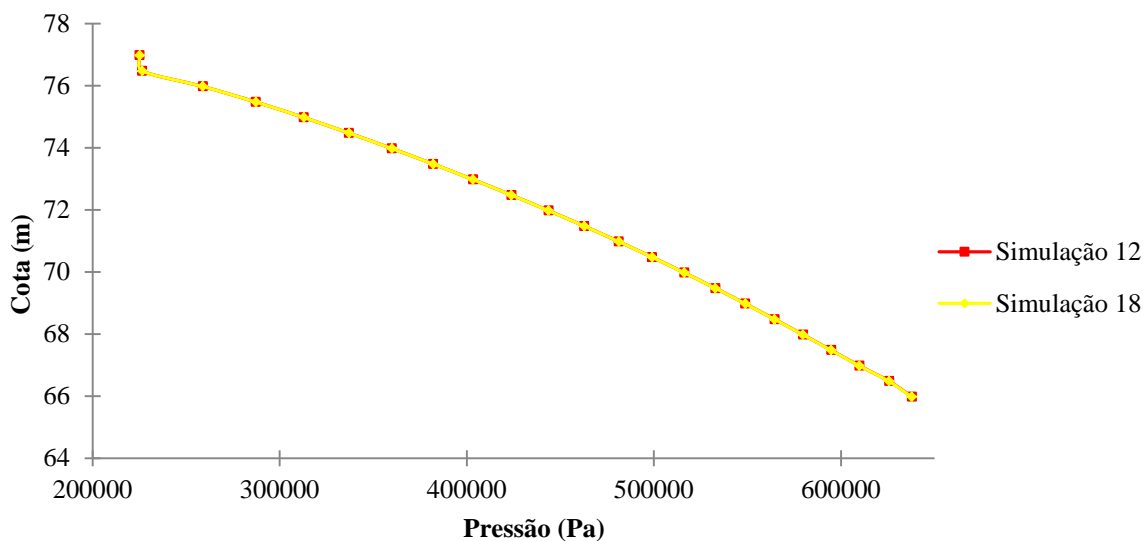


Figura 62 - Resultados do perfil de pressões das simulações 12 e 18 para o perfil b)

Indica-se na Figura 63, o gráfico com os resultados obtidos da velocidade das simulações 12 e 18 para o perfil b).

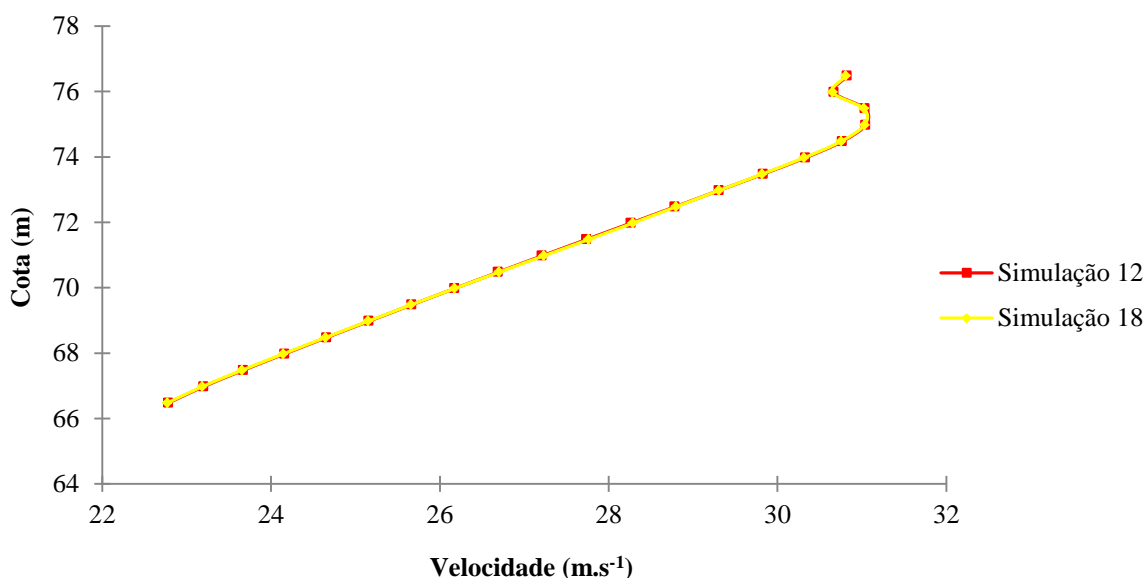


Figura 63 - Resultados do perfil de velocidades das simulações 12 e 18 para o perfil a)

Como forma de comparar os resultados obtidos nas simulações 12 e 18, elaborou-se uma tabela com os valores das variáveis pressão e velocidade para as mesmas cotas. Assim, calculou-se o erro relativo, apresentado na Tabela 29, com o objetivo de se poder comparar as simulações do perfil b).

Tabela 29 - Erro relativo das simulações 12 e 13 para o perfil b)

Cota m	Pressão %	Velocidade %
65,975	0,04	0,05
66,475	0,03	0,06
66,975	0,02	0,07
67,475	0,02	0,07
67,975	0,02	0,06
68,475	0,02	0,05
68,975	0,02	0,04
69,475	0,02	0,02
69,975	0,01	0,00
70,475	0,01	-0,04
70,975	0,01	-0,07
71,475	0,02	-0,09
71,975	0,02	-0,08
72,475	0,02	-0,05
72,975	0,02	0,00
73,475	0,02	0,04
73,975	0,02	0,05
74,475	0,02	0,05
74,975	0,02	0,04
75,475	0,02	0,04
75,975	0,01	0,05
76,475	0,01	0,05
76,975	0,02	0,05

A Tabela 29 indica que os resultados são próximos de zero, confirmando a conformidade dos resultados entre as simulações, também observados nos gráficos da Figura 62, para a pressão e da Figura 63, para a velocidade. Na Figura 64, mostra-se o gráfico que traduz os resultados obtidos de pressão das simulações 12 e 18 para o perfil c).

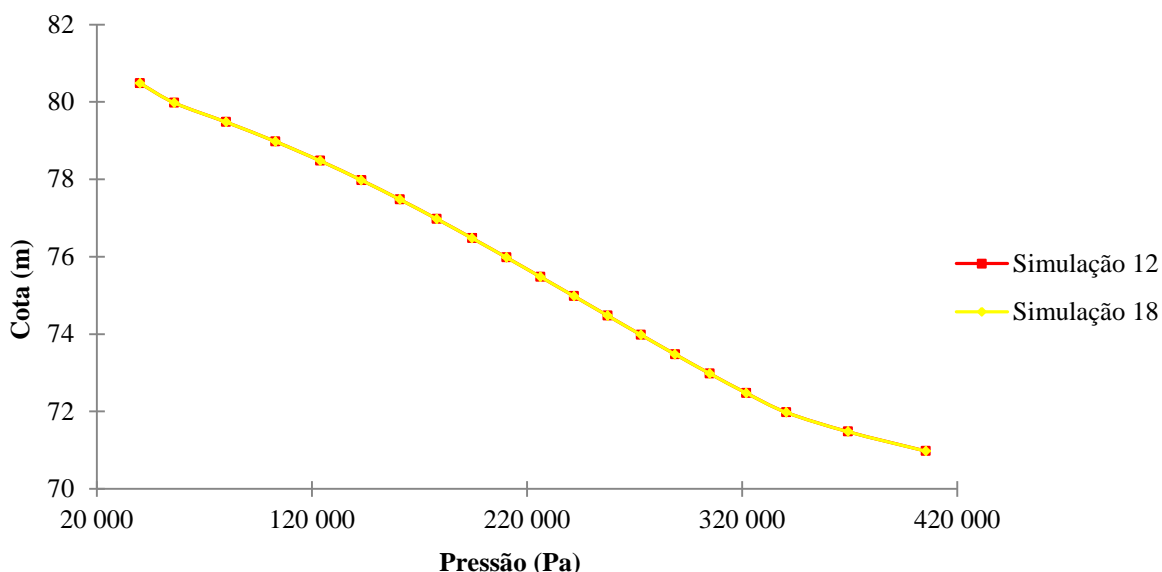


Figura 64 - Resultados do perfil de pressões das simulações 12 e 18 para o perfil c)

Os resultados obtidos da velocidade das simulações 12 e 18 para o perfil c) são representados na Figura 65.

