

Moisés Gonçalves de Brito

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE TOMADAS DE ÁGUA

Lisboa

Setembro de 2010

Universidade Nova de Lisboa
Faculdade de Ciência e Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE TOMADAS DE ÁGUA

Moisés Gonçalves de Brito

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Luís Miguel Chagas da Costa Gil

Co-orientador: Prof. Dr. Eric Lionel Didier

Lisboa

Setembro de 2010

Agradecimentos

Ao Professor Luís Miguel Chagas da Costa Gil, pela orientação do presente trabalho, pelas importantes sugestões e pela revisão do texto, que sem ela este trabalho não podia ser realizado com sucesso. Agradeço também a oportunidade e confiança que me deu, assim como toda a ajuda, disponibilidade e sobretudo paciência demonstrada ao longo destes meses.

Ao Professor Eric Lionel Didier, pela co-orientação, pelas sugestões apresentadas sobretudo no programa *FLUENT*, que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Eng.º Bruno Jorge, EFACEC Ambiente, que sempre esteve disponível para participar em diversas tarefas experimentais.

Um agradecimento muito especial é endereçado à Dr.ª Josefa Lopes, pelo apoio financeiro que me possibilitou esta formação, obrigado por tudo.

À FACIT, especialmente a Dr.ª Maria Helena Cabral pelo apoio disponibilizado.

À fundação Oriente, pelo apoio disponibilizado.

À minha namorada, que me deu um apoio incondicional ao longo destes anos, sem o qual o presente trabalho não teria sido realizado com sucesso.

Aos meus colegas e amigos.

E, finalmente, um agradecimento muito especial aos meus pais.

Resumo

O aumento da capacidade de bombagem de uma central de adução obriga obviamente à adaptação ou reconstrução da tomada de água. A solução mais simples e geralmente mais barata consiste simplesmente na colocação de mais condutas na câmara de aspiração pré-existente. Esta solução em geral cria situações não contempladas nas normas que no entanto podem ser satisfatórias do ponto de vista operacional e mais económicas porque não obrigam à alteração da tomada de água.

O presente trabalho tem como principais objectivos validar e demonstrar a utilidade da simulação numérica com um código do tipo *RANS* no estudo/projecto das tomadas de água. Estas simulações são realizadas recorrendo ao programa *FLUENT* que resolve numericamente as equações *RANS* e recorre ao método *VoF* para a modelação da superfície livre.

Neste trabalho o modelo numérico é inicialmente validado e posteriormente aplicado à central de adução do Roxo. O modelo revelou-se capaz de simular o escoamento resultante de alterações no posicionamento das condutas de aspiração para diferentes capacidades de bombagem. As simulações numéricas permitiram ainda concluir que a câmara de aspiração, existente nesta central de adução, foi largamente sobredimensionada.

Da pesquisa bibliográfica efectuada pôde constatar-se que a aplicação de um método *VoF* na identificação da superfície livre conferiu a este trabalho uma componente de inovação.

Dos resultados obtidos concluiu-se que o modelo numérico simula com precisão o escoamento com superfície livre no interior das tomadas de água, sendo uma ferramenta de inequívoca utilidade na adequação e/ou dimensionamento das centrais de adução.

Palavras-chave: simulação numérica de tomadas de água, equações *RANS*, método *VoF*, condutas de aspiração, submergência mínima.

Abstract

The increase capability of the pumping of a pumping station forces an adaptation or reconstruction of the water intake. The easiest and generally the cheapest solution is simply putting more suction pipes in the pre-existent suction sump. This solution generally creates situation not complied with the standards but can satisfy from an operational point of view and more cheapest because it doesn't force any changes in the water intake.

The current essay has with primary goals the validation and demonstration the use of numerical simulations, using RANS code, in the study/planning of the water intakes. These simulations are performed using the FLUENT software that solves numerically the RANS equations with a VoF method for modeling the free surface.

In this essay the numeric module is initially validated and after applied to the Roxo pumping station. The model reveals itself capable of simulating the flow resulting from the alterations in the positioning of the suction pipes for different pumping capabilities. The numeric simulations even allow concluding that the suction sump, existing in this pumping station, was largely over dimensioned.

From the bibliographic research we were able to realize that the application of a VoF method in the identification of the free surface brings an innovation component to this work.

From the obtained results we were able to conclude that the numeric model simulates with a very good precision the flow with free surface in the interior of the water intakes, became one tool of unequivocal utility in the adaptation and/or dimensioning of the pumping station.

Keywords: *numerical simulations of the water intakes, RANS equations, VoF method, suction pipes, minimal submergence.*

Simbologias e Notações

g	aceleração gravítica
H	altura de elevação
h_p	altura piezométrica
A	área da secção transversal da conduta de aspiração
Q_m	caudal mássico
Q	caudal volúmico
K	coeficiente de resistência da rede
V_t	componente tangencial da velocidade
$V_{t-Entrada}$	componente tangencial da velocidade à entrada do rotor das bombas
u_i	componentes da velocidade
$\overline{u_i}$	componentes da velocidade média
x_i	componentes das coordenadas cartesianas
l_m	comprimento da turbulência
C_μ	constante de proporcionalidade para a viscosidade dinâmica turbulenta
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$	constante do modelo $k - \varepsilon$ para a taxa de dissipação turbulenta

δ_{ij}	delta de Kronecker
D	diâmetro da conduta de aspiração na secção de entrada
d	diâmetro interior da conduta de aspiração
b	distância longitudinal ao escoamento entre as condutas de aspiração
k	energia cinética turbulenta
u'_i	flutuação das componentes da velocidade
C	fracção de volume
G_k	geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade
G_b	geração de energia cinética turbulenta devido às flutuações das componentes da velocidade
ρ	massa volúmica do fluido
n	número de bombas em funcionamento
F_r	número de Froude
σ_k	número de Prandtl para a energia cinética turbulenta
σ_ε	número de Prandtl para a taxa de dissipação turbulenta
P	potência nominal das bombas
p	pressão
S	submergência mínima
ε	taxa de dissipação turbulenta
t	tempo
R_{ij}	tensor de Reynolds

τ_{ij}	tensor de viscosidade
v	velocidade da turbulência
ω	velocidade de rotação
U	velocidade de transporte das pás
V	velocidade média
$\langle V \rangle$	velocidade média axial no interior das condutas de aspiração
ν_t	viscosidade cinemática turbulenta
μ	viscosidade dinâmica
μ_t	viscosidade dinâmica turbulenta

Abreviaturas

<i>HRIC</i>	(do inglês “ <i>High Resolution Interface Capturing</i> ”)
<i>MUSCL</i>	(do inglês “ <i>Monotonic Upstream Scheme for Conservation Laws</i> ”)
<i>PRESTO</i>	(do inglês “ <i>PREssure STaggering Option</i> ”)
<i>SIMPLEC</i>	(do inglês “ <i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent</i> ”)
<i>SIMPLE</i>	(do inglês “ <i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i> ”)
<i>UDS</i>	(do inglês “ <i>User Defined Scalar</i> ”)
<i>ASTEE</i>	Associação Científica e Técnica para a Água e o Ambiente (do francês “ <i>Association Scientifique et Technique pour l’Eau et l’Environnement</i> ”)
<i>AFNOR</i>	Associação Francesa de Normalização (do francês “ <i>Association Française de Normalisation</i> ”)
<i>2D</i>	Bidimensional
<i>FCI</i>	Captura da Superfície Livre (do inglês “ <i>Front Capturing Interface</i> ”)
<i>DEMI</i>	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
<i>CFD</i>	Dinâmica de Fluidos Computacional (do inglês “ <i>Computational Fluid Dynamics</i> ”)
<i>RANS</i>	Equações médias de Navier-Stokes (do inglês “ <i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i> ”)
<i>FCT</i>	Faculdade de Ciências e Tecnologia
<i>ANSI</i>	Instituto Nacional de Normalização Americano (do inglês “ <i>American National Standards Institute</i> ”)

<i>FTI</i>	Monitorização da Superfície Livre (do inglês “ <i>Front Tracking Interface</i> ”)
<i>UDF</i>	Programa externo (do inglês “ <i>User Defined Functions</i> ”)
SL	Superfície Livre
3D	Tridimensional
<i>VoF</i>	Volume do Fluido (do inglês “ <i>Volume of Fluid</i> ”)

Índice

1. Introdução	1
1.1 Considerações gerais	1
1.2 Objectivos e Metodologias.....	4
1.3 Organização do trabalho.....	6
2. Estudo Bibliográfico	8
2.1 Descrição sumária de uma central de adução.....	8
2.1.1 Tomada de água	10
2.1.2 Bombas.....	12
2.1.3 Conduitas, Válvulas e Acessórios	13
2.1.4 Sistemas de Protecção	14
2.2 Parâmetros de projecto de tomadas de água.....	14
2.2.1 Posicionamento das condutas de aspiração	16
2.3 Simulação numérica de escoamentos com superfície livre.....	19
2.4 Simulação numérica de tomadas de água.....	20
3. Modelação Matemática e Numérica	23
3.1 Equações de Navier-Stokes	23
3.2 Equações <i>RANS</i>	25
3.2.1 Modelo de turbulência $k-\varepsilon$	27
3.3 Método <i>VoF</i>	29
3.4 Geração da malha	30
3.5 Esquema numérico e modelo de turbulência.....	32

3.5.1	Condições de fronteira	33
4.	Validação do Modelo Numérico	35
4.1	Simulação numérica em 2D	35
4.1.1	Discretização temporal.....	37
4.1.2	Discretização espacial	41
4.1.3	Justificação da escolha das condições de fronteira.....	47
4.2	Simulação numérica em 3D	51
4.2.1	Justificação da escolha das condições de fronteira.....	54
4.3	Comparação dos resultados da simulação numérica com dados experimentais	62
4.4	Sumário do capítulo	67
5.	Resultados Numéricos	68
5.1	Adequação da tomada de água às diferentes capacidades de bombagem.....	69
5.1.1	Aumento da capacidade de bombagem em 33%.....	69
5.1.2	Aumento da capacidade de bombagem em 66%.....	85
5.1.3	Aumento da capacidade de bombagem em 100%.....	90
5.1.4	Aumento da capacidade de bombagem 200%.....	94
5.2	Câmara de aspiração curta.....	97
6.	Conclusões	102
6.1	Conclusões e trabalho futuro.....	102
	Referências Bibliográficas	105
	Anexos.....	109

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Central de adução do Roxo.	4
Figura 1.2 – Fluxograma desenvolvido para o dimensionamento das tomadas de água.....	5
Figura 2.1 – Representação esquemática de uma central de adução.....	9
Figura 2.2 – Principais elementos de tomadas de água.....	11
Figura 2.3 – Tamisadores da central de adução do Roxo.....	12
Figura 2.4 – Vórtices submersos típicos da interferência entre bombas.....	16
Figura 2.5 – Grandezas geométricas relevantes para a determinação da submergência mínima das condutas de aspiração.....	17
Figura 3.1 – Repartição da fracção de volume numa tomada de água (pormenor da zona de identificação da posição da superfície livre).	30
Figura 4.1 – Domínio de cálculo bidimensional e condições de fronteira.....	37
Figura 4.2 – Influência do passo de tempo na forma da superfície livre (pormenor no início das curvas).....	39
Figura 4.3 – Influência do passo de tempo no perfil da componente x da velocidade nas secções de controlo: a) $x = 24,275$ m; b) $x = 2$ m.	40
Figura 4.4 – Influência da malha na forma da superfície livre (pormenor no início das curvas).	43
Figura 4.5 – Malha otimizada.....	45

Figura 4.6 – Comparação da forma da superfície livre para a malha otimizada e fina (pormenor no início das curvas).	46
Figura 4.7 – Campo de velocidade na vizinhança da conduta de aspiração: a) Malha fina; b) Malha otimizada.	47
Figura 4.8 – Domínio de cálculo com reservatório semi-infinito a montante da secção de entrada.	48
Figura 4.9 – Comparação do perfil de velocidade nas secções de controlo: a) $x = 24,275$ m; b) $x = 30,475$ m. Para os dois modelos: reservatório semi-infinito a montante (Res) e condição de fronteira de caudal mássico (Q_m).	49
Figura 4.10 – Variação da massa com o tempo na secção de entrada para os dois modelos: reservatório semi-infinito a montante (Res) e condição de fronteira de caudal mássico (Q_m).	50
Figura 4.11 – Deformada da superfície livre para os dois modelos: reservatório semi-infinito a montante (Res) e condição de fronteira de caudal mássico (Q_m).	50
Figura 4.12 – Domínio de cálculo e condições de fronteira.	53
Figura 4.13 – Malha da superfície exterior do domínio de cálculo (pormenor da malha junto às condutas).	54
Figura 4.14 – Domínio de cálculo com reservatório semi-infinito.	55
Figura 4.15 – Perfil da componente x da velocidade na secção $x = 30,475$ m: a) condição de caudal mássico; b) reservatório semi-infinito a montante.	56
Figura 4.16 – Perfil da componente x da velocidade na secção $x = 24,275$ m: a) condição de caudal mássico; b) reservatório semi-infinito a montante.	56
Figura 4.17 – Campo de velocidade no plano xy ($z = - 5,3$ m) na vizinhança da conduta de aspiração: a) condição de caudal mássico; b) reservatório semi-infinito a montante.	57
Figura 4.18 – Comparação da deformada da superfície livre junto às condutas de aspiração (nível da superfície livre em repouso: 4 m): a) condição de caudal mássico; b) reservatório semi-infinito a montante.	58

Figura 4.19 – Perfil da componente tangencial da velocidade à entrada nas condutas de aspiração.	59
Figura 4.20 – Campo de vorticidade [1/s] no plano xz ($y = 0,7$ m) na vizinhança da conduta de aspiração: a) componente tangencial e axial; b) componente axial.....	60
Figura 4.21 – Isobáricas [Pa] na vizinhança da conduta de aspiração: a) componente tangencial e axial; b) componente axial.	61
Figura 4.22 – Linhas de corrente na vizinhança da conduta de aspiração: a) componente tangencial e axial; b) componente axial.	62
Figura 4.23 – Localização dos equipamentos de medida.	63
Figura 4.24 – Altura da superfície livre [m] para os três ensaios (nível da superfície livre em repouso: 4,2 m): a) Bomba 1; b) Bomba 4; c) Bomba 1 e 4.....	66
Figura 5.1 – Aumento da capacidade de bombagem em 33% - configuração 1.	71
Figura 5.2 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).	72
Figura 5.3 – Linhas de corrente tridimensionais.	73
Figura 5.4 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).	74
Figura 5.5 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).	75
Figura 5.6 – Pressão dinâmica entre as condutas 2 e 4.....	76
Figura 5.7 – Deformada da superfície livre na vizinhança das condutas de aspiração (nível da superfície livre em repouso: 4 m).	77
Figura 5.8 – Aumento da capacidade de bombagem em 33%: a) configuração 2; b) configuração 3.	78
Figura 5.9 – Campo de vorticidade [1/s] no plano xz ($y = 0,7$ m): a) configuração 2; b) configuração 3.	79
Figura 5.10 – Aumento da capacidade de bombagem em 33%: a) configuração 4; b) configuração 5.	80

Figura 5.11 – Campo de vorticidade [1/s] no plano xz ($y = 0,7$ m): a) configuração 4; b) configuração 5.	81
Figura 5.12 – Aumento da capacidade de bombagem em 33%: a) configuração 6; b) configuração 7.	82
Figura 5.13 – Campo de vorticidade [1/s] no plano xz ($y = 0,7$ m): a) configuração 6; b) configuração 7.	83
Figura 5.14 – Campo de vorticidade [1/s] no plano xz ($y = 0,7$ m): a) configuração 8; b) configuração 9.	84
Figura 5.15 – Aumento da capacidade de bombagem em 66% - configuração 1.	85
Figura 5.16 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).	86
Figura 5.17 – Deformada da superfície livre na vizinhança das condutas de aspiração (nível da superfície livre em repouso: 4 m).	87
Figura 5.18 – Aumento da capacidade de bombagem em 66%: a) configuração 2; b) configuração 3; c) configuração 4.	88
Figura 5.19 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m): a) configuração 2; b) configuração 3; c) configuração 4.	90
Figura 5.20 – Aumento da capacidade de bombagem em 100%.	91
Figura 5.21 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).	92
Figura 5.22 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).	93
Figura 5.23 – Deformada da superfície livre na vizinhança das condutas de aspiração (nível da superfície livre em repouso: 4 m).	94
Figura 5.24 – Aumento da capacidade de bombagem em 200%.	95
Figura 5.25 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).	96
Figura 5.26 – Deformada da superfície livre junto às condutas 3, 6 e 9.	97
Figura 5.27 – Domínio de cálculo reduzido.	98

Figura 5.28 – Campo de vorticidade [1/s] no plano xz ($y = 0,7$ m): a) geometria pré-existente;
b) geometria alterada. 99

Figura 5.29 – Perfil da componente x da velocidade a 0,5 m das condutas de aspiração: a)
geometria pré-existente; b) geometria alterada. 100

Figura 5.30 – Deformada da superfície livre (nível da superfície livre em repouso: 4 m)..... 101

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Recomendações para a submergência mínima.	18
Tabela 2.2 – Classificação de vórtices nas condutas de aspiração.	19
Tabela 3.1 – Valores das constantes do modelo $k-\varepsilon$ padrão.	28
Tabela 3.2 – Resumo dos parâmetros numéricos.	33
Tabela 4.1 – Características das malhas utilizadas.	42
Tabela 4.2 – Características das malhas.	45
Tabela 4.3 – Conclusões do estudo bidimensional.	51
Tabela 4.4 – Dados experimentais.	64
Tabela 4.5 – Comparação dos resultados numéricos com dados experimentais.	65
Tabela 5.1 – Características das malhas e os respectivos tempos de cálculo.	70

Capítulo 1

Introdução

Nesta introdução pretende-se fornecer uma visão global do trabalho desenvolvido. Assim, começa-se por apresentar de uma forma sumária as considerações gerais do trabalho. Seguidamente, apresentam-se os principais objectivos e a metodologia adoptada. Na parte final descreve-se a organização, especificando os conteúdos de cada capítulo.