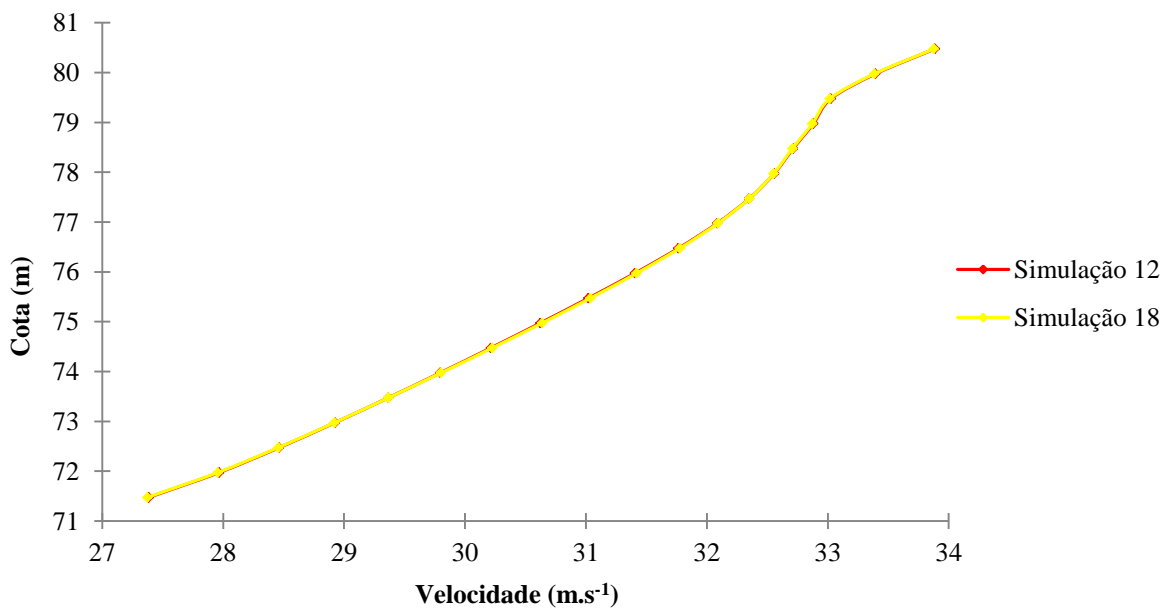


Figura 65 - Resultados do perfil de velocidades das simulações 12 e 18 para o perfil a)

Como forma de comparar os resultados obtidos nas simulações 12 e 18, elaborou-se uma tabela com os valores das variáveis pressão e velocidade para as mesmas cotas. Assim, na Tabela 30, apresenta-se o erro relativo com o objetivo de se poder comparar as simulações do perfil c).

Tabela 30 - Erro relativo das simulações 12 e 18 para o perfil c)

Cota m	Pressão %	Velocidade %
70,975	0,02	0,04
71,475	0,02	0,04
71,975	0,01	0,03
72,475	0,01	0,03
72,975	0,01	0,01
73,475	0,01	0,00
73,975	0,01	-0,02
74,475	0,01	-0,04
74,975	0,01	-0,05
75,475	0,01	-0,05
75,975	0,02	-0,04
76,475	0,02	-0,03
76,975	0,02	-0,02
77,475	0,02	0,00
77,975	0,02	0,01
78,475	0,02	0,02
78,975	0,02	0,02
79,475	0,02	0,02
79,975	0,03	0,02
80,475	-0,01	0,02

Assim, na Tabela 30 obteve-se resultados próximos de zero, confirmando a conformidade dos resultados entre as simulações, também observados nos gráficos da Figura 64 para a pressão e da Figura 65 para a velocidade.

Pelo cálculo do erro relativo obtido entre as simulações 12 e 18, conclui-se que reduzindo o volume da malha de cálculo, os resultados não sofrem alterações significativas. No entanto, a simulação 18 antecipou-se 15 horas, 56 minutos e 10 segundos comparativamente à simulação 12. Por este motivo, o estudo seguinte será realizado através da malha de cálculo da simulação 18. Os gráficos da pressão representados são consistentes na medida em que a pressão diminui com a altura da água, verificando-se também que os valores desta vão diminuindo à medida que nos aproximamos da saída do descarregador. Esta diminuição da pressão traduz-se no aumento da velocidade verificado nos gráficos desta variável. Nestes últimos, também se pode observar que o valor da velocidade é superior nas partículas próximas da abóbada do descarregador.

CAPÍTULO 4

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

4. COMPARAÇÃO DO RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

4.1. Malha de cálculo

4.2. Apresentação e discussão dos resultados obtidos

4.2.1. Pressões

4.2.2. Caudais

4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

Atualmente, têm existido grandes avanços no desenvolvimento de modelos computacionais na dinâmica de fluidos no estudo de descarregadores e outras estruturas hidráulicas. Contudo, segundo Dargahi (2010), para que os resultados sejam fiáveis para serem utilizados em projeto, devem ser cuidadosamente validados por resultados experimentais. Assim, neste capítulo vai proceder-se à comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais

Definido o domínio do modelo, vai-se proceder ao estudo de caudais e pressões no descarregador, variando-se o nível da altura de água na albufeira. Inicialmente considerou-se a altura 161,5m fazendo-se variar os níveis de água para as cotas, em metros: 158,5; 152,5; 147,5; 142,5; 137,5; 132,5; 127,5. Seguidamente, na Figura 66, apresenta-se o modelo com a respetiva variação do nível de água.

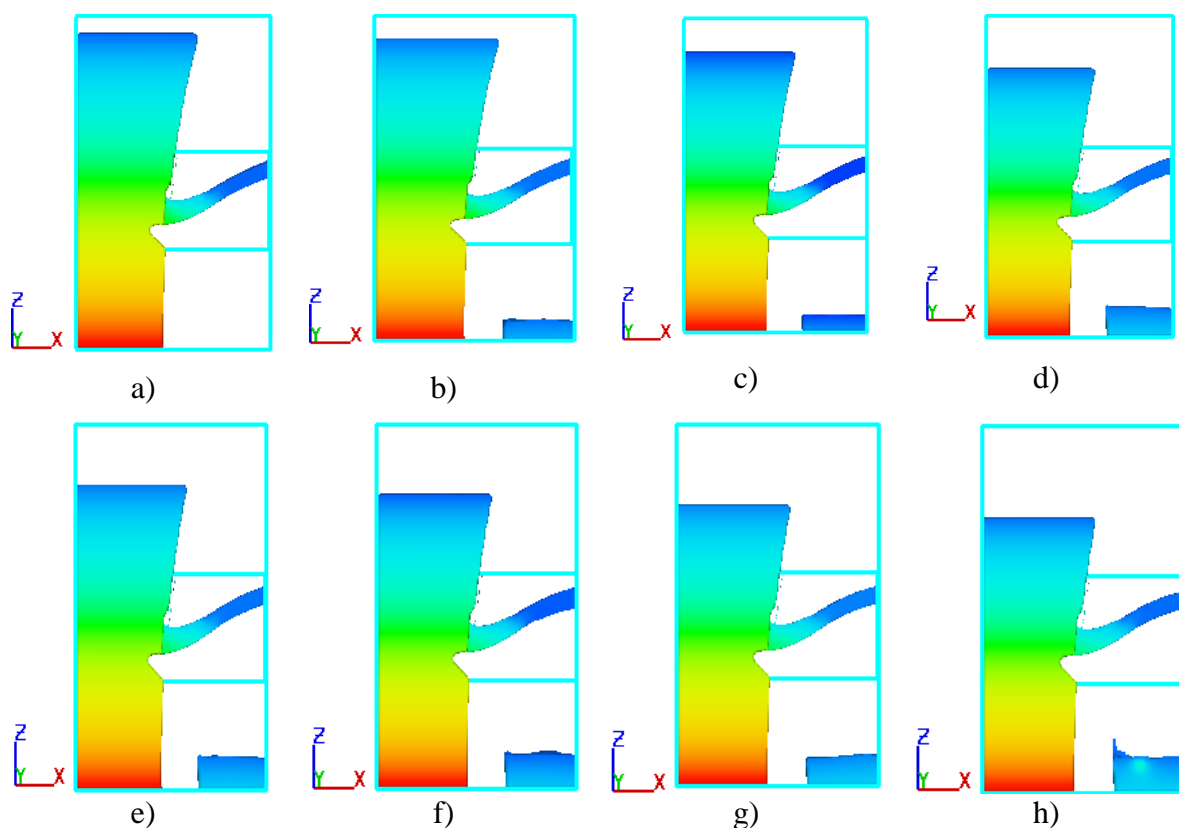


Figura 66 - Modelo correspondente para cada nível da altura de água: a) H=161,5m; b) H=158,5m; c) H=152,5m; d) H=147,5m; e) H=142,5m; f) H=137,5m; g) H=132,5m; h) H=127,5m

Para cada variação do nível de água ir-se-á estudar o valor do caudal e de pressões no descarregador. O caudal vai ser determinado para a secção b mencionada anteriormente. Posteriormente elaborou-se a curva de vazão do descarregador para a variação do nível da água. Estes resultados serão comparados com os valores obtidos em ensaios em modelo físico no LNEC, pelo que, os valores calculados da pressão serão obtidos para pontos específicos onde foram realizados esses ensaios.