1.1 Considerações gerais

A tomada de água é uma das componentes de uma central de adução. A sua finalidade é receber e armazenar temporariamente a água proveniente de rios, reservatórios ou albufeiras através do canal de entrada e convergi-la uniformemente para as condutas de aspiração. Esta componente encontra-se, localizada na extremidade da central, normalmente numa cota inferior relativamente aos outros componentes hidráulicos, a montante das condutas de aspiração alimentando todo o circuito hidráulico.

Segundo Jones (2008) as tomadas de água dividem-se em dois tipos, dependendo do posicionamento das condutas de aspiração na câmara de aspiração: aspiração vertical e horizontal. O dimensionamento/posicionamento das condutas de aspiração é de extrema importância no projecto de tomadas de água, destacam-se as seguintes características a definir: submergência mínima e localização das condutas de aspiração na câmara.

Segundo a norma AFNOR (1989) o deficiente dimensionamento/posicionamento das condutas de aspiração e configurações de tomadas de água provocam elevadas velocidades do escoamento com vorticidade e submergência desajustada. Os vórtices induzidos possibilitam a entrada de ar nas condutas de aspiração causando elevadas vibrações e conseqüentemente a degradação dos componentes mecânicos das bombas. No caso de aspiração vertical, de bombas com rotor suspenso (o rotor encontra-se numa cota superior à da superfície livre da água na câmara de aspiração) estas podem mesmo desferrar devido à entrada de ar na conduta de aspiração.

O projecto de tomadas de água é uma tarefa complexa que integra várias vertentes que se condicionam mutuamente, tais como: a sua configuração geométrica, o posicionamento das condutas de aspiração e o comportamento do escoamento. A utilização de normas, metodologias ou recomendações permite na prática obter soluções que satisfazem os requisitos de projecto das tomadas de água para os diferentes regimes de funcionamento das centrais de adução.

O dimensionamento das tomadas de água é feito usualmente utilizando normas, que permitem definir as configurações geométricas das tomadas, a submergência mínima, a localização das condutas de aspiração em função do caudal e a velocidade máxima. Neste âmbito é interessante indicar as principais normas usadas em Portugal: AFNOR E44-203 (1989) e ANSI/HI 9.8 (1998).

Após a construção de uma central de adução é muito frequente ter necessidade de aumentar a sua capacidade de bombagem. O aumento de caudal nominal obriga obviamente à adaptação ou reconstrução da tomada de água. A solução mais simples e geralmente mais barata consiste simplesmente na colocação de mais condutas na câmara de aspiração da tomada de água pré-existente. Esta solução em geral cria situações não contempladas nas normas que no entanto podem ser satisfatórias do ponto de vista operacional e mais económicas porque não obrigam à alteração da geometria da câmara de aspiração.

A simulação numérica revela-se uma ferramenta apropriada na análise das soluções de adaptação das tomadas de água, pois permite estudar pormenorizadamente o comportamento do escoamento resultante do posicionamento das condutas e/ou de alterações da geometria da câmara de aspiração.

A utilização da simulação numérica neste contexto permite:

- i) Reduzir os custos de projecto.
- ii) Alterar as características geométricas e/ou o posicionamento das condutas de aspiração (condições muito difíceis de simular experimentalmente) obtendo-se o campo de velocidades, vorticidades, campo de pressões, deformação da superfície livre, linhas de corrente, entre outros.
- iii) Simular situações não contempladas nas normas mas operacionalmente válidas, sem recorrer a testes experimentais.

As potencialidades da utilização de *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*) não têm sido amplamente exploradas para o estudo de escoamento nas tomadas de água com várias bombas instaladas na câmara de aspiração sem paredes divisórias. No entanto, os programas comerciais actuais possibilitam simular numericamente este tipo de escoamento, e apresentam interfaces amigáveis para a definição da geometria/malha e dos parâmetros da modelação numérica, permitindo obter resultados com tempo de cálculo moderado.

A motivação principal que presidiu à elaboração deste trabalho prende-se com as dificuldades sentidas por parte de empresas no projecto de adequação/adaptação das tomadas de água. A possibilidade de obter dados experimentais para a validação do modelo numérico na central de adução construída pelo Instituto Hidráulica, Engenharia Rural e Ambiente integrante do sistema de Reabilitação do Aproveitamento Hidroagrícola de Roxo e propriedade da Associação dos Beneficiários do Roxo, apresentado na figura 1.1, constituiu uma motivação suplementar.

Para além de se pretender adequar as geometrias das tomadas de água aos novos requisitos e identificar as situações potencialmente críticas para as geometrias existentes, tem-se ainda como ambição propor novas geometrias que de alguma forma permitam melhorar o funcionamento de tomadas de água e reduzir os custos associados à sua reconstrução.



Figura 1.1 – Central de adução do Roxo.

1.2 Objectivos e Metodologias

O objectivo principal deste trabalho consiste em validar e demonstrar a utilidade da simulação numérica com um código do tipo *RANS* (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), no estudo/projecto de tomadas de água.

A geometria/malha é gerada utilizando o programa *GAMBIT*, que permite a discretização do domínio de cálculo. O programa utilizado para as simulações numéricas é o *FLUENT*. Este programa resolve as equações *RANS* através de uma técnica de volumes finitos utilizando o método *VoF* (*Volume of Fluid*) na identificação da superfície livre.

Os esquemas numéricos serão, primeiramente, objecto de um estudo pormenorizado pretendendo-se identificar as suas possíveis limitações, vantagens e desvantagens. Posteriormente, serão aplicados e validados, utilizando dados de ensaios experimentais.

A metodologia de trabalho apoia-se essencialmente em duas partes: i) validação; ii) estudo numérico. Na primeira parte, validação, modela-se a geometria de uma tomada de água existente (figura 1.1). Posteriormente são realizadas simulações numéricas com diferentes

esquemas numéricos, modelos de turbulência e discretizações espaciais e temporais (apresentados nos Capítulos 3 e 4). Os resultados numéricos são comparados e validados com dados experimentais. Na segunda parte, estudo numérico, aplica-se o modelo numérico validado anteriormente aos diferentes casos de estudo, mantendo-se os esquemas numéricos, o modelo de turbulência, a discretização temporal e adaptando a discretização espacial. Com os dados obtidos da aplicação do modelo numérico, procede-se o estudo comparativo que consiste na verificação do desempenho baseado em critérios de qualidade (apresentados nos Capítulos 2 e 5, secções 2.2 e 5.11 respectivamente). Caso esses critérios não forem satisfeitos é alterado o posicionamento das condutas de aspiração.

O dimensionamento e optimização da geometria de tomadas de água e o posicionamento das condutas de aspiração é realizado iterativamente seguindo a estrutura do fluxograma apresentado na figura 1.2.

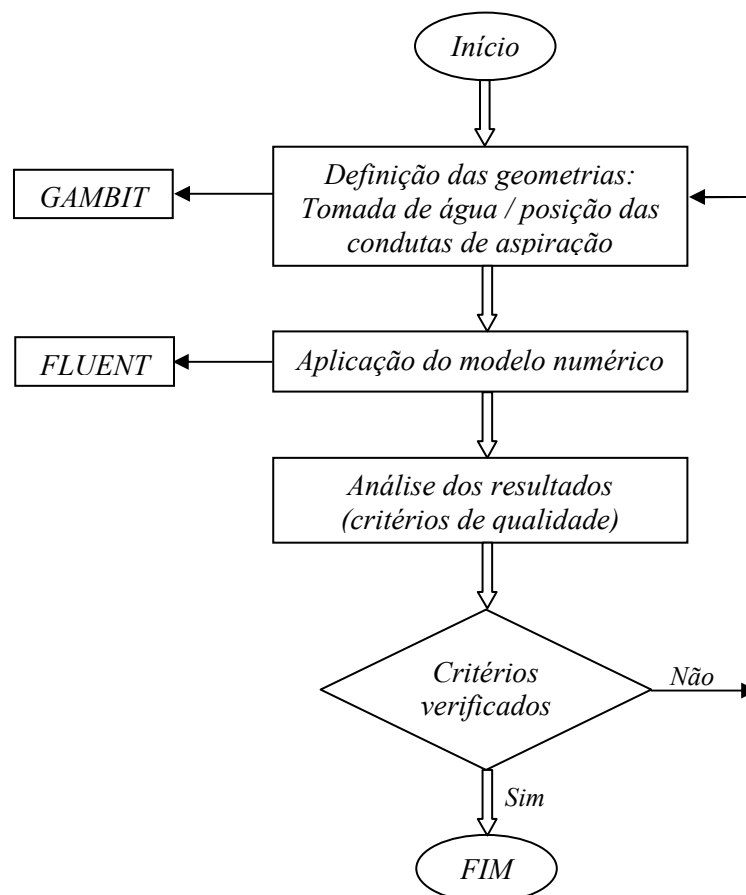


Figura 1.2 – Fluxograma desenvolvido para o dimensionamento das tomadas de água.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho encontra-se organizado em seis capítulos: Introdução, Estudo Bibliográfico, Modelação Matemática e Numérica, Validação do Modelo Numérico, Resultados Numéricos e por fim as Conclusões. A parte final compreende ainda os Anexos onde apresentam-se dados referentes à geometria da tomada de água da central do Roxo, características das bombas e a configuração da câmara de aspiração alterada.

Na **Introdução**, Capítulo 1, apresenta-se as considerações gerais, as principais motivações, objectivos e metodologias que estiveram na base do trabalho desenvolvido. É aqui também apresentada a organização do trabalho.

No Capítulo 2, é consagrado ao **Estudo Bibliográfico**, refere-se sucintamente a descrição de uma central de adução e a caracterização dos seus componentes hidráulicos. Neste âmbito, identificam-se os principais parâmetros de projecto e as principais características da simulação numérica dos escoamentos com superfície livre e do método *VoF*. Na parte final do capítulo apresentam-se estudos numéricos de tomadas de água realizados por outros autores.

No Capítulo 3, **Modelação Matemática e Numérica**, é feita uma descrição das equações *RANS*, do modelo de turbulência, dos problemas multifásicos com método *VoF*, dos esquemas numéricos utilizados e das formas de geração da geometria/malha.

No Capítulo 4, **Validação do Modelo Numérico**, são validados os parâmetros numéricos e as condições de fronteira. São apresentados os resultados bidimensionais e posteriormente tridimensionais usados na validação do modelo numérico e por fim compara-se os resultados com dados experimentais obtidos na central de adução construída pelo Instituto Hidráulica, Engenharia Rural e Ambiente integrante do sistema de Reabilitação do Aproveitamento Hidroagrícola de Roxo e propriedade da Associação dos Beneficiários do Roxo.

No Capítulo 5, **Resultados Numéricos**, é aplicado o modelo numérico validado no capítulo anterior aos domínios de cálculo desenvolvidos para os diferentes aumentos da capacidade de bombagem da central de adução do Roxo. Na parte final do capítulo são apresentados os resultados de uma nova configuração geometria da câmara de aspiração (redução do seu comprimento) concluindo-se que garante as mesmas condições de funcionamento relativamente a tomada de água pré-existente.

Finalmente, no Capítulo 6, apresenta-se as **Conclusões** que decorrem de uma análise global do trabalho realizado, as contribuições inovadoras propostas no presente trabalho e ainda as sugestões para desenvolvimentos futuros.

Capítulo 2

Estudo Bibliográfico

Neste capítulo apresenta-se o estudo bibliográfico realizado em temas que assumem especial realce no desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente faz-se uma breve descrição do funcionamento, dimensionamento e dos principais órgãos hidráulicos de uma central de adução, dedicando especial atenção às tomadas de água e à sua interação com outros componentes.

Na parte final do capítulo descreve-se a simulação numérica de escoamentos com superfície livre utilizando o método *VoF*. Por fim apresentam-se alguns estudos numéricos realizados por outros autores em tomadas de água que têm relevância para este trabalho.

2.1 Descrição sumária de uma central de adução

Para o transporte de água em condutas é necessária uma diferença de carga hidráulica entre montante e jusante. Esta diferença pode ser imposta naturalmente como é o caso de sistemas adutores gravíticos, ou através de bombas hidráulicas: sistemas adutores elevatórios. Pode também, considerar-se o caso misto de sistemas gravíticos com bombas hidráulicas para o reforço da respectiva capacidade de transporte. As centrais de adução são assim imprescindíveis para o transporte de água para o abastecimento público e/ou sistemas de irrigação.

A central de adução, representada na figura 2.1, funciona como um sistema elevatório em que as bombas transmitem carga hidráulica à água armazenada na tomada de água. O abastecimento da tomada de água da central faz-se através do canal de entrada a partir de um canal principal ou directamente de uma albufeira que eventualmente funciona como um sistema adutor gravítico. O canal principal e a albufeira não são necessariamente parte integrante do projecto da central de adução.

O comportamento hidráulico de uma central de adução provém da interacção de diversos componentes hidráulicos: tomada de água, bombas, condutas, válvulas, acessórios e sistemas de protecção, representados esquematicamente na figura 2.1. A descrição dos componentes que não têm relevância para este trabalho está bem documentada em Jones (2008) e ASTEE (2005).

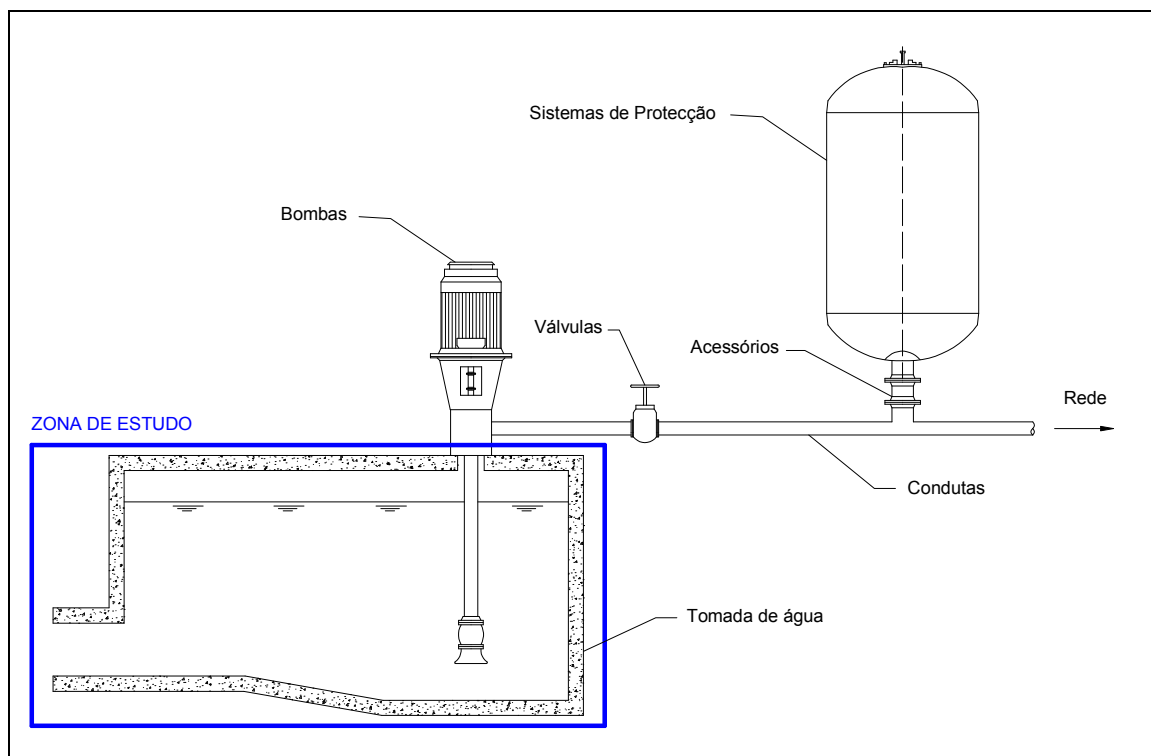


Figura 2.1 – Representação esquemática de uma central de adução.

O dimensionamento hidráulico da central inicia-se após conhecer os dados de projecto, caudal a elevar e a configuração geométrica da rede. Conhecidos estes dados pode calcular-se a curva característica da instalação que contabiliza a diferença de cotas e as perdas de carga (válvulas,

condutas e acessórios). A intercepção desta curva com curvas características das bombas permite definir um ponto de funcionamento e assim escolher a bomba ou grupo de bombas apropriado. Nesta fase de projecto apenas os regimes permanentes estão garantidos.

No entanto, é necessário minimizar os efeitos transitórios que decorrem por exemplo: de manobras com as válvulas, de arranques e paragens da instalação. Estes efeitos provocam variações de pressão que englobam forças elásticas nas condutas e no fluido, este regime transitório quando tem grande intensidade designa-se por golpe de aríete. Para atenuar estes efeitos não permanentes é possível recorrer aos reservatórios hidropneumáticos, chaminés de equilíbrio, válvulas de alívio e definir os tempos de fecho e abertura das válvulas. Embora marginal a este trabalho a descrição e dimensionamento deste tipo de sistemas é abordado na secção 2.1.4. Uma análise mais detalhada pode ser consultada em Araújo (1997), Almeida (1999) e Cardoso (2004).

2.1.1 Tomada de água

Sendo a tomada de água uma componente importante neste estudo justifica-se a sua descrição pormenorizada. A tomada de água é uma componente hidráulica, localizada na extremidade da central de adução, normalmente numa cota inferior relativamente aos outros componentes (figura 2.1). A sua função é receber e armazenar temporariamente a água proveniente do canal principal ou albufeiras através do canal de entrada e distribuí-la para as condutas de aspiração. Assim, tem também como função uniformizar e estabilizar o escoamento na direcção das condutas de aspiração.

As tomadas de água dividem-se em dois tipos, dependendo do posicionamento das condutas de aspiração: aspiração vertical e horizontal. Das configurações geométricas existentes, optou-se apenas por descrever as de aspiração vertical, pois são as utilizadas neste estudo.

Na figura 2.2 estão apresentados e identificados os principais elementos das tomadas de água: grelhas, tamisador, canal de entrada, câmara de aspiração e conduta de aspiração.

As grelhas são elementos hidromecânicos de protecção do circuito hidráulico contra a entrada de detritos de grandes dimensões que possam danificar os restantes componentes da central (válvulas, bombas, tamisadores). Apresentam-se, habitualmente, sob a forma de painéis rectangulares constituídos por um conjunto de barras com uma dada secção transversal

solidarizadas ao quadro do painel instalado a montante do canal de entrada (figura 2.2). O canal de entrada é uma estrutura que tem a finalidade de convergir o fluxo de água do canal principal para a câmara de aspiração, introduzindo o mínimo de perturbação no escoamento, por isso é normalmente de secção rectangular (Jones, 2008).

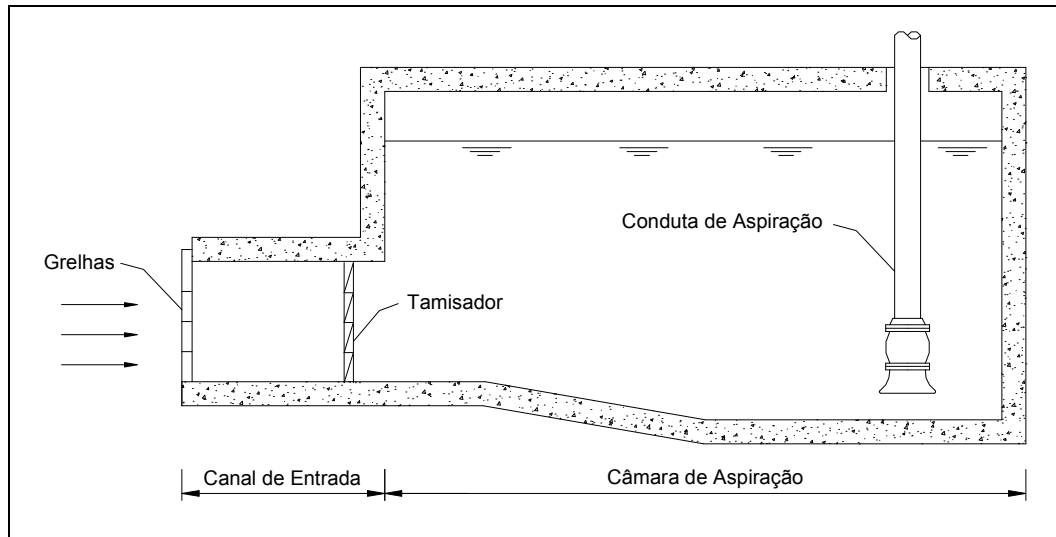


Figura 2.2 – Principais elementos de tomadas de água.

A jusante das grelhas encontra-se o tamisador, que é um dispositivo de filtro rotativo, instalado verticalmente ou com uma determinada inclinação no canal de entrada (figura 2.2). A sua função é separar os sólidos finos que passam pelas grelhas. A água chega ao filtro através da parte frontal e atravessa-o, dependendo da dimensão do filtro, os detritos flutuantes ou em suspensão são separados.

Normalmente os tamisadores, apresentados na figura 2.3, são de limpeza automática num sistema sem-fim que garante que os resíduos sejam retirados, reduzindo o risco de entupimentos na área de filtragem, que podia provocar o aumento da perda de carga entre montante e jusante do dispositivo. Esta perda de carga pode provocar a redução da altura da superfície livre a jusante do tamisador, na câmara de aspiração, diminuindo a submergência das condutas de aspiração.

As condutas de aspiração encontram-se localizadas na extremidade mais a jusante da câmara de aspiração, submersos na água, com o objectivo de convergir o escoamento para as bombas

com o mínimo perda de carga. Normalmente possuem um filtro, em forma de cesto, que retêm os detritos que passam pelos tamisadores antes de atingirem as bombas.



Figura 2.3 – Tamisadores da central de adução do Roxo.

2.1.2 Bombas

As bombas são os componentes hidráulicos responsáveis pela elevação da pressão através da troca de energia entre o rotor e a água. O rotor é accionado por motor acoplado ao veio da bomba.

Não estando no âmbito deste trabalho a descrição do funcionamento de bombas pretende-se aqui indicar como podem ser calculadas as grandezas características do funcionamento das bombas: caudal, altura de elevação, velocidade de rotação e binário do motor. Em função destas grandezas é definida a potência mecânica necessária às bombas e aos motores eléctricos. Pode-se assim estimar o consumo de energia da central de adução.

O ponto de funcionamento é definido pela intersecção da curva característica da instalação com a curva das bombas. A curva característica da instalação é representada por uma equação do tipo:

$$H = \Delta h_p + K Q^2 \quad (2.1)$$

Onde h_p é a altura piezométrica [m], K é coeficiente de resistência da rede [$m^{-5}.s^2$] e Q é o caudal volúmico bombeado [m^3/s].

Na fase de projecto a pré-escolha das bombas é feita a partir de diagramas que relacionam o caudal e a altura de projecto com os tipos de bombas existentes tentando garantir um funcionamento em condições nominais (Araújo, 1997).

Escolhidas as bombas é importante garantir que não ocorra cavitação nos regimes permanentes e que esta cavitação seja no máximo moderada nos regimes transitórios correspondentes aos arranques. De igual forma deve-se garantir que as bombas não desferrem e assim reduzir as fontes de entrada de ar nas condutas assegurando o abastecimento de água às bombas.

2.1.3 Condutas, Válvulas e Acessórios

É hábito designar as condutas de duas formas, dependendo da sua localização relativamente às bombas: condutas de compressão e de aspiração. As condutas de compressão, ficam a jusante das bombas assegurando a ligação entre os acessórios. As condutas de aspiração ficam a montante das bombas.

As válvulas são órgãos hidromecânicos fundamentais para o controlo do caudal sendo importante conhecer as características do seu comportamento normalmente a capacidade de vazão, de modificação do caudal e a ocorrência de cavitação. Em Almeida (1999) encontram-se boas indicações para a escolha do tipo de válvulas que mais se adaptam a uma dada função na central de adução, isto é, quando se pretende interromper o escoamento ou alterar o caudal. Para cada função deve ser seleccionada um tipo de válvula específico que satisfaça os requisitos do projecto.

A descrição de outros acessórios típicos deste tipo de instalação, compressor de ar necessário para os hidropneumáticos, medidor de caudal, medidor de pressão, entre outros, pode ser consultada em Jones (2008).

2.1.4 Sistemas de Protecção

Qualquer alteração nas condições de funcionamento de um sistema elevatório implica a ocorrência de regimes hidráulicos variáveis durante um intervalo de tempo (geralmente pequeno), em que ocorre a passagem do regime permanente inicial ao regime permanente final. Estes regimes hidráulicos designam-se por regimes transitórios. As eventuais variações de pressão associadas a estes regimes, obrigam a recorrer aos dispositivos de protecção. Estes dispositivos permitem atenuar os picos de pressão no interior das condutas de forma a não serem excedidos os esforços admissíveis.

A análise dos regimes transitórios deve ser sempre considerada nos projectos de centrais de adução e deverá ser feita para as operações normais e ainda para situações de emergência. As condições de emergência resultam de manobras deficientes de válvulas, entupimentos e cortes bruscos de dispositivos de protecção ou de alimentação. Actualmente o sistema de protecção contra os efeitos do regime transitório mais usado é o reservatório hidropneumático.

A modelação numérica dos regimes transitórios em centrais de adução é feita tradicionalmente utilizando programas baseados no método das características. Estes programas necessitam como dados de entrada: da celeridade da onda, da geometria e tipo das condutas e das suas características elásticas. Os acessórios, válvulas, reservatórios hidropneumáticos, chaminés de equilíbrio e bombas são introduzidos com condições de fronteira das condutas. A utilização deste tipo de programas permite conhecer os valores máximos das depressões e sobrepressões na rede e otimizar o dimensionamento dos sistemas de protecção ou as leis de fecho e abertura de válvulas.

2.2 Parâmetros de projecto de tomadas de água

Conhecido o número e o tipo de bombas, os sistemas de protecção e o diâmetro da conduta de aspiração em função do caudal máximo de projecto e da configuração geométrica da rede, as

normas permitem fazer parte do dimensionamento das tomadas de água: posicionamento das condutas e configurações geométricas das câmaras de aspiração.

As condições de entrada das condutas de aspiração são um dos aspectos importantes para o bom desempenho de uma central de adução, pois o bom funcionamento das bombas é fortemente dependente destas condições.

Condições de entrada deficientes podem ter um efeito dramático sobre as bombas provocando cavitação e vibrações e conseqüentemente frequentes e dispendiosas manutenções e ainda a diminuição do seu rendimento.

As normas AFNOR (1989) e ANSI (1998) alertam para situações que devem merecer especial atenção por parte dos projectistas:

- Má distribuição e elevadas velocidades horizontais, à entrada das condutas de aspiração, causam perda de carga significativa podendo levar a problemas de cavitação e vibrações devido aos efeitos da turbulência. Pode também diminuir significativamente o rendimento das bombas pois uma má distribuição provoca uma incorrecta direcção do escoamento sobre as pás do rotor.
- Configurações geométricas das câmaras de aspiração que possam causar geração de vórtices, recirculações e turbulência ao escoamento.
- Inadequada submergência das condutas de aspiração. Pode provocar vórtices de superfície livre e entrada de ar nas condutas. As bolhas de ar são facilmente capturadas pelas correntes sendo arrastadas para o interior das bombas, causando diminuição no rendimento e danos aos equipamentos relacionados com oxidações.
- Interferência do funcionamento entre bombas provoca vórtices submersos que reduzem a eficiência de bombagem.

Embora definindo pormenorizadamente as situações a evitar as normas não estabelecem com precisão as soluções a adoptar no caso de adequação/adaptação das tomadas de água. No entanto apontam soluções que na prática são operacionalmente válidas.

Das condições apresentadas anteriormente, as características que têm maior relevância para o dimensionamento das tomadas de água são: o posicionamento (localização e a submergência) das condutas de aspiração e a configuração geométrica das câmaras de aspiração.

2.2.1 Posicionamento das condutas de aspiração

A localização das condutas de aspiração é muito importante no funcionamento de tomadas de água, se forem colocadas muito próximas umas das outras ou do canal de entrada criam-se vorticidades que diminui a eficiência de bombagem.

Quando várias bombas são instaladas numa câmara de aspiração sem paredes divisórias, como nos casos de estudo apresentados no Capítulo 5, pode ocorrer interferência entre as bombas. Na figura 2.4 apresenta-se um vórtice submerso típico deste tipo de interferência.

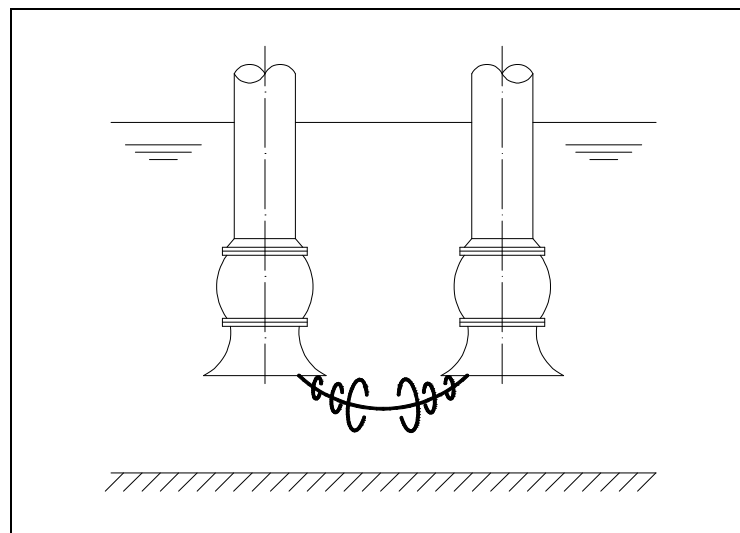


Figura 2.4 – Vórtices submersos típicos da interferência entre bombas.

A interferência entre as bombas provoca escoamentos com elevadas vorticidades o que perturba a operação das bombas. Este efeito reduz o rendimento das bombas devido à diminuição da pressão local a montante das condutas de aspiração provocada pela interferência entre o escoamento induzido por cada bomba.

Também a definição ou determinação do nível de submergência mínima das condutas de aspiração tem particular importância devido às graves consequências que uma má escolha

pode acarretar para as bombas. Uma escolha da submergência mínima insuficiente pode proporcionar, por acção da aspiração, flutuações na superfície livre da água arrastando ar ou corpos flutuantes para o interior das condutas, provocando vibrações, eventual cavitação e até pode desferrar as bombas. Segundo Jones (2008) o nível de submergência mínima, S , para uma conduta de aspiração (figura 2.5) pode ser estimado a partir da seguinte equação:

$$S = (1 + 2,3F_r)D \quad (2.2)$$

Onde D é o diâmetro da conduta de aspiração na zona de entrada [m], como representa a figura 2.5, F_r é o número de Froude dado por:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (2.3)$$

Em que V é a velocidade média do escoamento na aspiração [m/s] e g é a aceleração gravítica [m/s²].

Na figura 2.5 apresentam-se as grandezas geométricas relevantes para a determinação da submergência mínima das condutas de aspiração:

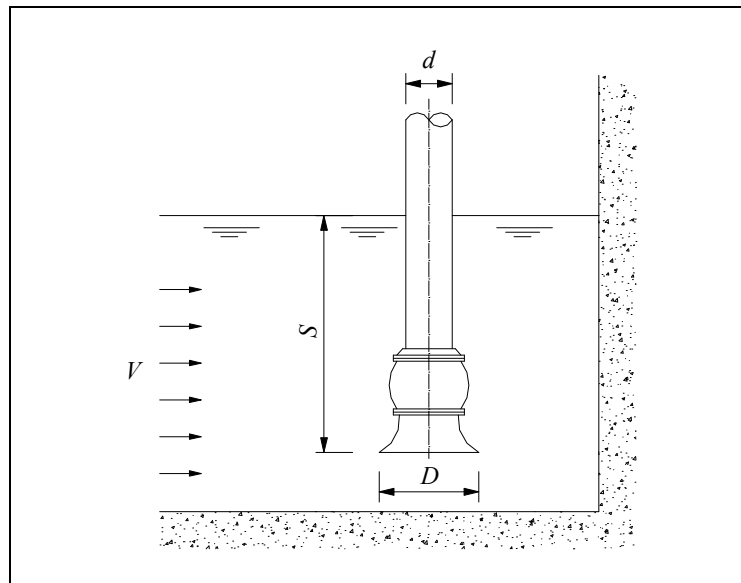


Figura 2.5 – Grandezas geométricas relevantes para a determinação da submergência mínima das condutas de aspiração.

Alguns autores apresentam recomendações (tabela 2.1) para a submergência mínima de condutas de aspiração.

Tabela 2.1 – Recomendações para a submergência mínima.