4.1. Malha de cálculo

Com o objetivo de obter os resultados para cada altura do nível da água foram realizadas duas simulações. A simulação 14 teve início com a malha de cálculo da simulação 08, tendo-se reduzido o domínio da malha (tal como se executou na simulação 13) e alterando-se o nível da água para 158,5 metros. Seguidamente, elaborou-se a simulação 15 com *restart* na simulação 14, tendo-se refinado a malha de cálculo, cujas dimensões das células são iguais às da simulação 12, ou seja, o bloco 1 com células de 2 metros e o bloco e o bloco 2 com células de 0,5 metros. Assim, obtêm-se os resultados para a altura de água de 158,5 metros.

A malha de cálculo das simulações 19 e 20 são apresentadas na Tabela 31.

Tabela 31 - Representação da malha de cálculo das simulações 19 e 20

		C. das células	Nº de células por eixo	C. da Malha	Nº de células real da malha
		m	-	m	-
Simulação 19	x	2	169	338	937741
	y		25	50	
	z		85	170	
	x	0,75	160	120	
	y		41	30,75	
	z		68	51	
Simulação 20	x	2	50	100	1233141
	y		25	50	
	z		85	170	
	x	0,5	160	80	
	y		61	30,5	
	z		100	50	

A simulação 19 ostenta 937741 células durando 1 dia, 4 horas, 54 minutos e 3 segundos a correr, já a simulação 20 é composta por 1233141 células demorando 1 dia, 4 horas, 55 minutos e 08 segundos.

Este processo repete-se para os restantes níveis de água na albufeira. Desta forma, foram realizadas mais 12 simulações em que as malhas de cálculo se repetem nas simulações apresentadas anteriormente, diferenciando somente a duração de cada simulação. As durações das restantes simulações já foram apresentadas na Tabela 1.

4.2. Apresentação e discussão dos resultados obtidos

4.2.1. Pressões

Como já foi referido o valor da pressão vai ser obtido em pontos específicos, que estão representados na Figura 67, coincide com a localização das tomadas de pressão instaladas no modelo físico. As tomadas de pressão foram montadas na abóbada (da tomada de pressão nº 1 à nº 14) e na parede lateral do orifício (tomada de pressão nº 28 à nº 35).

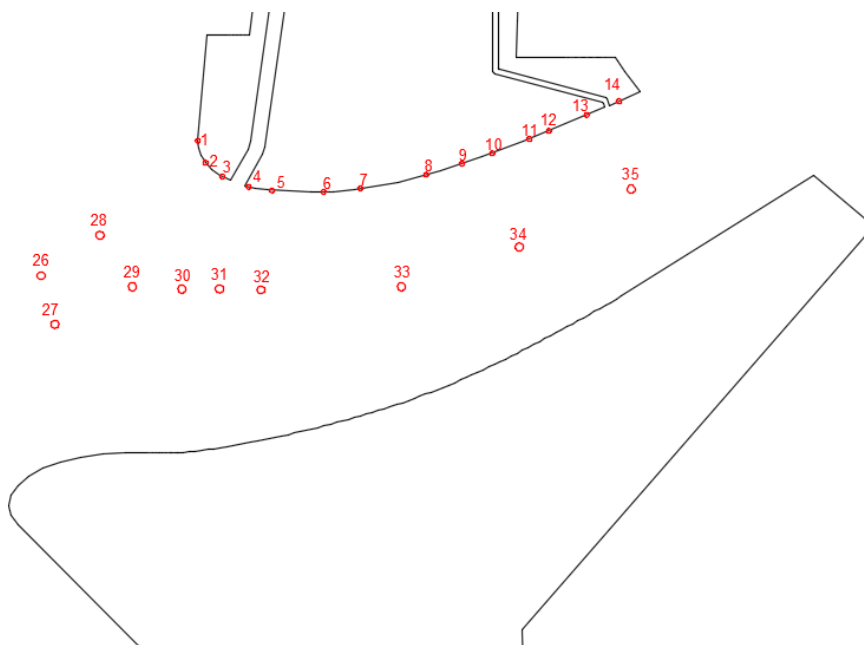


Figura 67 - Tomadas de pressão instaladas na parede lateral e na abóbada do descarregador

Para as tomadas de pressão supracitadas foram fornecidos, pelo LNEC, os resultados experimentais da variável pressão em metros de coluna de água. Os resultados foram

obtidos através da ligação das tomadas de pressão a um painel de piezómetros, correspondendo à diferença entre as cotas piezométricas medidas no painel e os zeros das respectivas tomadas. De forma a comparar qualitativamente os resultados experimentais e numéricos, elaborou-se um perfil com os resultados obtidos da variável pressão, em que são apresentados os resultados experimentais e numéricos. O perfil foi obtido através do *software Tecplot*[®], para onde se importou os resultados obtidos no programa *FLOW-3D*[®]. Seguidamente, os resultados foram ajustados ao modelo do *Autocad*[®] e, conseqüentemente, à localização das tomadas de pressões onde se acrescentou o valor dos resultados experimentais de cada tomada, com o intuito de se comparar os valores de ambos os resultados. Os resultados experimentais, em metros de coluna de água, foram convertidos em Pascais, tendo-se considerado o valor da pressão atmosférica de 9800 Pascais. Foram elaborados dois perfis: o primeiro, que corresponde ao perfil central onde se vão comparar os resultados das tomadas de pressões colocadas na abóbada; o segundo, que corresponde ao perfil lateral onde se vão comparar os resultados das tomadas de pressões colocadas na parede. O estudo foi realizado para todas as alturas de água na albufeira, com a exceção do nível à cota de 305 metros, uma vez que não existiam resultados experimentais das pressões.

.

Apresenta-se seguidamente, a Figura 68 e a Figura 69 que correspondem, respetivamente, ao perfil central e lateral para o nível de água de 326 metros.

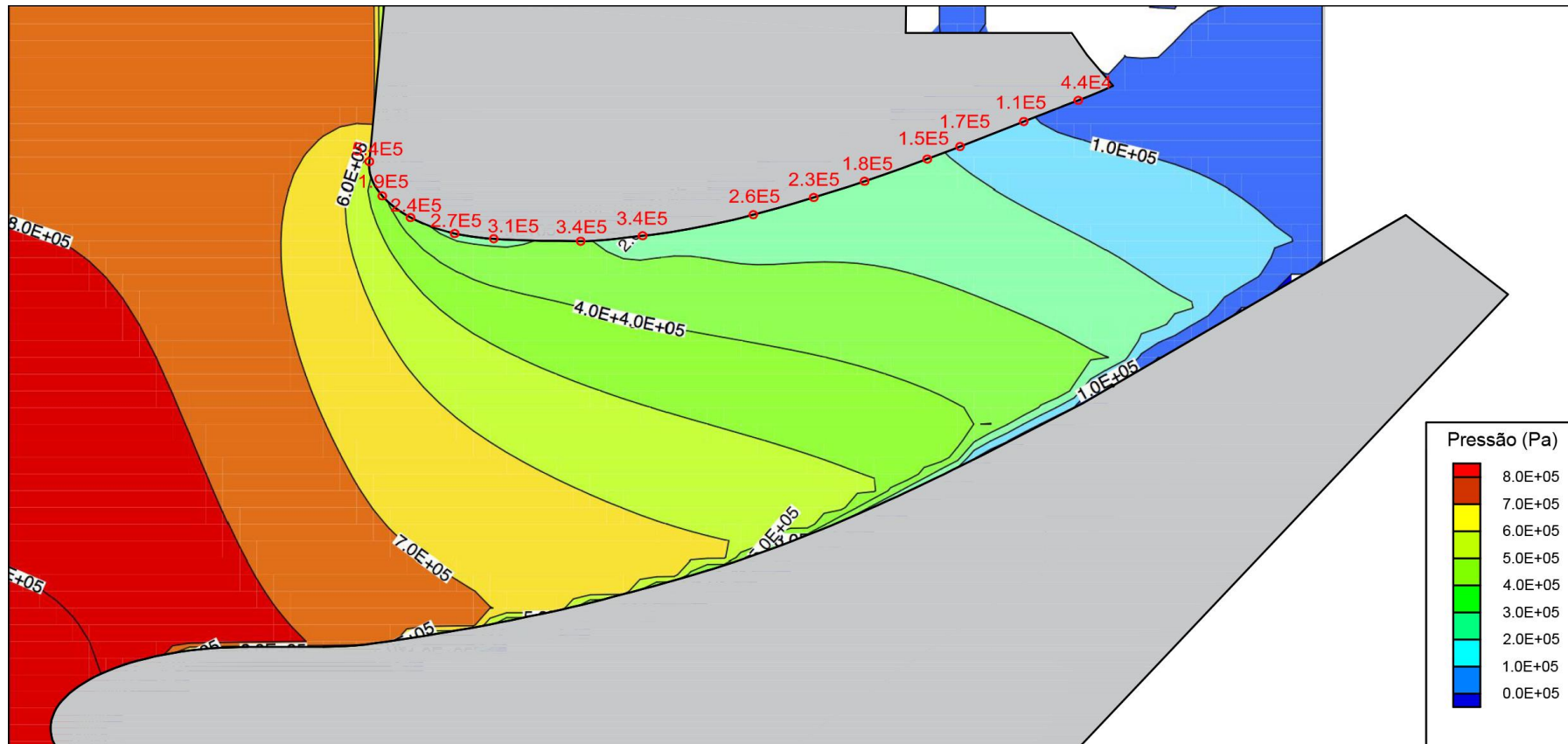


Figura 68 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=326m - perfil central