Autor	S (submergência mínima)
Gordon (1970)	$S = cV\sqrt{d}$; $c = [0,324; 0,543]$
Prosser (1977)	$S > 1,5D$
Paterson e Noble (1982)	$S = (a + bF_r)D$; $a = [1; 1,5]$ $b = [2; 2,5]$
AFNOR E44-203 (1989)	$S = 1,5D$; $F_r < 0,5$ $S = (0,5 + 2F_r)D$; $F_r > 0,5$
ANSI/HI 9.8 (1998)	$S = (1 + 2,3F_r)D$

Onde d é o diâmetro interior das condutas de aspiração [m] (figura 2.5).

As normas recomendam paredes divisórias entre as condutas de aspiração de forma a reduzir a interferência entre as bombas, mas na prática, nem sempre é a solução mais acertada, pois são de difícil modificação quando se pretende adaptar uma tomada de água previamente existente.

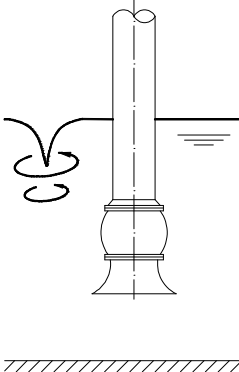
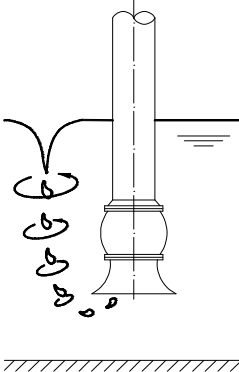
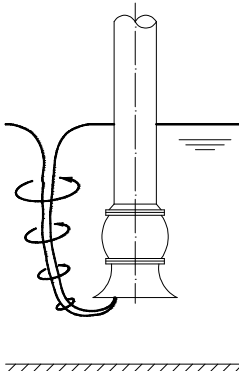
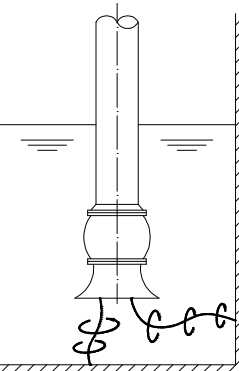
As recomendações apresentadas na tabela 2.1 não contabilizam o efeito da localização das condutas de aspiração na câmara sem paredes divisórias, sem guias de escoamento e sem dispositivos que previnem a formação de vórtices. Constata-se que há uma grande divergência entre os diversos autores em relação aos valores a serem adotados, pois apesar de numerosas pesquisas relativamente a formação de vórtices, ainda não é um tema completamente esclarecido, dada a natureza complexa do fenômeno (Tsutiya, 1995).

A norma ANSI (1998) identifica os tipos de vórtices que ocorrem mais frequentemente na vizinhança das condutas de aspiração (tabela 2.2) e que devem ser evitados no dimensionamento das tomadas de água.

Os vórtices de superfície livre e vórtices submersos (tabela 2.2) prejudicam o rendimento das bombas, e os vórtices superficiais podem causar o arrastamento do ar para dentro das

condutas de aspiração. Os vórtices submersos iniciam-se nas paredes laterais ou no fundo da câmara de aspiração, entram nas condutas, mesmo sem arrastamento do ar, reduzindo a pressão à entrada das bombas.

Tabela 2.2 – Classificação de vórtices nas condutas de aspiração.

	<p>Vórtices de superfície livre: Depressão superficial.</p>		<p>Vórtices de superfície livre: Bolhas de ar capturadas e arrastadas para a conduta de aspiração.</p>
	<p>Vórtices de superfície livre: Núcleo de ar completamente desenvolvido até a entrada da conduta de aspiração.</p>		<p>Vórtices submersos.</p>

Actualmente graças a evolução dos sistemas de cálculo e dos métodos numéricos é possível simular computacionalmente a formação de vórtices nas condutas de aspiração, permitindo ao projectista prever e prevenir esta situação.

2.3 Simulação numérica de escoamentos com superfície livre

A simulação numérica de escoamentos com superfície livre apresenta maior complexidade que a simulação de escoamentos internos e externos. Este domínio da *CFD* conheceu especiais desenvolvimentos nos últimos trinta anos. Relativamente aos escoamentos interiores

e exteriores o escoamento com superfície livre apresenta dificuldades adicionais pois a superfície livre tem de ser modelada.

Os primeiros métodos numéricos desenvolvidos aplicavam-se apenas a fluidos perfeitos e são baseados na teoria potencial. Com o aumento do potencial computacional e com o desenvolvimento de técnicas numéricas passou a ser possível simular escoamentos viscosos com superfície livre a partir da resolução das equações fundamentais (conservação de massa e o balanço da quantidade de movimento). Desenvolveram-se então dois métodos específicos de identificação da superfície livre: o método *FTI* (*Front Tracking Interface*) e o *FCI* (*Front Capturing Interface*).

No método *FTI*, a superfície livre é uma fronteira do domínio de cálculo na qual são aplicadas as condições cinemática e dinâmica. Geralmente, este método permite obter resultados precisos, e está muito desenvolvido. A limitação principal desta técnica está ligada à impossibilidade de representar grandes deformações da superfície livre que aparece em muitos dos escoamentos reais (como é o caso de rebentação das ondas marítimas).

O método *FCI* tem como objectivo resolver configurações de superfície livre com topologias complexas. Esta técnica permite obter com boa precisão a evolução da superfície livre através da fracção de volume. Neste método, a superfície livre não é uma fronteira do domínio, sendo representada através dum marcador ligado à própria superfície livre ou um indicador de presença variando no domínio de cálculo. Nesta técnica, as características locais do fluido são determinadas através deste indicador, e a convecção desta variável permite localizar a superfície livre, ou a interface, entre os fluidos. Este indicador é definido em todo o domínio de cálculo, apresentando-se variação apenas nas zonas onde se localiza a interface ar/água, sendo a posição da superfície livre identificada por um iso-valor do próprio indicador, normalmente é usado o seu valor médio (ver Capítulo 3).

2.4 Simulação numérica de tomadas de água

O escoamento na vizinhança das condutas de aspiração é complexo. Este escoamento é viscoso, geralmente turbulento e com superfície livre podendo, inclusivamente, apresentar zonas multifásicas devido ao arrastamento de ar.

Grande parte dos estudos numéricos realizados em tomadas de água corresponde a configurações geométricas simples: uma única conduta de aspiração, domínio de cálculo pouco complexo e condições de fronteira simplificadas. Não obstante, estes estudos permitem a análise e previsão do comportamento do escoamento, como por exemplo: a formação de vórtices, pré-rotação e entrada de ar para o interior das bombas, deformação da superfície livre, campos de velocidade, de vorticidade e de pressão.

As simulações numéricas permitem, com custo comparativamente reduzido, prescindir de ensaios experimentais. No entanto os modelos, antes de serem utilizados em projectos, devem ser calibrados e validados usando dados experimentais.

Analogamente às outras áreas de estudo de escoamento com superfície livre (ondas marítimas, escoamentos em canal aberto) nos primeiros estudos numéricos do escoamento na câmara de aspiração utilizaram modelos muito simplificados: fluido não viscoso e escoamento potencial.

Cronologicamente os estudos do escoamento em câmaras de aspiração envolvendo fluidos viscosos com superfície livre iniciaram-se na última década do século XX. Constantinescu & Patel (1998) utilizaram uma geometria simples composta por uma conduta submersa numa câmara de aspiração rectangular. Esta simulação foi feita para números de Reynolds moderados e assumiu-se que a superfície livre não se deforma. Tais hipóteses permitiram o uso de uma condição de fronteira de pressão na superfície livre para calcular os campos de velocidade e as linhas de corrente no interior da câmara. O modelo foi comparado com dados experimentais obtidos por Rajendran & Patel (1999). Estes estudos não contemplaram situações como por exemplo: a formação de vórtices de superfície, a submergência deficiente e a entrada de ar no interior das condutas. O estudo foi realizado para um número de Froude baixo e para emersão da conduta de aspiração elevada. Não obstante, estes autores concluíram que os seus resultados experimentais e numéricos são muito dependentes da localização da conduta e da geometria da câmara de aspiração.

Um algoritmo de pressão com superfície livre que permite a análise do escoamento bidimensional na aspiração horizontal foi apresentado por Montazerin et al (2001). Este método numérico baseia-se em volumes finitos para resolver as equações *RANS* com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão. Estes modelos de turbulência (*Spalart-Allmaras*, $k-\varepsilon$, $k-\omega$) foram adaptados por Rodi (1980) e são utilizados para simular problemas com superfície livre na vizinhança das condutas de aspiração. Este modelo foi validado para uma

gama bem determinada do número de Froude utilizando dados experimentais resultantes de ensaios em que eram introduzidos no escoamento vórtices de forma aleatória.

Montazerin et al (2001) desenvolvem um modelo numérico tridimensional e aplicaram-no a uma entrada assimétrica horizontal. Este modelo permite estudar a influência do posicionamento das condutas e das dimensões da câmara de aspiração na formação de vórtices de superfície livre. Neste trabalho introduziu-se uma importante inovação, o escoamento é tridimensional e assume uma condição assimétrica à entrada do domínio de cálculo.

O estudo tridimensional da aspiração vertical foi realizado posteriormente por Marghzar et al (2002) com o objectivo de analisar o comportamento do escoamento, as características da turbulência e as condições críticas no posicionamento das condutas de aspiração. Este estudo foi validado com dados experimentais. Os autores concluíram sobre os valores da submergência mínima de uma conduta na câmara de aspiração.

Wicklein et al (2006) apresentam um caso de optimização da submergência e do número de condutas localizadas longitudinais numa câmara de aspiração rectangular, contabilizando a rotação à entrada dessas condutas. Este estudo foi feito com auxílio do programa *STAR-CD* para resolução das equações *RANS* com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão utilizando um esquema de segunda ordem. Este estudo não foi validado experimentalmente mas aparentemente apresenta resultados coerentes.

O estudo desenvolvido na tese de doutoramento de Issa (2009) a superfície foi modelada com uma condição de simetria, inviabilizando assim a determinação da sua deformada. No entanto este estudo apresenta-se resultados interessantes das linhas de corrente e do campo de vorticidade junto às condutas de aspiração. As simulações numéricas foram realizadas com auxílio do programa *FLUENT* para resolução das equações *RANS* com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ padrão utilizando um esquema de segunda ordem. Este estudo foi validado experimentalmente a partir de tomadas de pressão distribuídas radialmente na conduta.

Um estudo semelhante é desenvolvido neste trabalho, com o programa *FLUENT*, considerando-se diversos posicionamentos (longitudinalmente e/ou transversalmente) das condutas de aspiração relativamente ao escoamento.

Capítulo 3

Modelação Matemática e Numérica

Neste trabalho a modelação numérica é feita utilizando o programa *FLUENT*. Este programa permite resolver numericamente as equações *RANS* utilizando o método *VoF* na modelação da superfície livre. O *FLUENT* permite importar a malha, gerada com o programa *GAMBIT*, e definir as condições de fronteira, as propriedades dos fluidos, os esquemas numéricos e os respectivos parâmetros.

Neste capítulo apresentam-se os modelos matemáticos correspondentes às equações de Navier-Stokes, às equações *RANS* e aos modelos de turbulência. Seguidamente descreve-se o método *VoF* utilizado na modelação da superfície livre.

Na parte final deste capítulo faz-se uma breve referência sobre os esquemas numéricos e o modelo de turbulência utilizado no presente trabalho.

3.1 Equações de Navier-Stokes

Do ponto de vista analítico o escoamento de um fluido viscoso (newtoniano) é descrito pelas equações de Navier-Stokes que traduzem a conservação da massa e o balanço da quantidade de movimento. Estas equações são diferenciais e fortemente não lineares, e estabelecem relações entre as taxas de variação das variáveis, campo de velocidade, pressão, tensões e massa volúmica. Podem ser escritas da seguinte forma em coordenadas cartesianas e em notação índicial:

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.2)$$

Onde ρ é a massa volúmica do fluido [kg/m^3], x_i ($i=1,2,3$) são as componentes das coordenadas cartesianas [m], u_i ($i=1,2,3$) são as componentes da velocidade [m/s], t é o tempo [s] e p é a pressão [Pa].

A equação (3.2) traduz o equilíbrio das forças que actuam sobre uma partícula de fluido, onde o componente τ_{ij} é um tensor. Para o fluido newtoniano, em que a tensão é proporcional à taxa de deformação do elemento do fluido, é dado por:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.3)$$

Em que μ é a viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s].

As equações (3.1) e (3.2) na hipótese de fluido incompressível (massa volúmica constante) escrevem-se da seguinte forma:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.4)$$

$$\rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) \right] = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3.5)$$

A relação entre o termo inercial e viscoso da equação (3.2) é caracterizada pelo número de Reynolds. A complexidade matemática das equações de Navier-Stokes impede a obtenção de uma solução analítica geral nomeadamente para escoamento com número de Reynolds muito elevado e consequentemente turbulento. A forma corrente de ultrapassar esta dificuldade é apresentada na secção seguinte, e consiste em escrever as equações de Navier-Stokes considerando a velocidade como a soma do seu valor médio e da sua flutuação, variável no tempo e no espaço. Obtêm-se assim as equações *RANS* (Ferziger & Peric, 1999). Ao sistema

de equações *RANS* é adicionado um modelo de turbulência para fechar este sistema de equações.

3.2 Equações *RANS*

Os escoamentos turbulentos são caracterizados por flutuações do campo de velocidade que potenciam a capacidade de mistura do escoamento. Estas flutuações podem ser de pequena escala e de alta frequência, sendo assim necessária elevada capacidade computacional para simular este tipo de escoamentos, através da sua simulação directa (simulações sem modelo de turbulência e malhas muito finas).

A forma corrente de diminuir as necessidades computacionais obriga a introdução de modelos de turbulência que permitem simular estatisticamente os efeitos de pequena escala evitando a utilização de malhas muito finas (Versteeg & Malalasekera, 1995).

Devido ao facto de a generalidade dos escoamentos envolverem processos turbulentos estacionários (as propriedades estatísticas das variáveis não variam com o tempo) e não homogéneos (as propriedades estatísticas variam no espaço), a média temporal é apropriada para o procedimento da média de Reynolds.

A variável velocidade instantânea, $u_i(x_i, t)$, pode ser expressa da seguinte forma:

$$u_i(x_i, t) = \overline{u_i}(x_i) + u'_i(x_i, t) \quad (3.6)$$

Onde $\overline{u_i}$ ($i=1,2,3$) são as componentes da velocidade média [m/s] e u'_i ($i=1,2,3$) as suas flutuações [m/s].

A velocidade média temporal ou simplesmente velocidade média é definida por:

$$\overline{u_i}(x_i) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_i dt \quad (3.7)$$

As equações *RANS* em escoamento turbulento são obtidas aplicando os operadores médios nas correspondentes equações instantâneas de Navier-Stokes, sendo escritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (3.9)$$

É de realçar que nas equações (3.8) e (3.9) foram suprimidas as notações que indicam a média para a velocidade e a pressão por questões de escrita, tornando-se assim as suas representações menos complexas.

A descrição e dedução das equações (3.8) e (3.9) podem ser consultada em Versteeg & Malalasekera (1995) e Blazek (2001).

Define-se o tensor de Reynolds como sendo:

$$R_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} \quad (3.10)$$

Este tensor representa o efeito das flutuações da velocidade no campo médio de velocidade. Precisa ser modelado para poder fechar o sistema de equações. A simulação numérica de problemas práticos de engenharia necessita da modelação deste tensor o que é feito geralmente em função das propriedades médias do escoamento.

Neste contexto, utiliza-se uma aproximação (proposta por Boussinesq (1877)) para o tensor das tensões de Reynolds. Este é definido como sendo proporcional ao tensor médio das deformações somado à contribuição média da energia cinética devido ao escoamento turbulento. A constante de proporcionalidade é conhecida como viscosidade dinâmica turbulenta, μ_t . Das hipóteses de Boussinesq derivam as seguintes equações:

$$R_{ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.11)$$

Onde δ_{ij} é o delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$ se $i = j$ e $\delta_{ij} = 0$ se $i \neq j$) e k representa a energia cinética turbulenta, expressa por:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i{}^2} \quad (3.12)$$

Os modelos que usam as hipóteses de Boussinesq são conhecidos como modelos baseados na viscosidade dinâmica turbulenta. A vantagem desta abordagem está no reduzido tempo de cálculo computacional associado a determinação da viscosidade turbulenta, que pode ser estimada através de modelos de uma equação (Spalart & Allmaras, 1994) ou modelos de duas equações (modelo $k-\varepsilon$ e $k-\omega$). Estes modelos requerem malhas menos finas comparativamente aos modelos *DNS* (*Direct Numerical Simulation*). Do modelo de duas equações $k-\varepsilon$, proposto por Launder & Spalding (1974), derivam duas equações adicionais de transporte (k – para a energia cinética turbulenta e ε – para a taxa de dissipação turbulenta). A viscosidade dinâmica turbulenta é calculada admitindo uma relação entre k e ε , como apresenta a equação (3.16). Este modelo baseia-se sobre a teoria de comprimento da mistura, proposta por Prandtl (1925), segundo a qual a viscosidade cinemática turbulenta, ν_t , pode ser formulada em função de uma escala de comprimento, l_m , e outra para a velocidade, v , da turbulência:

$$\nu_t = \varphi(l_m, v) \quad (3.13)$$

3.2.1 Modelo de turbulência $k-\varepsilon$

O modelo $k-\varepsilon$ é um dos mais utilizados em simulação de problemas típicos de engenharia, devido à sua robustez, economia e precisão satisfatória na simulação de escoamentos turbulentos. Neste modelo, recorrendo à análise adimensional, os parâmetros para a definição das escalas de velocidade e comprimento são dados por:

$$v = k^{1/2} \quad (3.14)$$

$$l_m = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (3.15)$$

A viscosidade dinâmica turbulenta é calculada, substituindo as equações (3.14) e (3.15) em (3.13), e admitindo uma constante adimensional de proporcionalidade, C_μ :

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.16)$$

Onde C_μ é a constante de proporcionalidade para a viscosidade dinâmica turbulenta.