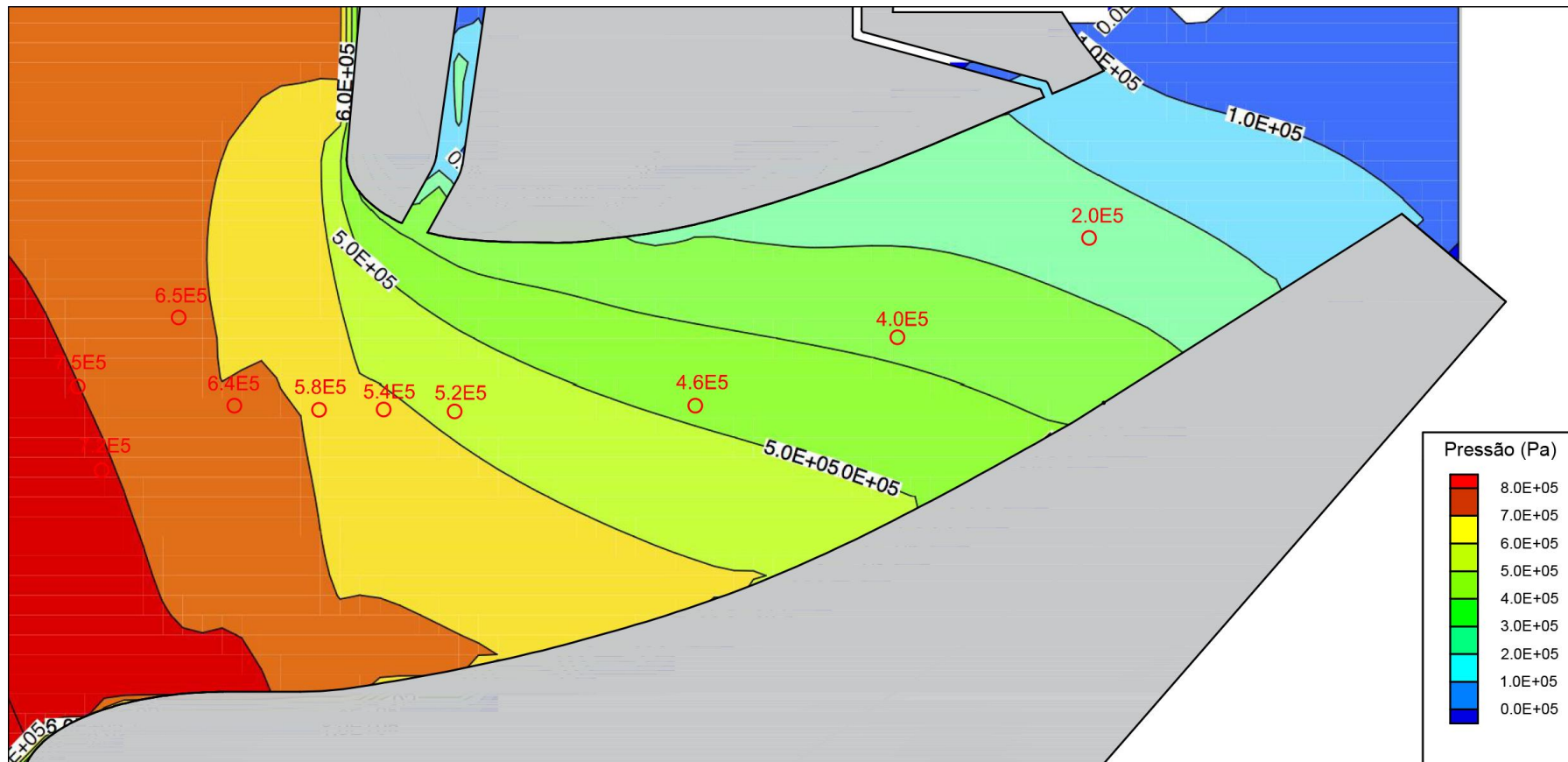


Figura 69 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para $H=326\text{m}$ - perfil lateral

Para este nível de água, obteve-se um mapa de pressões nivelado entre 0 e $8,0 \times 10^5$ Pascals. Tal como esperado, para ambos os perfis, o valor da pressão atinge o máximo na entrada do orifício, decrescendo até ao valor nulo quando se encontra em superfície livre.



Figura 71 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para $H=320\text{m}$ - perfil lateral

No estudo do mapa de pressões para esta altura, são apresentados, igualmente, valores entre 0 e $8,0 \times 10^5$ Pascais, atingindo-se o máximo na entrada do orifício e o mínimo junto à saída do mesmo.

Mostra-se na Figura 72 e na Figura 73 o perfil central e lateral, respectivamente. O nível de água em estudo é à cota de 315 metros.

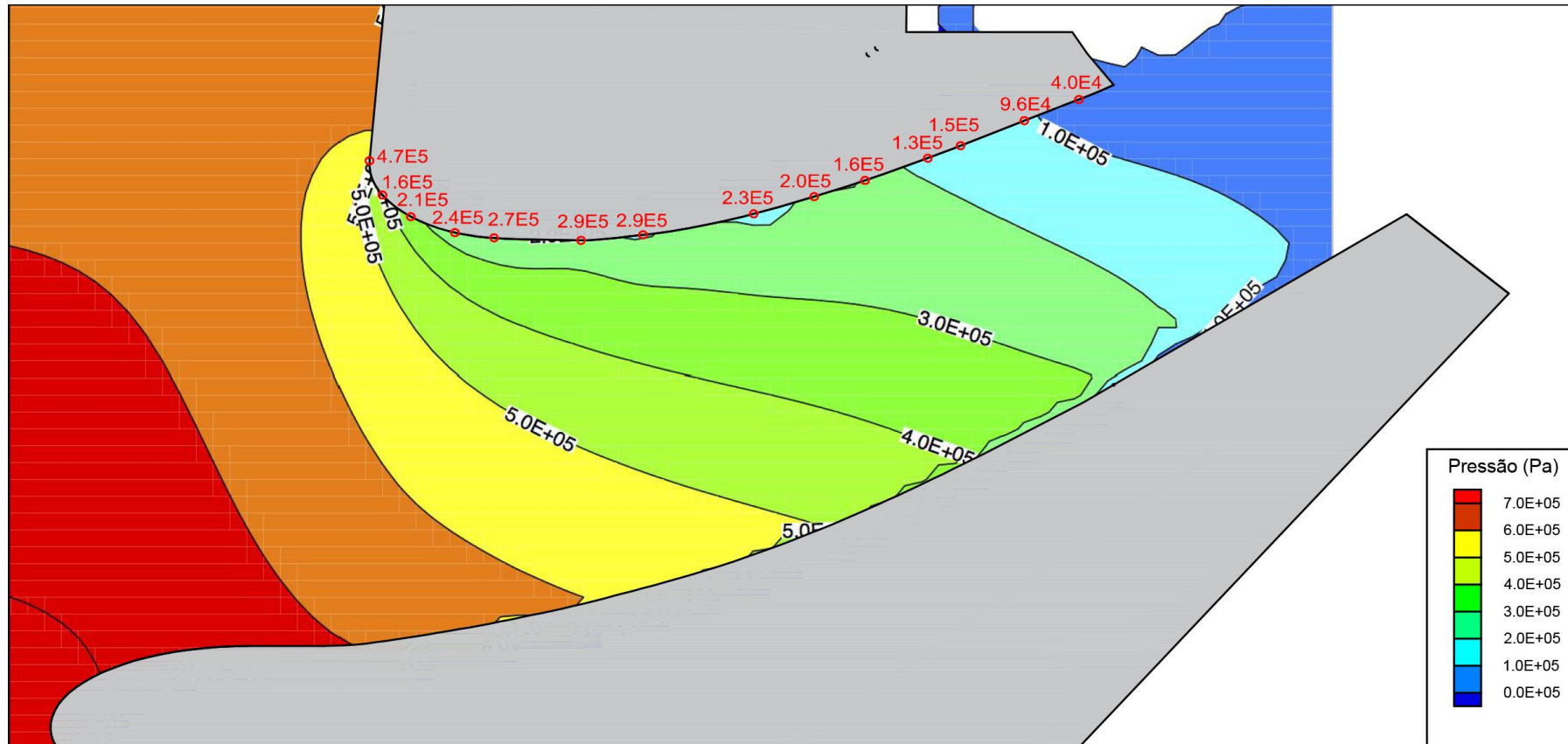


Figura 72 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=315m - perfil central

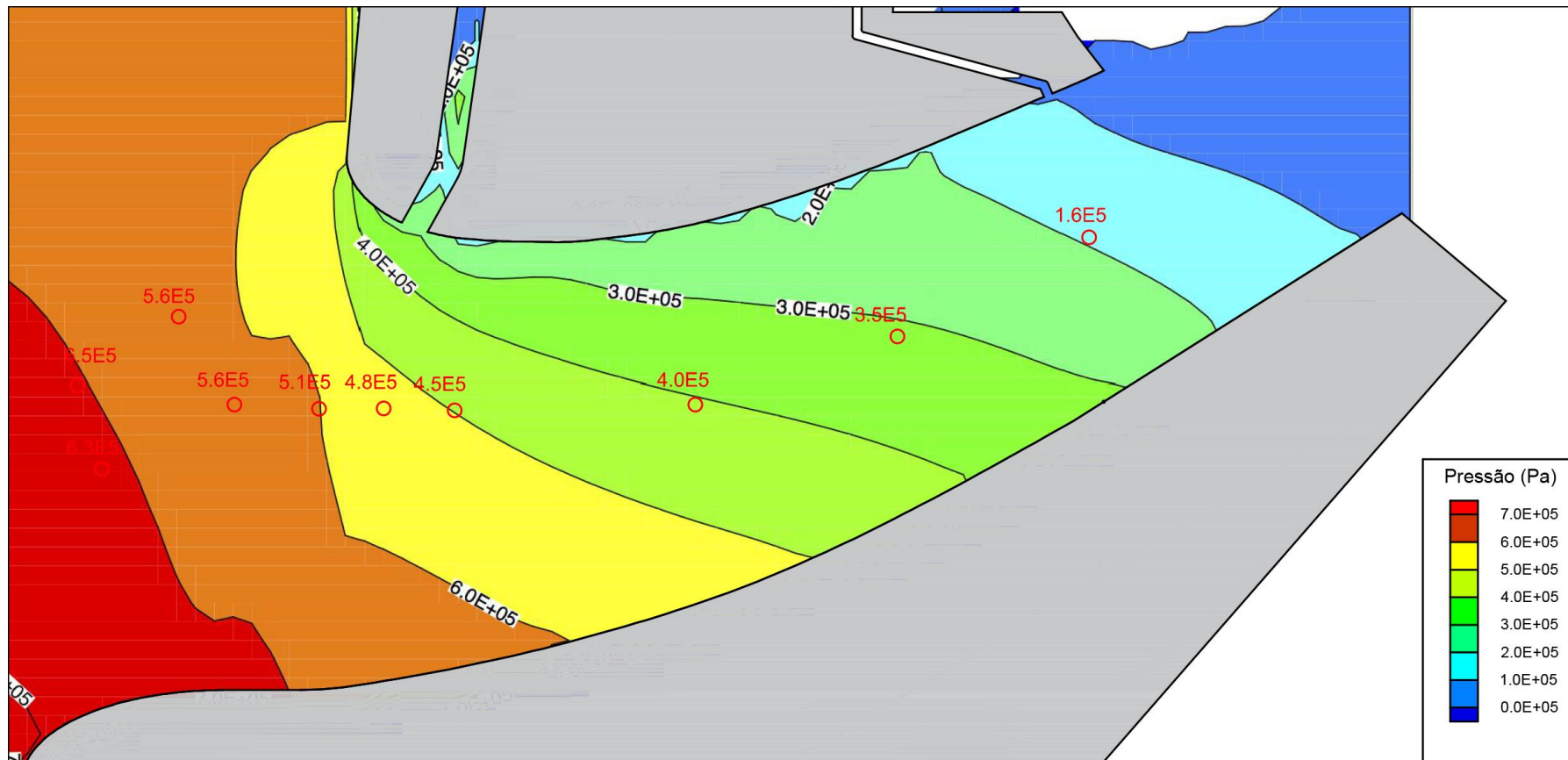


Figura 73 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelhos) para $H=315\text{m}$ - perfil lateral

Devido à diminuição do nível de água em estudo, já se verifica uma diminuição do valor máximo da pressão, sendo agora de $7,0 \times 10^5$ Pascals.

De seguida mostra-se o perfil central e lateral na Figura 74 e na Figura 75 , respetivamente. Estas figuras correspondem ao estudo para a água à cota de 310 metros.

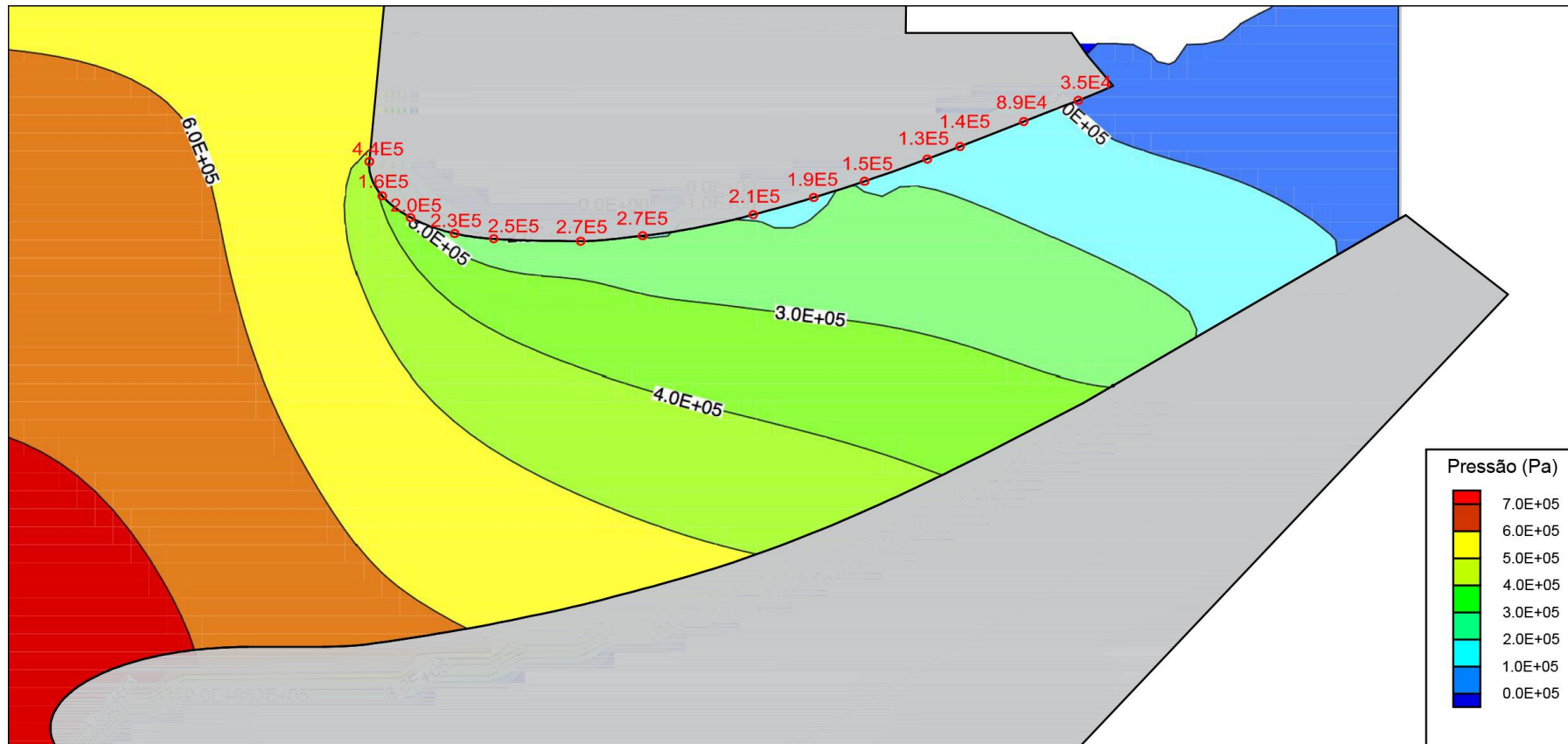


Figura 74 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=310m - perfil central