As equações de transporte da energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação para um fluido incompressível são expressas:

$$\rho \left[\frac{\partial}{\partial t} (k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (k u_i) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3.17)$$

$$\rho \left[\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon u_i) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) \quad (3.18)$$

Onde G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade, G_b é a geração de energia cinética turbulenta devido às flutuações, $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$ são constantes, σ_k e σ_ε são os números de Prandtl para k e ε respectivamente.

A geração de energia cinética turbulenta devido aos gradientes de velocidade calcula-se através da equação exacta para o transporte de k que pode ser definido como:

$$G_k = R_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3.19)$$

As cinco constantes de ajuste do modelo $k-\varepsilon$ padrão, apresentadas na tabela 3.1, têm por defeito os seguintes valores na versão do *FLUENT* utilizada.

Tabela 3.1 – Valores das constantes do modelo $k-\varepsilon$ padrão.

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1,44	1,92	0,09	1,0	1,3

Os valores destas constantes (tabela 3.1), usados neste trabalho, foram determinados a partir de experiências com ar e água para escoamentos turbulentos por Launder & Spalding (1974).

No entanto, podem ser ajustados consoante o caso de estudo em que o modelo é aplicado, mas não é o caso do presente estudo, onde as constantes da tabela 3.1 são utilizadas.

A descrição completa do modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão, bem como das diversas constantes empíricas, determinadas com base experimental, pode ser encontrada em Versteeg & Malalasekera (1995) e Blazek (2001).

O sistema de equações apresentado anteriormente é válido para escoamentos monofásicos. No entanto, para escoamentos multifásicos é necessário desenvolver técnicas para a resolução destas equações nos fluidos, com objectivo de definir a interface entre eles.

3.3 Método *VoF*

O escoamento com superfície livre representa um caso particular de um escoamento multifásico. A identificação da interface dos fluidos é feita considerando que o volume de uma fase não pode ser ocupado por outras fases. É assim introduzido o conceito de fracção de volume (Hirt & Nichols 1981). Neste trabalho, é utilizado o método *VoF*, que usa uma técnica de captura de superfície livre aplicada a uma malha fixa, em que uma equação de transporte (equação (3.20)) é usada para determinar a fracção do volume relativa às duas fases, em cada elemento da malha do domínio de cálculo.

Define-se a fracção de volume, C , como sendo um escalar que representa a taxa de presença de um fluido no domínio de cálculo (Ubbink & Issa, 1999). O valor $C = 1$ caracteriza um volume onde há unicamente a água, o valor $C = 0$ indica o volume que contém apenas ar. O valor médio $C = 0,5$ é usado para identificar a posição da superfície livre (figura 3.1).

A equação de transporte da fracção de volume escreve-se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.20)$$

A figura 3.1 apresenta a repartição da fracção de volume usada na identificação da superfície livre pelo método *VoF*.

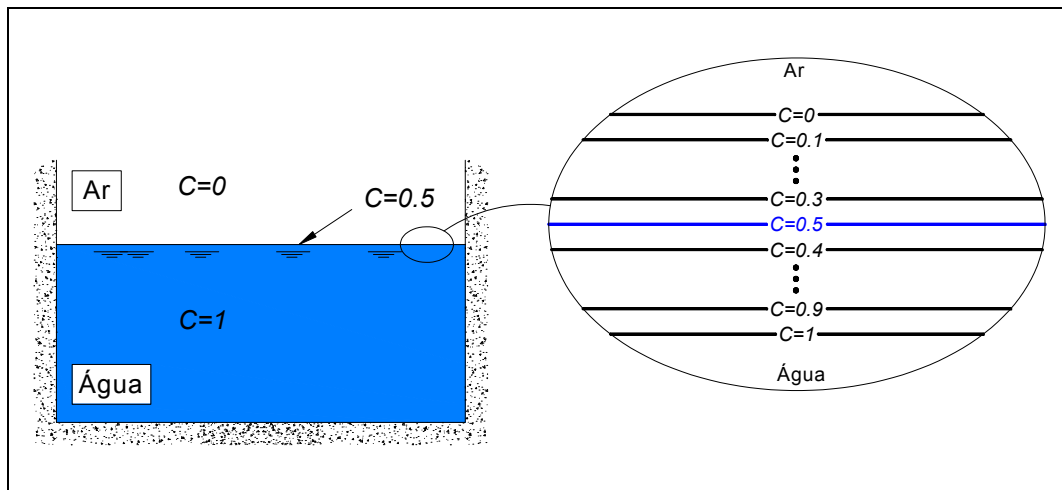


Figura 3.1 – Repartição da fracção de volume numa tomada de água (pormenor da zona de identificação da posição da superfície livre).

O método *VoF* não calcula explicitamente a posição da superfície livre entre os fluidos. Esta é determinada como uma descrição do campo de fracção de volume. Na prática a superfície livre é detectada numa região situada na interface entre os dois fluidos onde a fracção de volume evolui entre 0 e 1 (figura 3.1).

As propriedades físicas na zona de transição entre os dois fluidos são calculadas como médias ponderadas com base nesta fracção. A massa volúmica e a viscosidade são, portanto, calculadas da seguinte forma:

$$\rho = C\rho_{\text{água}} + (1 - C)\rho_{\text{ar}} \quad (3.21)$$

$$\mu = C\mu_{\text{água}} + (1 - C)\mu_{\text{ar}} \quad (3.22)$$

Detalhes sobre o algoritmo de modelação numérica de problemas com superfície livre podem ser encontrados em Ubbink & Issa (1999).

3.4 Geração da malha

A geração da malha assume importância decisiva na qualidade das simulações numéricas frequentemente obriga a trabalhos morosos por parte dos utilizadores. Adicionalmente, os

códigos *CFD* são mais robustos e eficientes quando usam uma malha bem construída. Há cuidados básicos a respeitar na construção da malha: adequado número de elementos para o caso a estudar, as dimensões dos elementos nomeadamente o rácio entre comprimento e largura. O estiramento da dimensão dos elementos da malha deve ser progressivo.

Para além do anteriormente citado, a discretização deve ser adequada à intensidade da variação das propriedades dos escoamentos (gradiente de velocidade, de pressão e de fracção de volume). Com estes factores como guias para a construção da malha pretende-se ainda evitar sobrecarregar os recursos computacionais para a resolução.

Neste trabalho, a geração da malha é feita pelo programa *GAMBIT* (versão 2.2.30). Actualmente, este programa tem disponíveis os métodos de malha estruturada e não-estruturada.

O método de malha estruturada possui este nome devido ao facto de a malha ser disposta num padrão regular e repetido. Este tipo de malha utiliza elementos quadriláteros em 2D e elementos hexaedros em 3D. A utilização da malha estruturada possibilita um bom controlo na sua construção, bem como um maior nível de precisão dos esquemas numéricos.

O método de malha não-estruturada utiliza uma colecção arbitrária de elementos para preencher o domínio de cálculo e o arranjo dos elementos não tem nenhum padrão fixo. Este tipo de malhas utiliza triângulos, quadriláteros em 2D e tetraedros, hexaedros e prismas em 3D. O uso da malha não-estruturada permite gerar malhas em torno de geometrias complexas.

Não obstante, a maior versatilidade de adaptação da malha não-estruturada no domínio de cálculo, utiliza-se neste trabalho a malha estruturada. A adaptação da malha estruturada ao domínio de cálculo é feita introduzindo deformações aos elementos que se mantêm quadriláteros mas perdem a ortogonalidade conforme o manual do *FLUENT* (*FLUENT 6.3 User's Guide*, 2008).

Finalizada a geração de malha, o *GAMBIT* permite indicar as condições de fronteira (condições de velocidade, condições de pressão, de caudal mássico, de parede, etc.) e também verificar a qualidade da mesma através da análise de alguns parâmetros geométricos.

3.5 Esquema numérico e modelo de turbulência

O programa *FLUENT* (versão 6.3.26), utilizado neste trabalho, permite escolher o algoritmo para o acoplamento entre a pressão e a velocidade (*Pressure-Velocity Coupling*).

Neste estudo o algoritmo utilizado para o acoplamento é o *SIMPLEC* (*SIMPLE Consistent*). Este baseia-se numa relação que permite corrigir a pressão a cada nova iteração de velocidade. O algoritmo *SIMPLEC* tem uma estrutura similar ao *SIMPLE* (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*), diferindo apenas na expressão da correcção da pressão e apresenta resultados mais precisos.

Convém referir também que os esquemas numéricos discretos usados: a interpolação da pressão é feita pelo algoritmo *PRESTO* (*PREssure STaggering Option*), visto ser o esquema aconselhado no manual do *FLUENT* para modelação de escoamentos com superfície livre (*FLUENT 6.3 User's Guide*, 2008); o termo convectivo das equações de Navier-Stokes é modelado pelo esquema *Third Order MUSCL* (*Monotonic Upstream Scheme for Conservation Laws*), que permite obter melhores resultados em comparação com a utilização, por exemplo, do esquema *UDS* (*User Defined Scalar*) de 1ª ordem. No entanto, o esquema *MUSCL* degenera em esquema *Upwind* de segunda ordem para as malhas não-estruturadas.

Para evitar a difusão numérica, devido ao uso do método *VoF implicit*, o manual do *FLUENT* aconselha a utilização do esquema *Modified HRIC* (*High Resolution Interface Capturing*) para o termo de convecção da equação de transporte da fracção de volume. Este é uma mistura de esquemas que dependendo da variação local da fracção de volume, utiliza o mais indicado.

Pela sua ampla aplicação e aceitação, a modelação da turbulência é realizada através do modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão. Tratando-se de um modelo baseado no conceito de viscosidade turbulenta, assume-se que as correlações desconhecidas são proporcionais aos gradientes espaciais das equações. Nota-se que a viscosidade turbulenta não é uma propriedade do fluido, mas depende do estado de turbulência em que o fluido em estudo se encontra. A discretização dos parâmetros k e ε é feita usando o *Second Order Upwind*, pois apresenta menor difusividade relativamente ao esquema de 1ª ordem.

Os parâmetros numéricos utilizados podem ser apresentados resumidamente, conforme se indica na seguinte tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resumo dos parâmetros numéricos.

Modelo multifásico	<i>VoF</i>
Tempo	<i>Unsteady</i> <i>Second Order Implicit</i>
Modelo de Turbulência	<i>k - ε</i>
Algoritmo de acoplamento entre a pressão e a velocidade	<i>SIMPLEC</i>
Pressão	<i>PRESTO</i>
Quantidade de movimento	<i>Third Order MUSCL</i>
Fracção de volume	<i>Modified HRIC</i>
<i>k</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>ε</i>	<i>Second Order Upwind</i>

Os parâmetros numéricos adoptados neste trabalho (tabela 3.2) já foram amplamente utilizados no DEMI/FCT em estudos de escoamento com superfície livre, como é o caso de estudos de aproveitamento da energia das ondas desenvolvidas por Barreiro (2009) e Conde & Didier (2009). Estes estudos apresentaram bons resultados ao nível da superfície livre.

3.5.1 Condições de fronteira

As condições de fronteiras podem ser seleccionadas nos menus do *FLUENT*. No entanto, nem todas as situações físicas estão contempladas. O utilizador pode definir condições de

fronteiras através de um programa externo (*UDF – User Defined Functions*) escrito na linguagem de programação C, com mistura de linguagem próprio ao *FLUENT*.

As condições de fronteira relativas à entrada e saída de fluido, bem como, a especificação das leis de parede para a simulação do escoamento na proximidade de paredes sólidas estão desenvolvidas para o *FLUENT*.

No capítulo seguinte será dada especial atenção à escolha das condições de fronteira adequadas ao estudo efectuado neste trabalho. Nesta secção pretende-se apenas dar uma indicação das condições de fronteira utilizadas: na fronteira de saída do domínio de cálculo adoptou-se a condição de velocidade (*Velocity Inlet*); na fronteira de entrada da água na câmara de aspiração assume-se a condição de caudal mássico (*Mass Flow Inlet*); nas superfícies sólidas impõe-se condição de “parede com aderência” (*Wall*); na zona onde existe ar impõe-se a condição de pressão constante (*Pressure Outlet*). Estas condições de fronteira são usadas no estudo bidimensional e tridimensional. No entanto, no estudo tridimensional introduz-se uma nova condição de fronteira de simetria (*symmetry*) de forma a reduzir a dimensão do domínio e consequentemente o tempo de cálculo.

A descrição numérica destas condições de fronteira pode ser encontrada no *FLUENT User’s Guide* (2008).

Capítulo 4

Validação do Modelo Numérico

A validação do modelo numérico é feita de forma sequencial, em três fases de complexidade crescente:

- i) Simulação numérica em 2D – determina-se a discretização temporal e espacial de modo a reduzir o tempo de cálculo, mas garantindo a precisão dos resultados. Na parte final desta fase justifica-se a escolha das condições de fronteira.
- ii) Simulação numérica em 3D – aplicam-se as conclusões obtidas em 2D e volta-se a testar as condições de fronteira.
- iii) Comparam-se os resultados numéricos com dados experimentais.

4.1 Simulação numérica em 2D

A fase inicial da validação, simulação numérica bidimensional, tem por objectivo definir parâmetros numéricos que possam ter aplicações no problema tridimensional.

O estudo do modelo bidimensional é importante pois utiliza uma geometria simples e permite obter resultados rápidos possibilitando testar a discretização temporal, espacial e a escolha das condições de fronteira. Este estudo também permite analisar a sensibilidade do modelo numérico quando há alteração de alguns parâmetros com tempo de cálculo moderado relativamente ao modelo tridimensional.

As simulações numéricas para as diferentes discretizações são realizadas utilizando os esquemas, modelos e parâmetros numéricos apresentados no Capítulo 3 (tabela 3.2). Nas simulações que se seguem utilizaram-se os seguintes factores de sub-relaxação: 1 para a pressão, momento, fracção de volume, densidade, viscosidade turbulenta e 0,8 para a energia cinética de turbulência e dissipação turbulenta. Estes factores de sub-relaxação são necessários para controlar a variação dos escalares usados pelos esquemas numéricos na resolução das equações.

Considera-se que as simulações numéricas atingem a convergência exigida durante o processo iterativo quando os resíduos estabilizam, atingindo patamares correspondentes aos resíduos mínimos para cada uma das variáveis (componentes da velocidade, fracção de volume, conservação de massa, energia cinética de turbulência e dissipação turbulenta).

A geometria bidimensional simulada neste estudo (figura 4.1) é constituída a partir do plano de corte longitudinal ao escoamento na tomada de água (Anexo B.2), com 30,775 m de comprimento e 7,05 m de altura. A conduta de aspiração posiciona-se mais a jusante do canal de entrada com o correspondente eixo distanciado perpendicularmente de 0,6 m da parede lateral. A entrada da conduta encontra-se à 0,7 m do fundo da câmara de aspiração, com uma submergência de 3,3 m.

Definida a configuração geométrica do domínio de cálculo, impõem-se as condições de fronteira (figura 4.1). Estas condições de fronteira são oferecidas nos menus do *FLUENT* e devem ser escolhidas de forma a ter correspondência física com o problema concreto. Neste estudo optou-se pelas seguintes condições de fronteira:

- **Saída** – na saída do domínio de cálculo, correspondente à saída da conduta de aspiração, impõe-se uma condição de velocidade média, assumindo o perfil de velocidade uniforme nesta fronteira.
- **Entrada** – na entrada do canal é imposta a condição de conservação de massa. Desta forma fixa-se o caudal mássico, nesta fronteira, deixando o perfil de velocidade livre.
- **Parede, fundo e condutas de aspiração** – nas fronteiras destas superfícies sólidas da tomada de água e das condutas impõem-se uma condição “parede com aderência padrão” correspondente a velocidades tangenciais e normais nulas.

- **Secção superior da zona aberta da tomada de água** – na zona onde existe ar impõe-se uma condição de pressão atmosférica constante. Nesta secção é ainda permitido que o ar saia ou entre no domínio de cálculo de modo a manter a pressão constante.

A figura 4.1 apresenta o domínio de cálculo bidimensional e resume as condições de fronteira escolhidas.