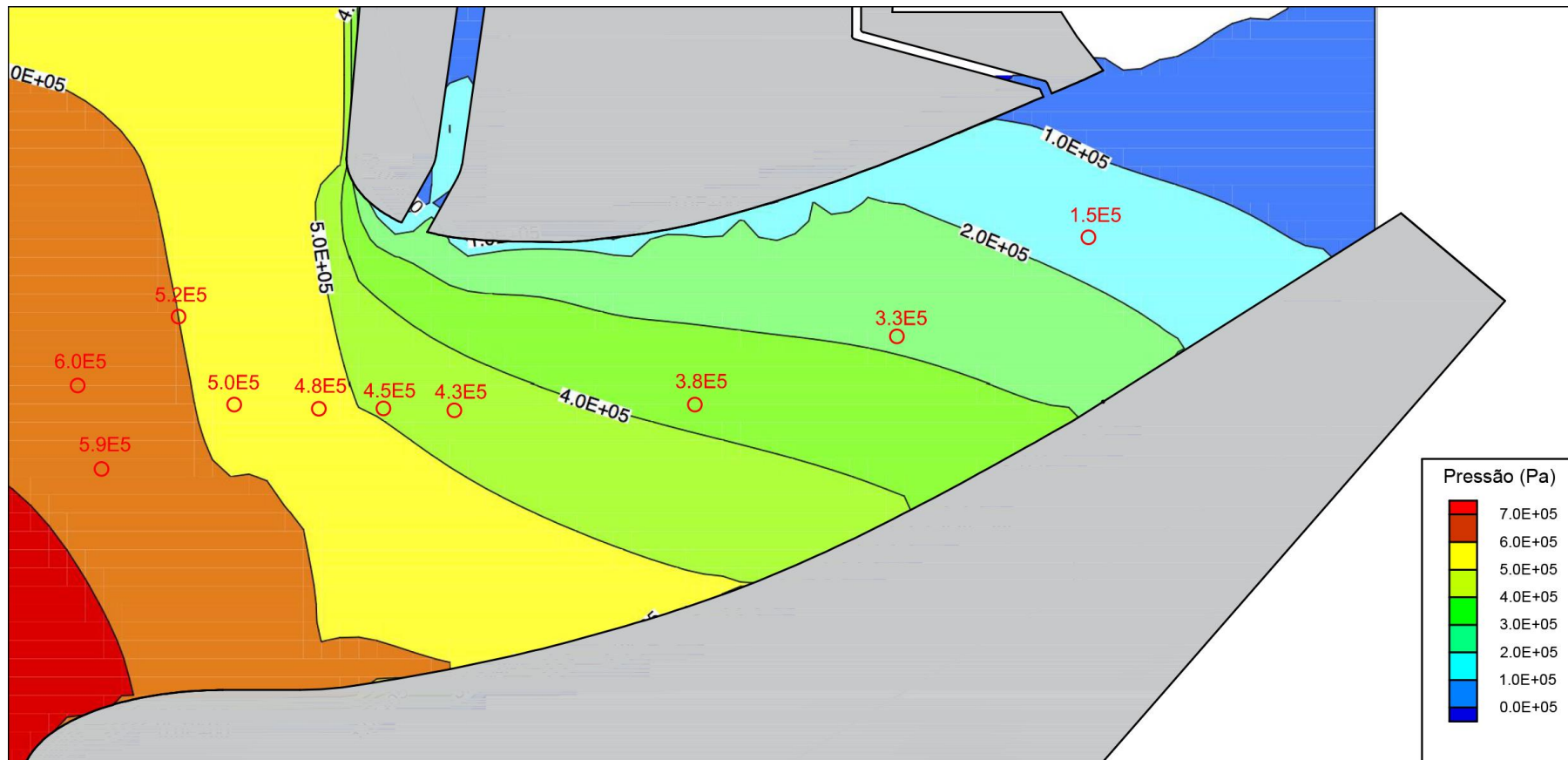


Figura 75 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=310m - perfil lateral

No estudo da altura de água à cota de 310 metros, são obtidos, igualmente, valores entre 0 e $7,0 \times 10^5$ Pascais, este valor corresponde ao nível máximo indicado na entrada do orifício.

Para o estudo do nível de água a 295 metros, foram obtidos os seguintes mapas de pressão do perfil central, representado na Figura 76 e do perfil lateral na Figura 77.

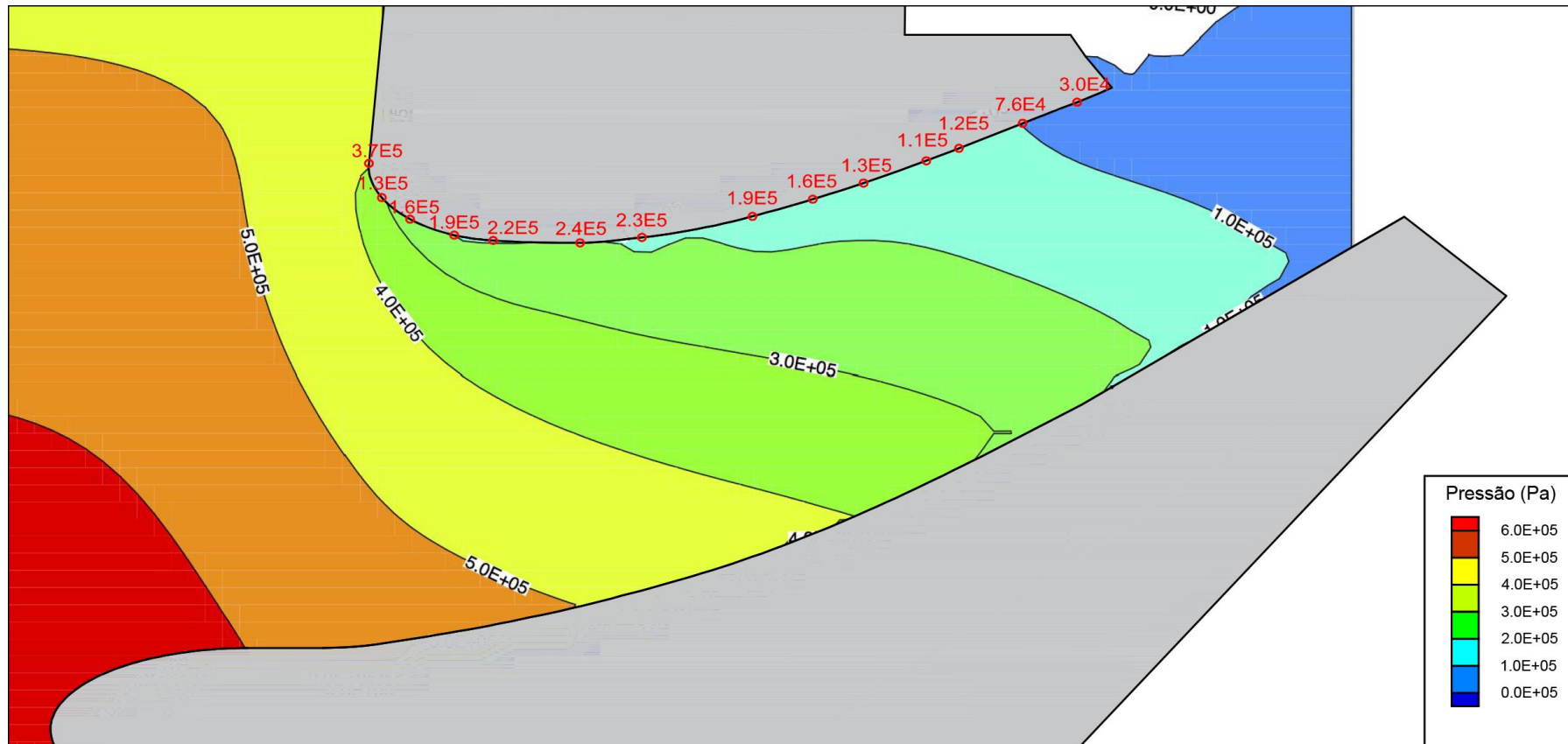


Figura 76 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para H=300m - perfil central



Figura 77 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para $H=300\text{m}$ - perfil lateral

Neste mapa de pressões verifica-se que existe mais um desnível nos resultados obtidos devido à diminuição do nível de água, apresentando-se assim, um máximo de $6,0 \times 10^5$ Pascals na entrada do orifício.

Finalmente apresenta-se ps resultados para o nível de água de 295 metros, foi realizada a Figura 78 e a Figura 79 que correspondem, respetivamente, ao perfil central e lateral.