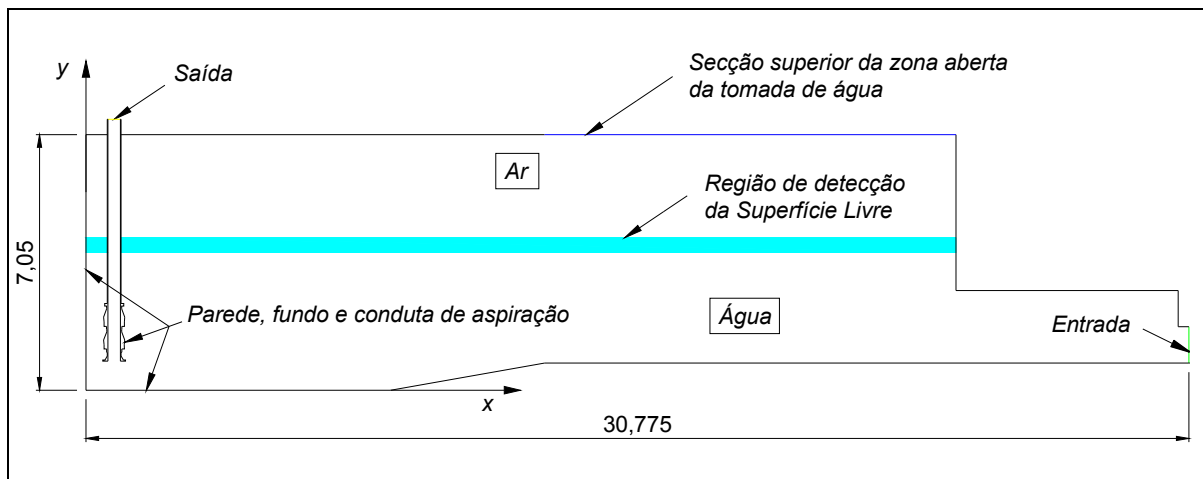


Figura 4.1 – Domínio de cálculo bidimensional e condições de fronteira.

No domínio de cálculo (figura 4.1) identifica-se ainda a região onde a superfície livre pode evoluir, justifica-se identificar esta região pois é onde se pretende adaptar a malha de modo a obter maior precisão reduzindo a difusão da fracção de volume na superfície livre através do método *VoF*.

4.1.1 Discretização temporal

Para simular numericamente o problema é necessário escolher o passo de tempo e o número de iterações não lineares. Estes parâmetros são importantes, pois estão intimamente ligados à precisão dos resultados da simulação numérica e ao tempo de cálculo. O uso de valores inadequados pode provocar perda de informação bem como a não convergência residual das componentes da velocidade, fracção de volume, energia cinética turbulenta, dissipação turbulenta ou conservação da massa. Desta forma é necessário testar os passos de tempo e

escolher o número de iterações não lineares adequado para este estudo. Com este objectivo efectua-se algumas simulações numéricas variando o passo de tempo e mantendo o número de iterações não lineares comparando os resultados.

Nesta fase, as simulações numéricas foram realizadas com uma malha exageradamente refinada e uniforme, com o mínimo de distorção possível, de modo a garantir que os resultados não sejam dependentes da malha, de forma a analisar apenas a influência da discretização temporal nos resultados.

Os resultados numéricos do escoamento no interior da câmara de aspiração são analisados em todo o domínio de cálculo mas dedica-se especial atenção à forma da superfície livre, pois é onde existe uma maior difusão numérica devido à aplicação do método *VoF*. Nesta zona do domínio de cálculo existe uma grande dependência dos resultados com os parâmetros numéricos.

Decidiu-se então efectuar simulações numéricas de curta duração e comparar para os mesmos instantes os resultados. Estes resultados não têm significado físico relevante pois correspondem ao “transitório numérico” entre o início das simulações e o regime permanente. Não obstante para comparar os resultados para cada passo de tempo são mais importantes as suas diferenças do que a própria forma da superfície livre. As simulações numéricas de curta duração permitiram tirar conclusões importantes no que diz respeito ao passo de tempo e ao número de iterações não lineares.

Devido ao facto da deformação da superfície livre ser muito pequena relativamente ao comprimento do domínio de cálculo, optou-se na figura 4.2 em ampliar a escala vertical. Deste modo é possível comparar as diferenças entre as várias formas da superfície livre para cada passo de tempo adoptado.

Na figura 4.2 apresentam-se a superfície livre em três instantes apenas do lado direito da conduta de aspiração pois não existem variações significativas no lado esquerdo.

Da observação da figura 4.2 verifica-se que existe uma ligeira diferença na forma da superfície livre. Esta diferença torna-se mais significativa principalmente quando o passo de tempo aumenta. No entanto, a diferença verificada, é muito inferior à 1% entre os dois casos extremos (0,001 s e 0,05 s). Na figura 4.2 nota-se ainda a sobreposição das curvas.

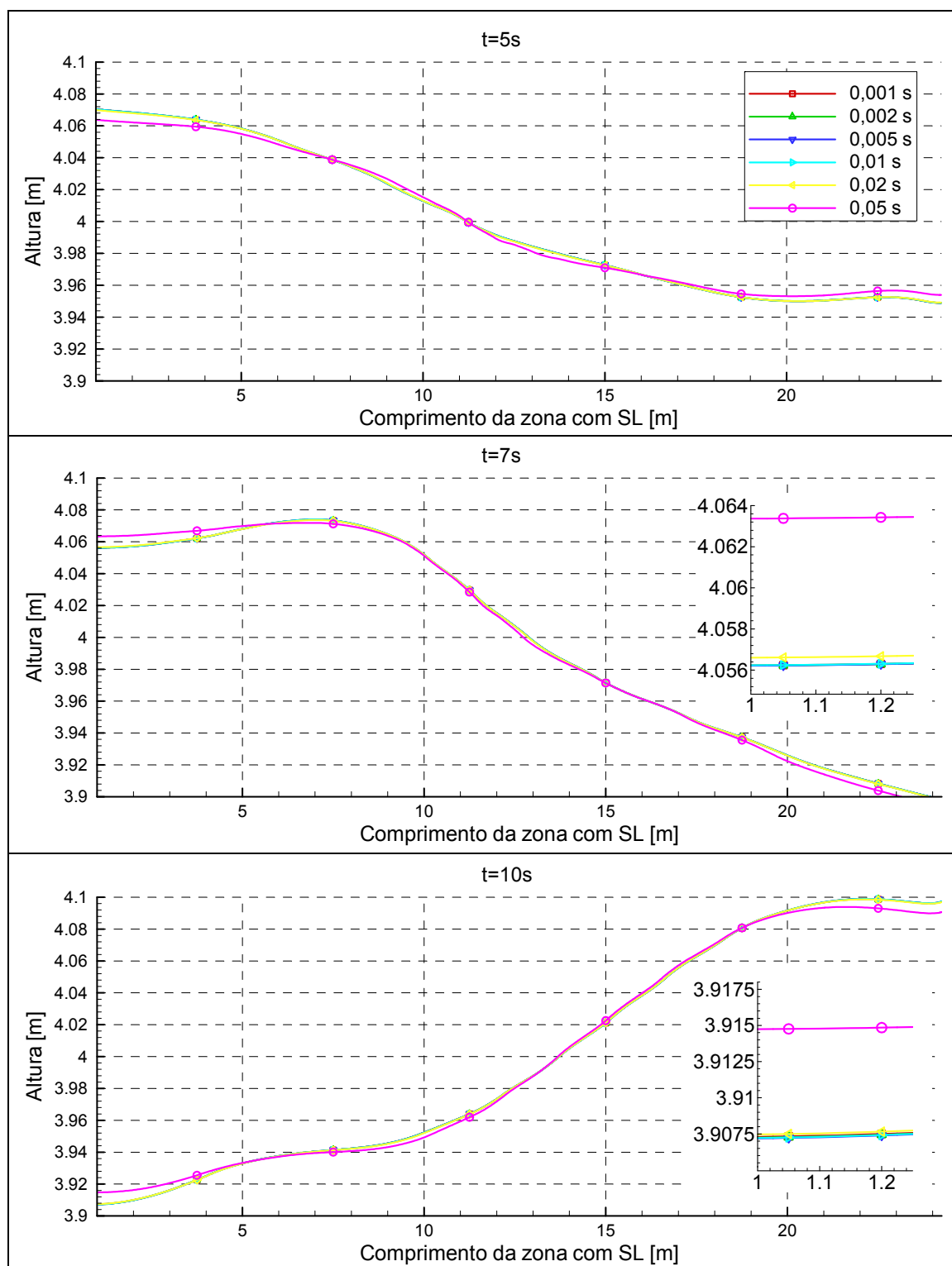
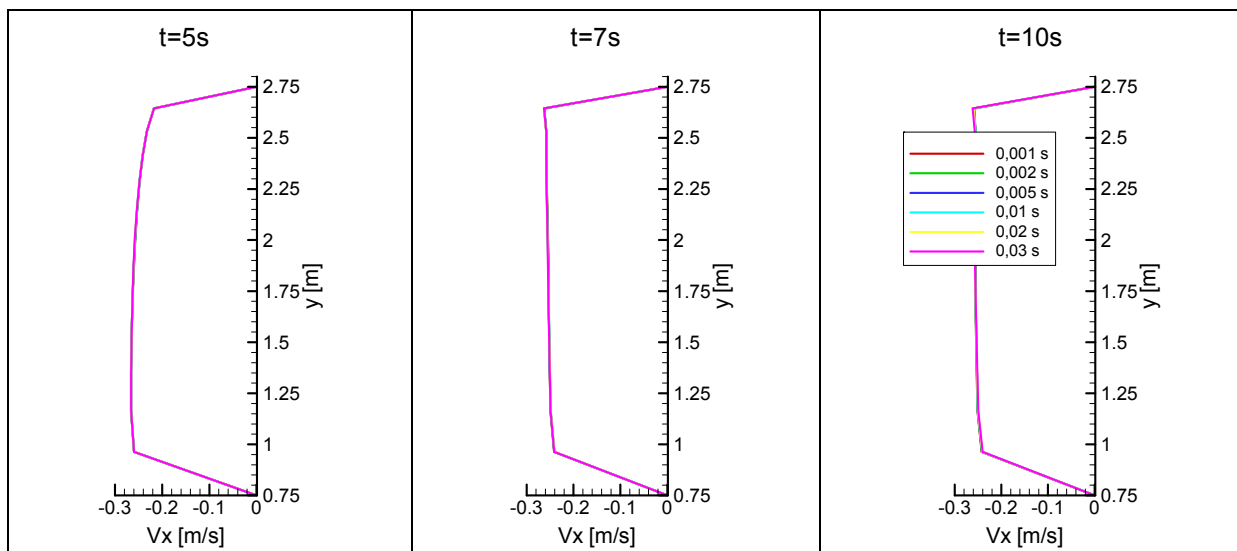
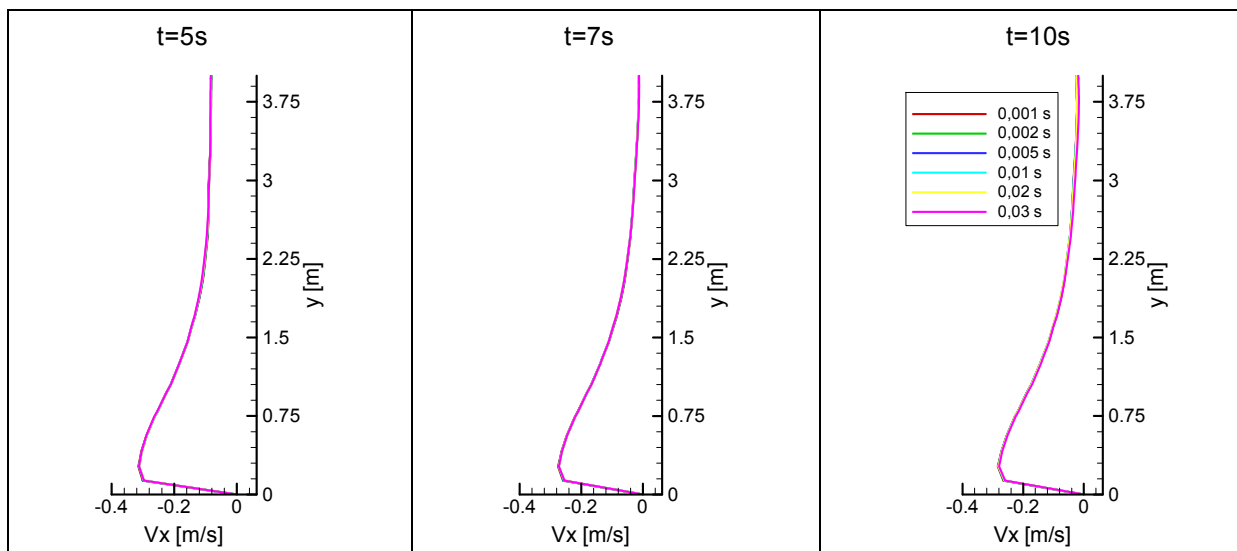


Figura 4.2 – Influência do passo de tempo na forma da superfície livre (pormenor no início das curvas).

Como a convergência de um parâmetro (deformada da superfície livre) não garantem a convergência dos outros (como por exemplo a velocidade) apresenta-se na figura 4.3 a influência do passo de tempo no perfil da componente x da velocidade nas secções de controlo.



a)



b)

Figura 4.3 – Influência do passo de tempo no perfil da componente x da velocidade nas secções de controlo: a) $x = 24,275$ m; b) $x = 2$ m.

Da observação da figura 4.3 é possível concluir que a velocidade é independente do passo de tempo devido as pequenas diferenças verificadas. No entanto da análise conjunta das figuras 4.2 e 4.3 conclui-se que a superfície livre é mais sensível a variação do passo de tempo.

Parece assim que o passo de tempo de 0,01 s é a escolha mais prudente para o estudo a desenvolver, pois garante um tempo de cálculo moderado e pequena difusividade da fracção de volume na superfície livre. Escolhido o passo de tempo é importante também escolher o número de iterações não lineares. Como o objectivo do trabalho não é a simulação dos regimes transitórios e por observação dos resíduos concluiu-se que a escolha de 6 iterações é satisfatória, pois não existem diferenças significativas na convergência dos resíduos e na forma da superfície livre. Recorda-se que um aumento do número de iterações não lineares de 6 para 12 provocaria um aumento de tempo de cálculo para aproximadamente o dobro.

4.1.2 Discretização espacial

Até agora foi utilizada nas simulações uma malha exageradamente fina e uniformemente distribuída no domínio de cálculo. Nesta secção, inicialmente vai-se tornando esta malha cada vez mais grosseira comparando os resultados obtidos. Posteriormente volta-se a modificar a malha baseando nos critérios de correlação entre a intensidade dos gradientes e a densidade da malha de modo a optimiza-la.

Neste contexto, no processo de construção da malha em torno da conduta de aspiração é importante aplicar um refinamento progressivo dos elementos, desde a superfície exterior da conduta até às fronteiras do domínio de cálculo. Noutras zonas do domínio faz-se uma discretização uniforme da malha distendendo progressivamente as dimensões dos elementos. Esta discretização é mantida, mesmo quando é alterada a dimensão dos elementos noutras zonas do domínio de cálculo de modo a adaptar-se aos seus contornos.

No presente estudo, foram utilizadas sete discretizações diferentes, tendo como principal objectivo analisar a influência da variação da dimensão dos elementos nos resultados. A tabela 4.1 representa o número de elementos das malhas para as diferentes discretizações do domínio de cálculo.

Tabela 4.1 – Características das malhas utilizadas.

Dimensão dos elementos [mxm]	Número de elementos
0,015×0,015	237573
0,02×0,02	181177
0,025×0,025	139948
0,03×0,03	118437
0,04×0,04	92538
0,05×0,05	78089
0,06×0,06	69108

As simulações para as diferentes discretizações espaciais do domínio de cálculo, conforme a tabela 4.1, foram realizadas para o passo de tempo de 0,01 s e 6 iterações não lineares.

A análise dos resultados numéricos é feita de forma semelhante, comparando as formas da superfície livre para três instantes, como mostra a figura 4.4. Desta forma é possível analisar a influência da dimensão dos elementos da malha nos resultados

Da observação da figura 4.4 constata-se uma ligeira diferença na forma da superfície livre quando a variação da dimensão dos elementos é pequena relativamente à malha fina (0,015x0,015). Esta diferença torna-se mais significativa quando a dimensão dos elementos passa a ser aproximadamente 5 vezes superior a malha fina. Parece assim que a dimensão 0,025x0,025 é uma escolha adequada, pois apresenta um tempo de cálculo moderado e uma pequena difusividade da fração de volume na superfície livre em relação a malha 0,03x0,03.

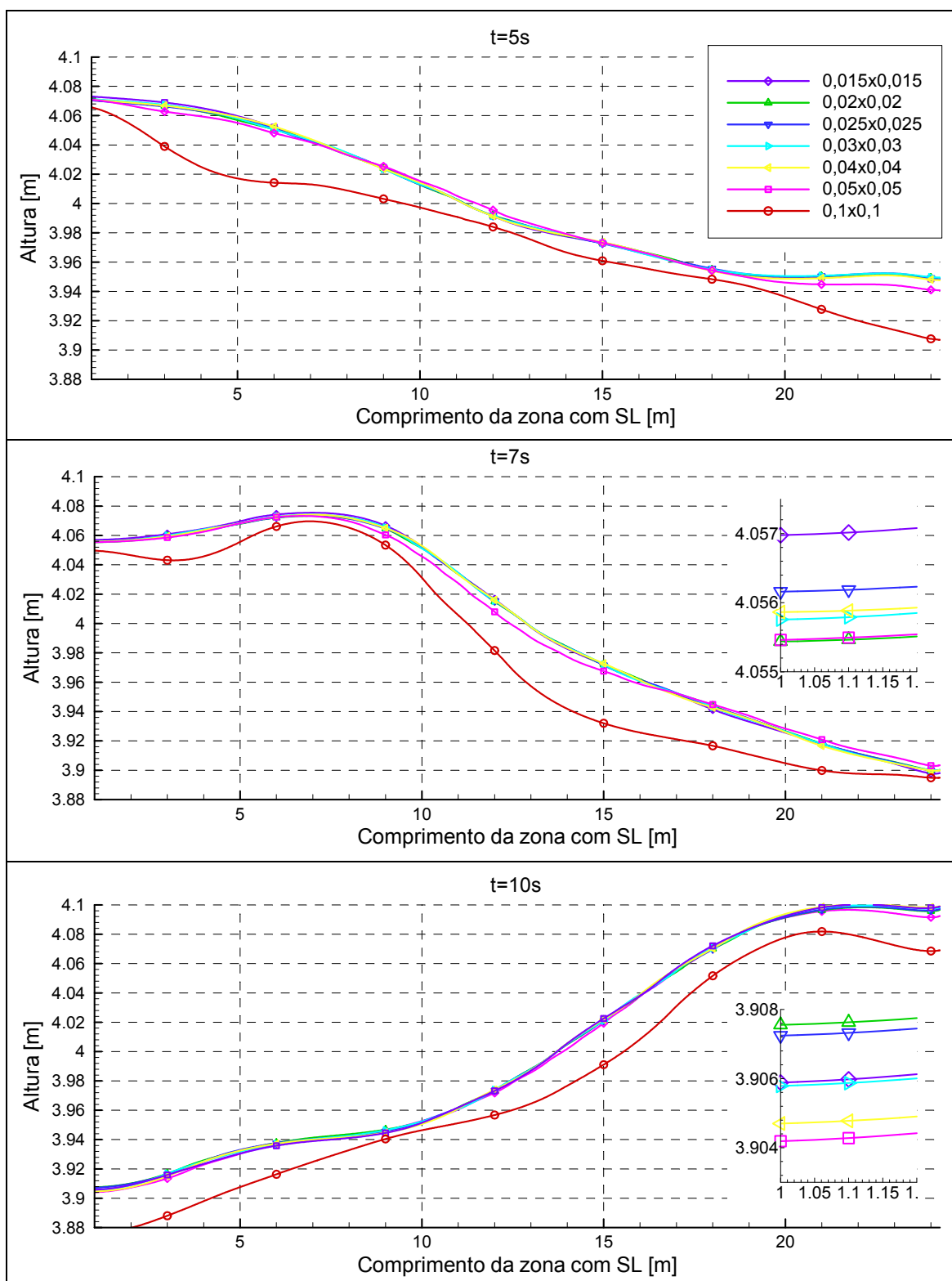


Figura 4.4 – Influência da malha na forma da superfície livre (pormenor no início das curvas).

No entanto, como estas conclusões foram feitas ao nível da superfície livre e a malha é ainda muito refinada em todo o domínio é possível reduzir o número de elementos, isto é, otimizar a malha. Pois nas simulações numéricas em 3D o número de elementos rapidamente ascenderia a valores muito elevados.

A optimização da malha é feita reduzindo o número de elementos no domínio de cálculo, onde se prevê que os gradientes de velocidade, pressão e fracção de volume sejam pouco significativos.

A redução de elementos na discretização da malha otimizada segue os seguintes critérios pré-definidos:

- Na zona de detecção da superfície livre é mantida a discretização na direcção vertical em todo o domínio. Esta condição é indispensável, pois assegura uma transição entre o ar e a água mais precisa (pequena difusividade) para o estudo da forma da superfície livre. Os elementos são estirados na direcção horizontal, pois a variação do escalar que descreve o *VoF* dá-se na vertical (Capítulo 3 (figura 3.1)).
- Na secção de entrada (entenda-se a secção de entrada a secção $x = 30,475$ m) é necessário que a malha seja suficiente fina, de modo a garantir a condição de conservação de massa no domínio de cálculo.
- No interior do domínio de cálculo pode-se usar uma malha mais grosseira mas deve haver uma continuidade na variação das dimensões dos elementos. A não verificação deste critério pode provocar choque numérico e instabilidade na simulação e consequentemente não haverá convergência dos resíduos.
- Na vizinhança da conduta de aspiração (zona de maior gradiente) é importante ter uma malha fina à entrada e saída da conduta de aspiração para ter-se uma melhor representação do campo de velocidade e vorticidade nas zonas adjacentes.

A figura 4.5 representa a malha otimizada para o domínio de cálculo bidimensional, gerada usando os critérios anteriormente definidos.

Nas simulações numéricas realizadas, com os critérios citados anteriormente foi possível obter uma redução significativa no número de elementos em 77,5% (tabela 4.2) e consequentemente uma redução de 75% do tempo de cálculo.

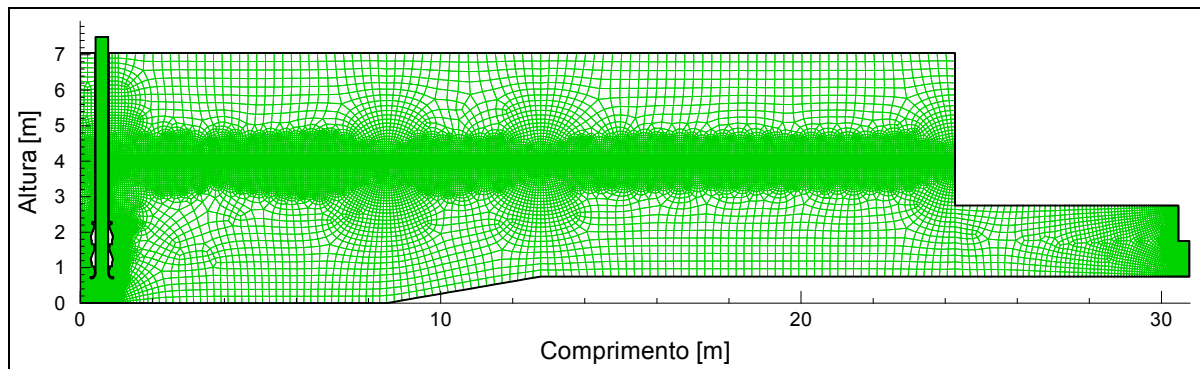


Figura 4.5 – Malha otimizada.

A tabela 4.2 apresenta o número de elementos das duas discretizações do domínio de cálculo: malha otimizada e fina.

Tabela 4.2 – Características das malhas.

Descrição da malha	Número de elementos
Malha Otimizada	31458
Malha Fina	139948

Para a validação dos critérios usados na otimização da malha opta-se por comparar a forma da superfície livre e o campo de velocidade na vizinhança da conduta de aspiração, pois correspondem a zonas de maiores gradientes.

Na figura 4.6 compara-se a forma da superfície livre em três instantes, para as duas discretizações do domínio de cálculo.

Das simulações efectuadas para as duas malhas (figura 4.6) constata-se, conforme esperado, que a malha tem pequena influência nos resultados, o que permite concluir que a necessária independência entre resultados e malha está garantida.

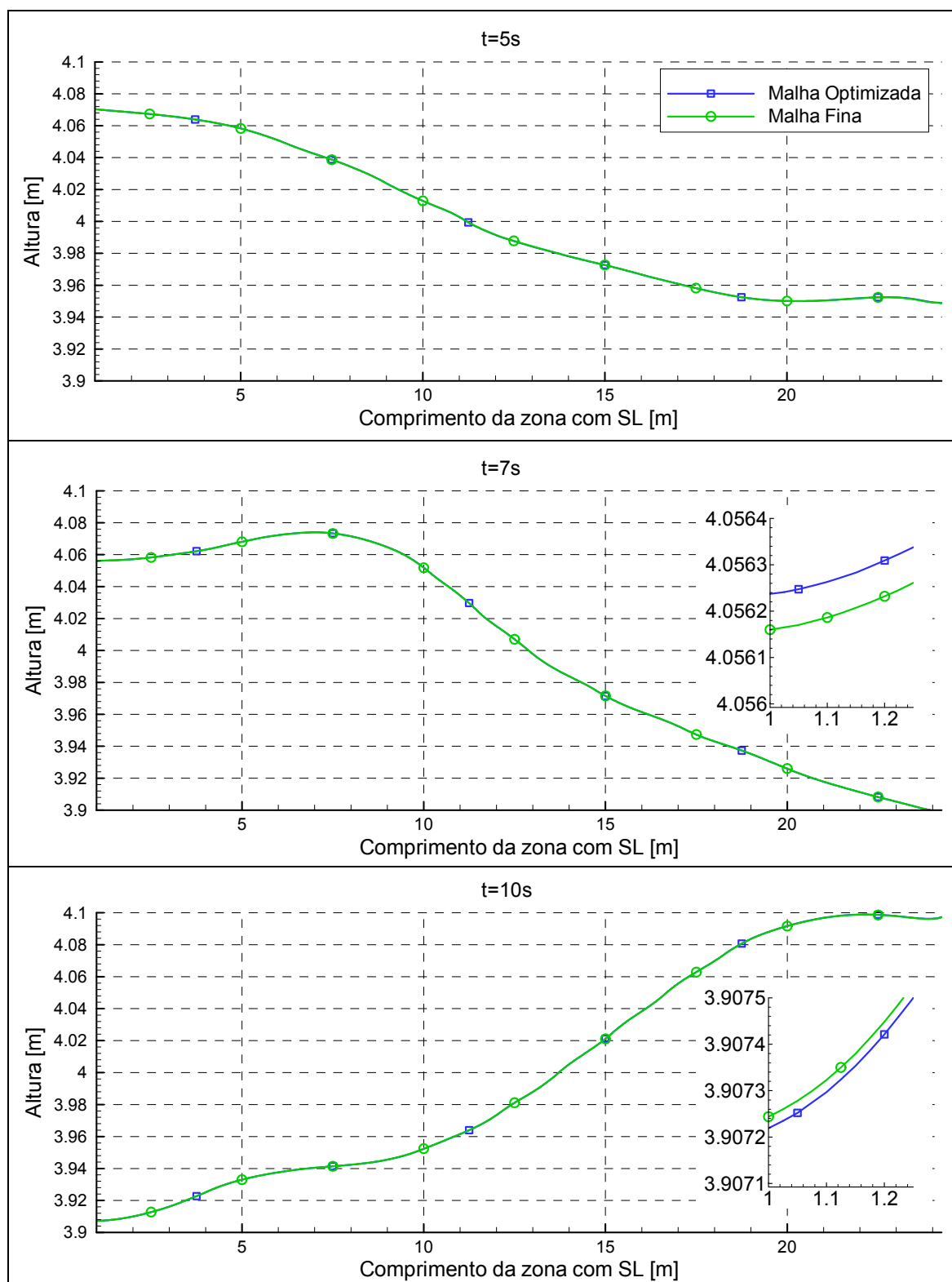


Figura 4.6 – Comparação da forma da superfície livre para a malha otimizada e fina (pormenor no início das curvas).

A fim de completar a análise, representa-se na figura 4.7, o campo de velocidade na vizinhança da conduta de aspiração para a malha fina e a malha otimizada.

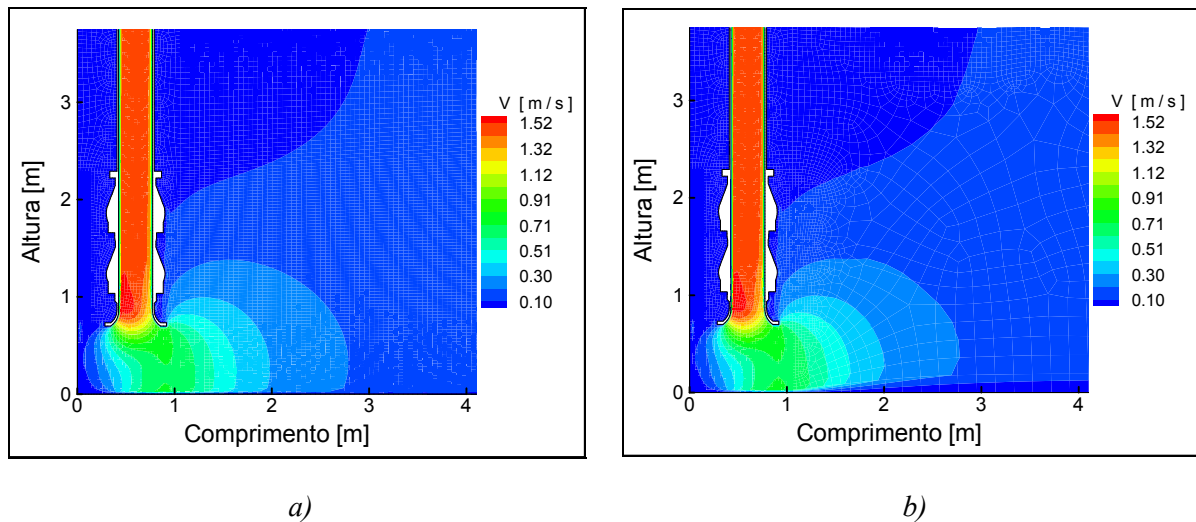


Figura 4.7 – Campo de velocidade na vizinhança da conduta de aspiração: a) Malha fina; b) Malha otimizada.

A análise da figura 4.7 permite concluir que não existe dependência relevante da malha nos resultados, pois existe apenas uma pequena diferença no campo de velocidade a montante da conduta de aspiração junto ao fundo ligada à camada limite.

4.1.3 Justificação da escolha das condições de fronteira

Na fase da escolha das condições de fronteira é possível identificar-se dois grupos de condições de fronteira, as “óbvias” e as “não óbvias”. As condições de fronteira “óbvias” são aquelas intuitivas, não carecem de um estudo pormenorizado para a sua escolha (condição de parede, pressão atmosférica). No entanto, existem condições de fronteira “não óbvias” (condição de entrada, saída), ou seja, as condições de fronteira programadas no *FLUENT* não têm uma correspondência física absoluta com as do problema. Assim a opção por este tipo de condição de fronteira deve-se ser encarada como uma aproximação que necessita ser validada.

A validação da condição de fronteira na entrada é feita comparando os resultados de dois modelos: no primeiro o domínio de cálculo inicia-se na secção de entrada, impondo uma condição de fronteira de caudal mássico. No segundo modelo considera-se a montante da

secção de entrada um reservatório semi-infinito, isto é, reservatório de grandes dimensões em relação às dimensões da tomada de água (figura 4.8).

As simulações numéricas realizadas para os dois modelos pretendem concluir sobre a independência do escoamento no interior da câmara de aspiração relativamente à condição de fronteira imposta.

A análise dos resultados é realizada comparando nos dois modelos o perfil de velocidade e a evolução do caudal mássico na secção de entrada e a forma da superfície livre em todo o domínio de cálculo. Desta forma pode aferir se o nível da água na câmara de aspiração se mantém igual nos dois modelos. A figura 4.8 apresenta o domínio de cálculo bidimensional usado na validação da condição de entrada (domínio de cálculo em que a montante da secção de entrada existe um reservatório semi-infinito). Para analisar a influência da colocação deste reservatório escolheram-se duas secções de controlo localizadas a $x = 24,275$ m e $x = 30,475$ m.