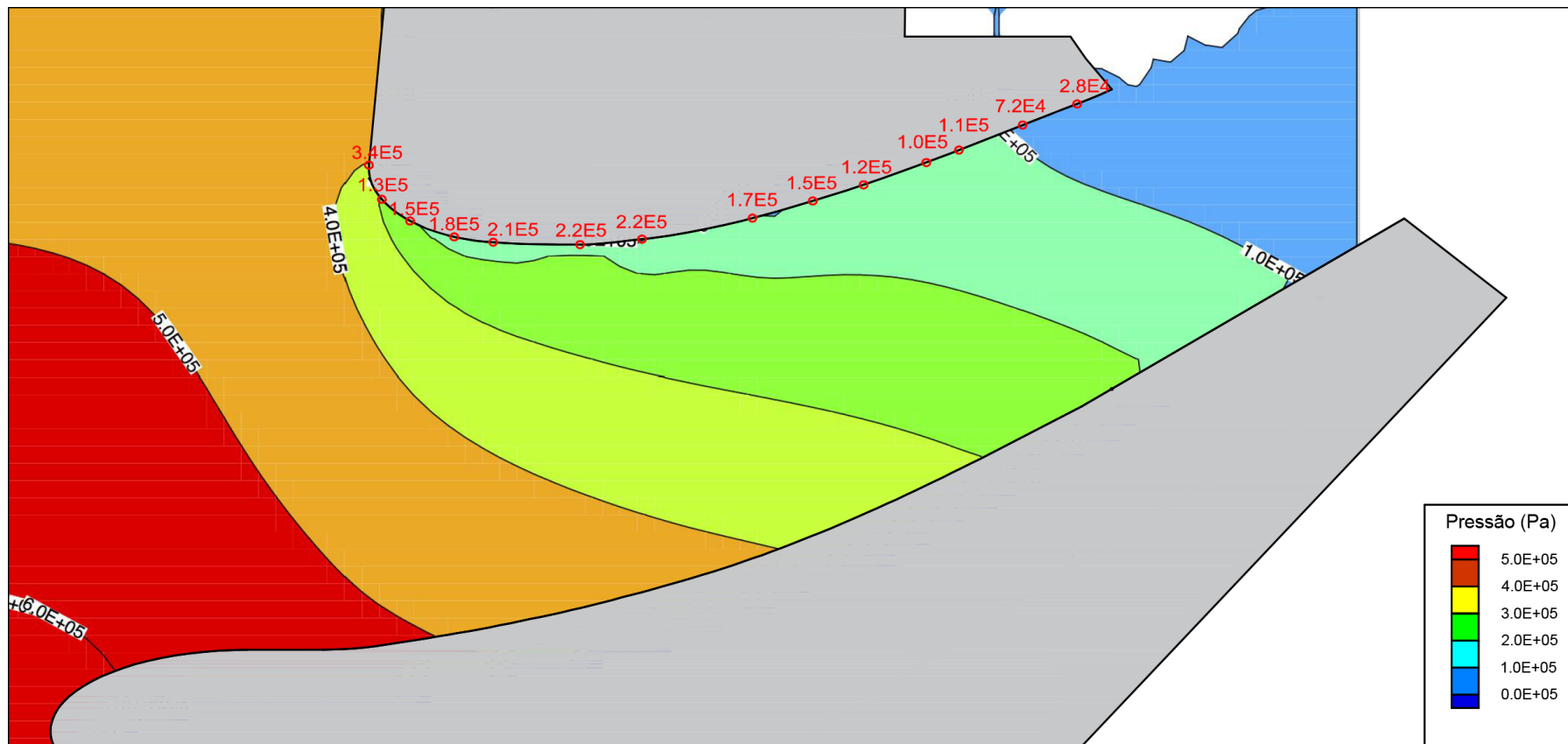


Figura 78 - Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelhos) para H=295m - perfil central



Figura 79 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais (a vermelho) para $H=295\text{m}$ - perfil lateral

Para o último nível de água em estudo, os resultados obtidos apresentam um máximo de $5,0 \times 10^5$ Pascais, confirmando que a pressão diminui com a redução do nível de água na albufeira.

Numa análise mais completa às figuras, percebe-se que existe alguma discrepância entre os resultados experimentais e os resultados numéricos obtidos em algumas tomadas de pressão. Este acontecimento verifica-se para os dois perfis em estudo, no entanto a tomada de pressão que apresenta maior discrepância é a nº 2, em que a diferença chega a ser de $2,0 \times 10^5$ Pascais.

Uma potencial causa para a diferença dos resultados experimentais e numéricos é a impossibilidade de determinação da localização precisa nos ensaios experimentais e o tamanho das células da malha, no estudo numérico, que têm 0,5 metros de lado.

4.2.2. Caudais

Na realização dos ensaios experimentais para a obtenção dos caudais, considerando-se diferentes níveis de água tendo sido registado o caudal escoado para cada cota.

Relativamente à obtenção dos resultados numéricos, o cálculo do caudal para cada secção foi determinado através da equação da continuidade que corresponde à seguinte fórmula:

$$Q = U \times A \quad (71)$$

Em que, Q representa o caudal, em metros cúbico por segundo, U corresponde à velocidade na direção x do escoamento numa secção, em metros por segundo, e traduz a área dessa mesma secção em metros quadrados. Esta equação estabelece que o caudal de um fluido, no interior de uma conduta, é igual em todas as secções (Quintela, 2009).

Assim, o caudal em cada secção foi calculado através da multiplicação dos valores da velocidade, obtidos do programa *FLOW-3D*[®], em cada célula, com a área de influência dessa célula na secção. Assim obteve-se os seguintes caudais, em metros cúbicos por segundo, apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Resultados numéricos do caudal para diferentes níveis de água na albufeira

Níveis da água na albufeira m	Resultados numéricos dos caudais $m^3 \cdot s^{-1}$
329	1695
326	1667
320	1599
315	1543
310	1486
305	1433
300	1362
295	1295

Os resultados numéricos dos caudais obtidos diminuem à medida que se baixa o nível da água na albufeira, tal como era esperado. Seguidamente, compara-se os resultados numéricos e os resultados experimentais, calculando-se o erro relativo entre ambos, apresentado na Tabela 33.

Tabela 33 - Valor do erro relativo entre os resultados experimentais e numéricos

Níveis de água na albufeira m	Erro relativo %
326	-2,0
320	-1,4
315	-1,3
310	-1,0
305	-1,6
300	-1,4
295	0,3

Como se pode observar na tabela, o erro relativo mais elevado foi para a altura de água de 326 metros, cujo valor é de 2%. Este resultado traduz uma elevada proximidade dos resultados experimentais e numéricos. Mediante os resultados obtidos, foi elaborada uma curva de vazão do descarregador em estudo, representado na Figura 80.

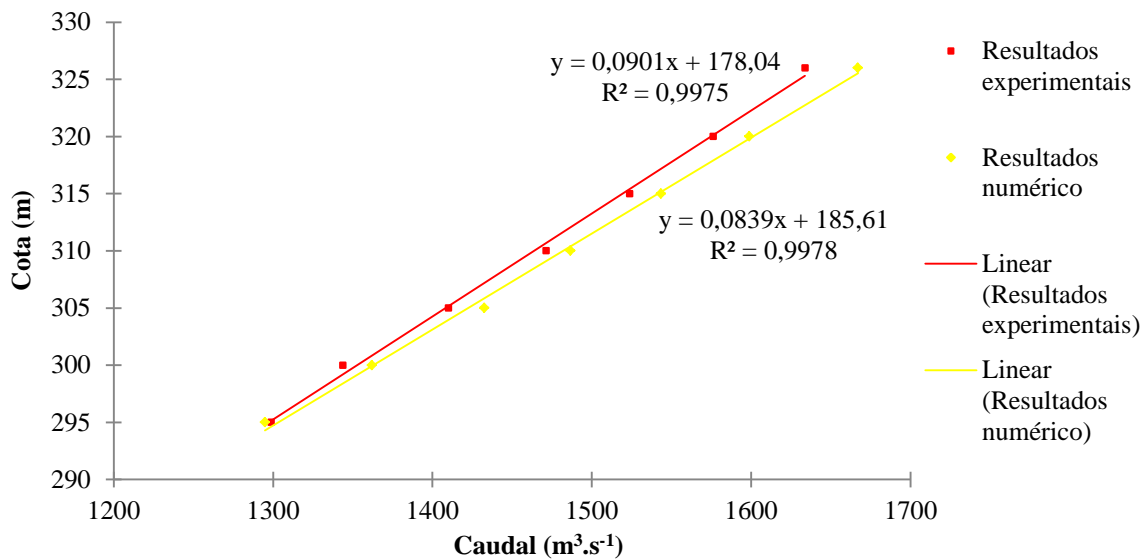


Figura 80 - Curva de vazão do descarregador

No gráfico elaborado com os resultados experimentais e numéricos, foi traçada uma linha de tendência para cada caso, tendo sido obtidos os coeficientes de correlação respetivamente, de 0,9975 e de 0,9978. Em ambos os casos, este coeficiente é próximo de um traduzindo uma boa correlação entre a altura de água e o caudal obtido para cada caso. Estes valores estão acordo com o que já foi concluído anteriormente, mostrando que o caudal no orifício diminui à medida que se diminui o nível da água na albufeira.

CAPÍTULO 5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões gerais

5.2. Desenvolvimentos futuros

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões gerais

Na presente dissertação foi elaborado o estudo numérico do escoamento num descarregadores por orifício através de um códigos CFD.

As simulações numéricas pretendem reproduzir um estudo experimental. Os ensaios foram realizados no LNEC e foram comparados com os resultados numéricos obtidos.

A geometria do modelo foi concebida no *software AutoCad-3D*[®], representando uma barragem do tipo abóbada em betão. O corpo da barragem foi estendido infinitamente para evitar problemas no desenvolvimento do fluido na albufeira, e o orifício foi localizado no centro da barragem.

A modelação numérica foi executada através do código comercial *FLOW-3D*[®], em que o principal objetivo foi definir o domínio do modelo mais eficiente para se obter resultados válidos no menor tempo de cálculo computacional. Este propósito consiste no refinamento da malha de cálculo até se atingir a convergência dos resultados ou o poder computacional assim o permitir. O estudo da malha de cálculo do modelo foi realizado através de uma análise aos resultados obtidos das variáveis pressão e velocidade do escoamento. Assim, comparando as várias simulações efetuadas, definiu-se o domínio computacional dos blocos 1 e 2 mais a aplicação *grid overlay*.

Efetuuou-se um estudo de vários modelos de cálculo disponíveis no programa *FLOW-3D*[®], dos quais se salientam os modelos de turbulência, advecção da superfície livre e advecção da equação de conservação da quantidade de movimento. Foi realizada uma análise aos resultados e aos tempos de cálculo computacional dos vários modelos, tendo-se concluído que as opções mais adequadas são: modelos de turbulência - $k-\epsilon$, modelos de advecção da superfície livre- Método Lagrangiano multidimensional (*unsplit*) e modelos de advecção da equação de conservação da quantidade de movimento - 2^a ordem com critério de *monotonicity*.

Testaram-se os limites do domínio computacional. O estudo consiste na redução dos limites nas direções x e y, diminuindo o número de células que compõem o modelo e

consequentemente diminuindo o tempo de cálculo computacional. Depois da redução dos limites, comparam-se os resultados e uma vez que estes não apresentavam diferenças significativas, concluiu-se que se pode utilizar o modelo computacional reduzido para a obtenção de resultados numéricos uma vez que o tempo de cálculo computacional é menor.

O estudo comparativo dos resultados experimentais e numéricos fez-se para vários níveis de água na albufeira, sendo que a comparação dos resultados foi realizada no interior do descarregador para os valores de pressão e caudais. Como já foi referido, os resultados experimentais foram fornecidos pelo LNEC, tendo os valores da pressão foram obtidos através de várias tomadas de pressão na abóbada e na parede lateral do orifício.

Os valores numéricos da pressão foram trabalhados através do *software TecPlot*[®], onde se introduziu os resultados obtidos no programa *FLOW-3D*[®]. Com o primeiro modelo obteve-se um mapa de pressões, dividido por níveis e separados por isolinhas. Ao mapa de pressões acrescentou-se a localização das tomadas de pressão e os resultados dos ensaios experimentais, realizando-se uma comparação dos resultados obtidos. Através de uma análise aos resultados verificou-se que os resultados apresentam valores próximos, no entanto, existe discrepância nos valores em algumas tomadas de pressão, nomeadamente, a tomada de pressão n° 2.

Relativamente ao cálculo dos caudais, este foi obtido para uma secção no interior do descarregador e comparado com o homólogo experimental, em ambos os casos verifica-se que os caudais diminuem com o abaixamento do nível de água na albufeira. Foi realizada uma comparação quantitativa, onde se calculou o erro relativo entre os dois tipos de resultados, tendo-se obtido um erro máximo de 2%, comprovando a proximidade dos resultados. Foi ainda executada uma curva de vazão com os resultados experimentais e numéricos em que, mais uma vez, se confirma uma boa correlação entre o nível da água na albufeira e os caudais obtidos.

5.2.Desenvolvimentos futuros

No estudo desenvolvido nesta dissertação, considerou-se que a comporta do descarregador se encontra totalmente aberta, logo, em trabalhos futuros podem ser realizadas simulações testando vários cenários de abertura.

Embora se tenha obtido resultados experimentais e numéricos muito semelhantes, é prematuro afirmar que se pode utilizar simuladores de códigos CFD para o dimensionamento de estruturas. Assim, existe a necessidade de realizar a análise quantitativa sistemática das simulações numéricas através da comparação dos resultados dos modelos numéricos com os modelos físicos para diversos tipos de estruturas hidráulicas.

Outro aspeto importante é o aprofundamento do estudo dos fenómenos hidrodinâmicos do escoamento que se pode obter pela simulação numérica e com a calibração em modelo físico utilizando novas técnicas de análise e visualização do escoamento que permitiram o conhecimento do campo de velocidades e das pressões por instrumentação avançada para caracterização de escoamentos em estruturas hidráulicas.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências bibliográficas:

- Barkhudarov, M. R. (2004). Lagrangian VOF advection Method for FLOW-3D ®, (July), 1–11.
- Carvalho, R. (2002). *Ações hidrodinâmicas em estruturas hidráulicas: Modelação computacional do ressalto hidráulico*. Tese de Douturamento, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Dargahi, B. (2006). Experimental Study and 3D Numerical Simulations for a Free-Overflow Spillway. . *Hydraulic Engng. 132*, (September), 899–907.
- Dargahi, B. (2010). Flow characteristics of bottom outlets with moving gates. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 476–482.
- Ferziger, J., e Peric, M. (2002). *Computacional Methods for Fluid Dynamics* (3ª edição.). Springer.
- Flow-3D. (2013). Flow-3D User Manual. Version 10.0, Flow Science.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlunzen, H., e Carissimo, B. (2007). Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. *COST Office*, (May), 1–52.
- Hirt, C. ., e Nichols, B. . (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics*, 39(1), 201–225.
- *Hirt, C. W., e Sicilian, J. M. (1985). A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes. Washington, DC: Fourth International Conference on Ship Hydrodynamics.
- Ho, D. K. H., e Riddette, K. M. (2010). Application of computational fluid dynamics to evaluate hydraulic performance of spillways in Australia. *Australian Journal of Civil Engineering*, 6(1), 81–104.

Lencastre, A. (1996). *Hidráulica Geral* (Edição de.). Lisboa: G.C. - Gráfica de Coimbra, Lda.

Li, H., Wang, P., Qi, L., Zuo, H., Zhong, S., e Hou, X. (2012). 3D numerical simulation of successive deposition of uniform molten Al droplets on a moving substrate and experimental validation. *Computational Materials Science*, 65, 291–301.

Meireles, I. (2011). *Hydraulics of stepped chutes: experimental-numerical-theoretical study*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Meireles, I. (2013). Apontamentos da unidade curricular “Obras Hidráulicas e Sanitárias” do Mestrado em Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Aveiro.

Pereira, A. (2010). *Eficiência hidrodinâmica e optimização no projecto de aproveitamentos hidroeléctricos*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Proença, M. (1987). *Estudo de campos de velocidades e de pressões num escoamento sob uma comporta*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Quintela, A. de C. (2009). *Hidráulica* (11^o Edição.). Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

Savage, B., Frizell, K., e Crowder, J. (2003). Brains versus Brawn : The Changing World of Hydraulic Model Studies. *Mc Neese State University*.

Savage, B., e Johnson, M. (2001). Flow over Ogee Spillway: Physical and Numerical Model Case Study. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(August), 640–649.

*Sicilian, J. M. (1990). “A FAVOR based moving obstacle treatment for flow 3D.” Flow Science: FSI-90-00-TN24.

Silva, M. (2013). *Modelação 3D de escoamentos em descarregadores de cheias com escoamento em superfície livre*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Silva, S. (2012). *Estudo numérico-experimental da tomada de água da barragem de Foz Tua*. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro.

Sousa, V. (2012). *Introdução à dinâmica dos fluidos computacional*. Apontamentos da unidade curricular de “Gestão Integrada de Sistemas de Saneamento” do Programa Doutoral em Engenharia do Ambiente, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Tennekes, H., e Lumley, J. (2010). *Turbulência em Fluidos*. Fundação Calouste Gulbenkian.

*Torrey, M., Cloutman, L. D., Mjolsness, R. C., e Hirt, C. w. (1985). “*NASA-VOF2D: Computer Program for Incompressible Flows with Free Surfaces.*” LANL, Rep:LA-10612-MS.

Versteeg, H., e Malalasekera, W. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method* (1ª edição.). Longman Scientific e Technical.

Wendt, J. (2008). *Computational fluid dynamics: an introduction* (3º edição.). Belgica: Springer.

*Referências não consultadas diretamente

Referências Normativas:

Portaria nº 846/93. Diário da Republica I Série – B. nº213 (10-9-1993) 4842-4855