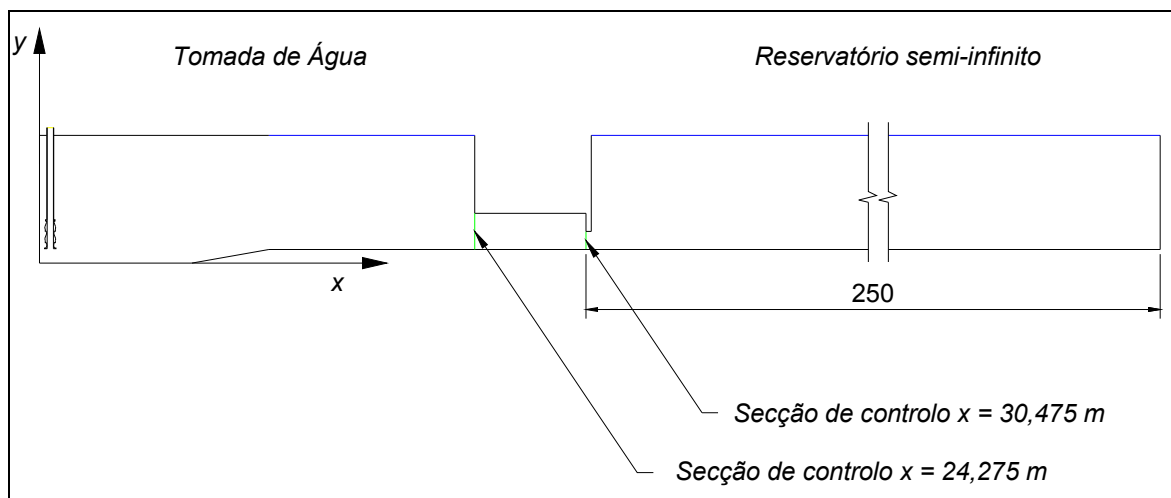
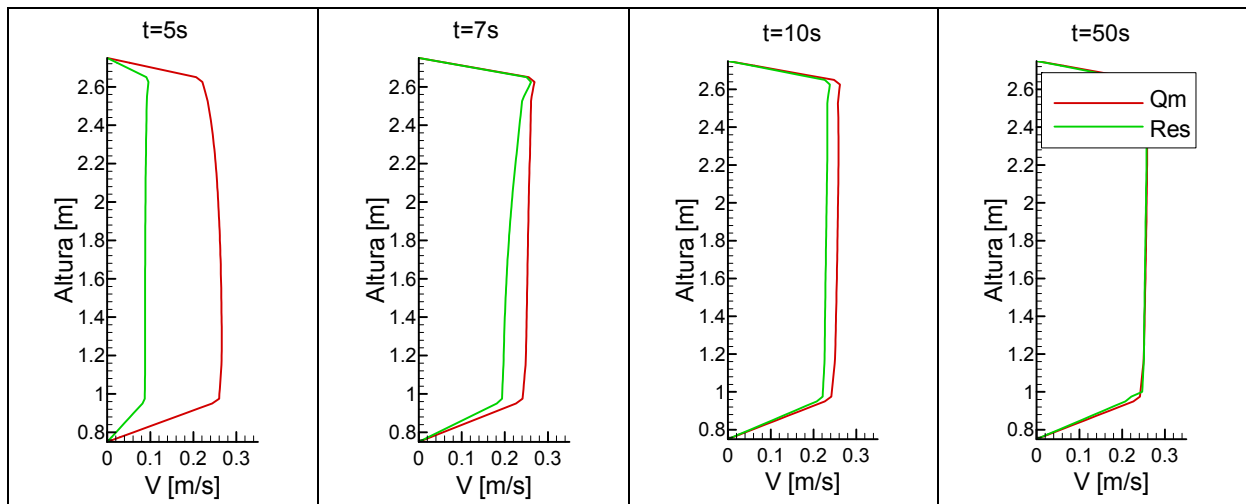
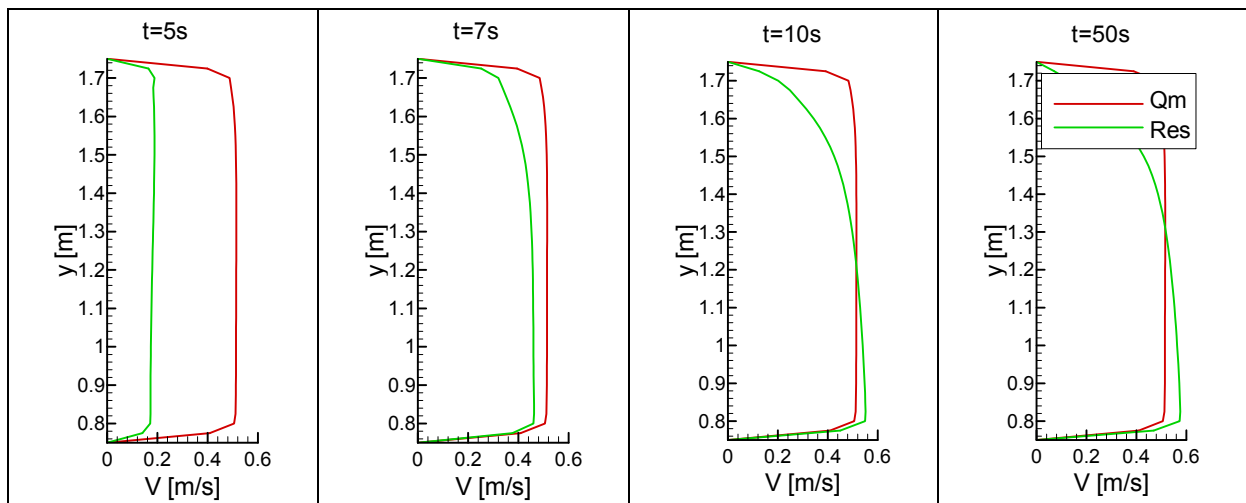


Figura 4.8 – Domínio de cálculo com reservatório semi-infinito a montante da secção de entrada.

Na figura 4.9 representa-se a evolução do perfil de velocidade durante o “transitório numérico” e o regime permanente ($t = 50$ s) para os dois modelos: reservatório semi-infinito a montante da secção de entrada e imposição da condição de fronteira de caudal mássico nesta secção.



a)



b)

Figura 4.9 – Comparação do perfil de velocidade nas secções de controlo: a) $x = 24,275$ m; b) $x = 30,475$ m. Para os dois modelos: reservatório semi-infinito a montante (Res) e condição de fronteira de caudal mássico (Qm).

Na figura 4.9 constata-se que a jusante da secção $x = 24,275$ m (correspondente ao interior do canal de entrada onde existe escoamento com superfície livre) o escoamento é independente da condição de fronteira. A partir de 10 s de simulação não existe variação sensível no perfil de velocidade (o que é indicativo do tempo de estabelecimento do regime permanente). Na figura 4.9-b nota-se ainda uma pequena diferença no perfil de velocidade provocado pela geometria da secção de entrada.

Pode-se então completar a análise através da apresentação da variação do caudal mássico (figura 4.10), obtido através da integração do perfil da velocidade em cada instante de tempo, e também da comparação da deformada da superfície livre na câmara de aspiração em regime permanente (figura 4.11).

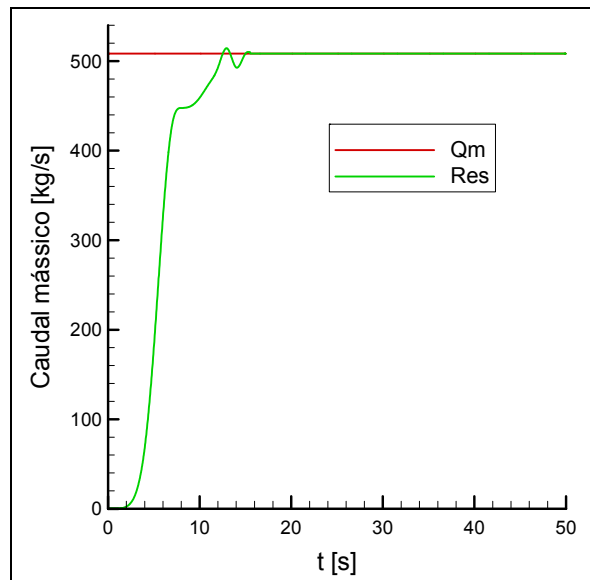


Figura 4.10 – Variação da massa com o tempo na secção de entrada para os dois modelos: reservatório semi-infinito a montante (Res) e condição de fronteira de caudal mássico (Qm).

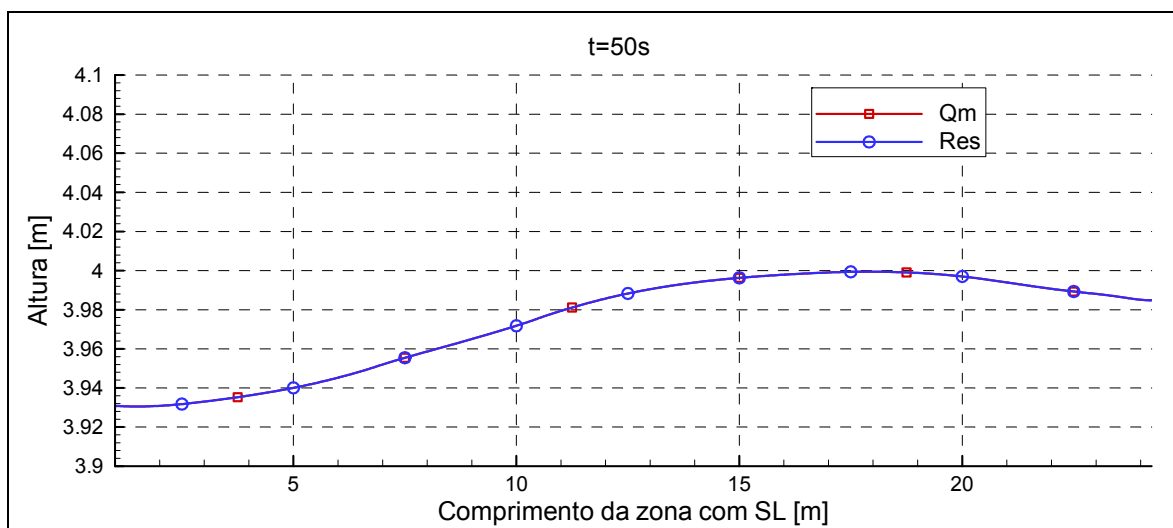


Figura 4.11 – Deformada da superfície livre para os dois modelos: reservatório semi-infinito a montante (Res) e condição de fronteira de caudal mássico (Qm).

Da análise gráfica da curva, representada na figura 4.10, tem-se uma melhor percepção da indicação do tempo de estabelecimento do regime permanente. Este tempo de estabelecimento é aproximadamente 15 s, pois a partir deste instante não existem variações sensíveis do caudal na secção de entrada e este é igual para as duas situações testadas.

Da comparação da deformada da superfície livre apresentada na figura 4.11. Conclui-se que em regime permanente não existem diferenças significativas na forma da superfície livre. O que justifica a escolha da condição de entrada de caudal mássico, pois o nível da água no interior da câmara de aspiração mantém-se igual nos dois modelos.

Do estudo bidimensional convém reter as conclusões sobre o passo de tempo, o número de iterações não lineares, a dimensão dos elementos da malha nas zonas de maiores gradientes e a sua discretização em todo o domínio de cálculo (figura 4.5). Também ficam definidas indicações importantes sobre as condições de fronteira. Na tabela 4.3 resume-se as conclusões do estudo bidimensional. Estas conclusões são adoptadas no desenvolvimento do modelo tridimensional.

Tabela 4.3 – Conclusões do estudo bidimensional.

Passo de tempo [s]	0,01
Número de iterações não lineares	6
Dimensão dos elementos [m] na região da superfície livre	0,025x0,025

4.2 Simulação numérica em 3D

As simulações numéricas 3D descrevem com maior realismo o problema pois este é fisicamente tridimensional. No entanto muitas das conclusões obtidas no estudo bidimensional são ainda válidas. O estudo bidimensional foi efectuado sem ter dedicado especial atenção à validade física das condições de fronteira, o objectivo foi apenas testar os esquemas numéricos e as discretizações. O realismo das simulações tridimensionais exige

agora que as condições de fronteira sejam adaptadas com uma verificação cuidada da sua validade.

Inicia-se as simulações numéricas utilizando os esquemas, modelos e parâmetros numéricos apresentados no Capítulo 3 (tabela 3.2) e utilizam-se os seguintes factores de sub-relaxação: 1 para a pressão, momento, fracção de volume, densidade, viscosidade turbulenta e 0,8 para a energia cinética de turbulência e dissipação turbulenta. Os critérios de convergências residuais exigidas durante o processo iterativo são idênticos aos utilizados no estudo bidimensional.

A geometria tridimensional simulada neste estudo (figura 4.12) é construída a partir do plano de simetria longitudinal ao escoamento na tomada de água, os pormenores da sua configuração geometria encontram-se em Anexo B. A simetria longitudinal do escoamento permite simular apenas metade do domínio de modo a diminuir o número de elementos e consequentemente o tempo de cálculo. As dimensões relevantes são 30,775 m de comprimento, 7,05 m de altura e 6,3 m de largura. As condutas de aspiração encontram-se no extremo mais a jusante da câmara alinhadas transversalmente ao escoamento. A entrada da conduta encontra-se à 0,7 m do fundo da câmara de aspiração, com uma submergência de 3,3 m (o nível da superfície livre em repouso é de 4,0 m).

Nesta geometria impõem-se assim as seguintes condições de fronteira:

- **Saída** – na saída do domínio de cálculo, correspondente à saída da conduta de aspiração, impõe-se uma condição de velocidade média, $\langle V \rangle$, assumindo o perfil uniforme. Esta velocidade é estimada a partir do caudal nominal da bomba axial (as características da bomba axial encontram-se no Anexo A):

$$\langle V \rangle = \frac{Q}{A} = \frac{0,42}{\pi \times \frac{0,35^2}{4}} = 4,37 \text{ m/s}$$

Onde A é a área da secção transversal da conduta de aspiração.

- **Entrada** – na entrada do canal é imposta a condição de conservação de massa no domínio de cálculo. Desta forma fixa-se o caudal mássico, Q_m , deixando o perfil de velocidade livre. O caudal mássico é dado por:

$$Q_m = n\rho Q = 3 \times 998,2 \times 0,42 = 1257,73 \text{ kg/s}$$

Onde n é o número de bombas em funcionamento.

- **Parede, fundo e condutas de aspiração** – condição de “parede com aderência padrão” correspondente às velocidades tangenciais e normais nulas.
- **Secção superior da zona aberta da tomada de água** – condição de pressão atmosférica e constante.
- **Plano de simetria** – condição de simetria.

A figura 4.12 apresenta o domínio de cálculo tridimensional e as condições de fronteira.

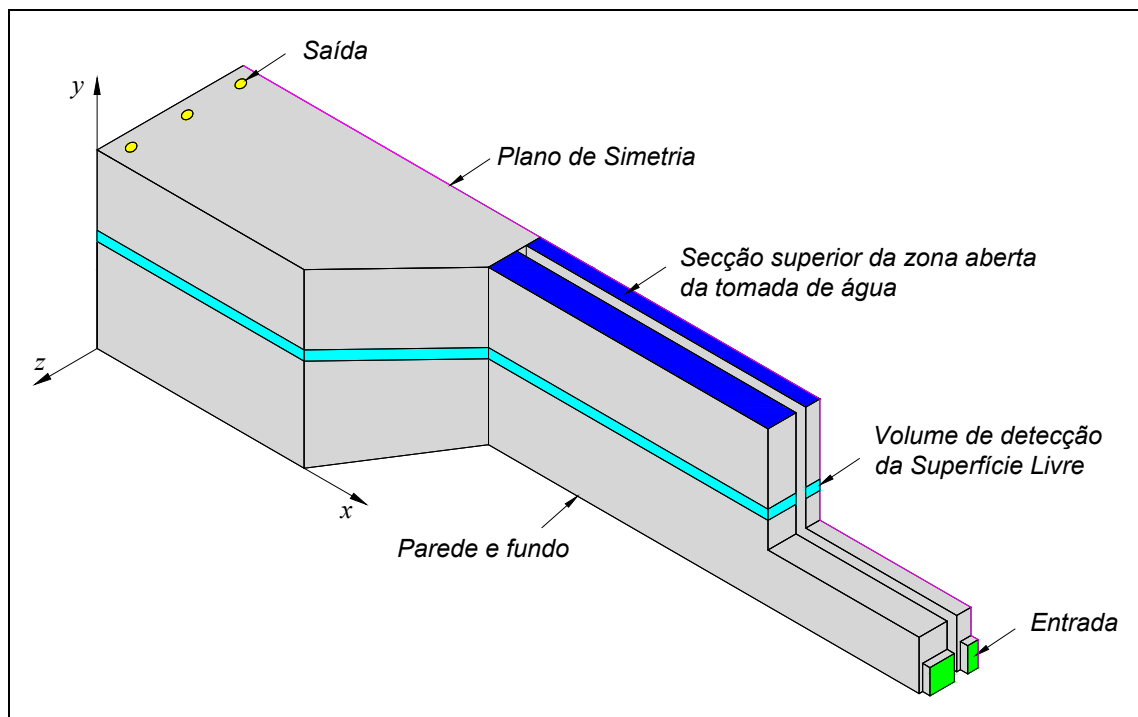


Figura 4.12 – Domínio de cálculo e condições de fronteira.

No domínio de cálculo tridimensional (figura 4.12) identifica-se ainda um volume onde a superfície livre pode evoluir. Neste volume será feita a detecção da superfície livre através do método *VoF*.

No processo de construção da malha no domínio de cálculo tridimensional seguem-se as indicações da discretização efectuada, na secção anterior, para o estudo bidimensional (figura 4.5). A discretização tridimensional é feita a partir do plano xy e evolui na direcção z com

pequenas adaptações aos contornos do domínio de cálculo. Nas zonas próximas das condutas de aspiração apoia-se numa superfície obtida por revolução dos elementos garantindo assim uma discretização radialmente homogénea junto às condutas. A figura 4.13 representa a discretização da malha na superfície exterior do domínio de cálculo tridimensional. Dadas as dimensões da tomada de água e as suas características físicas, a malha do domínio de cálculo é constituída por 956457 elementos.

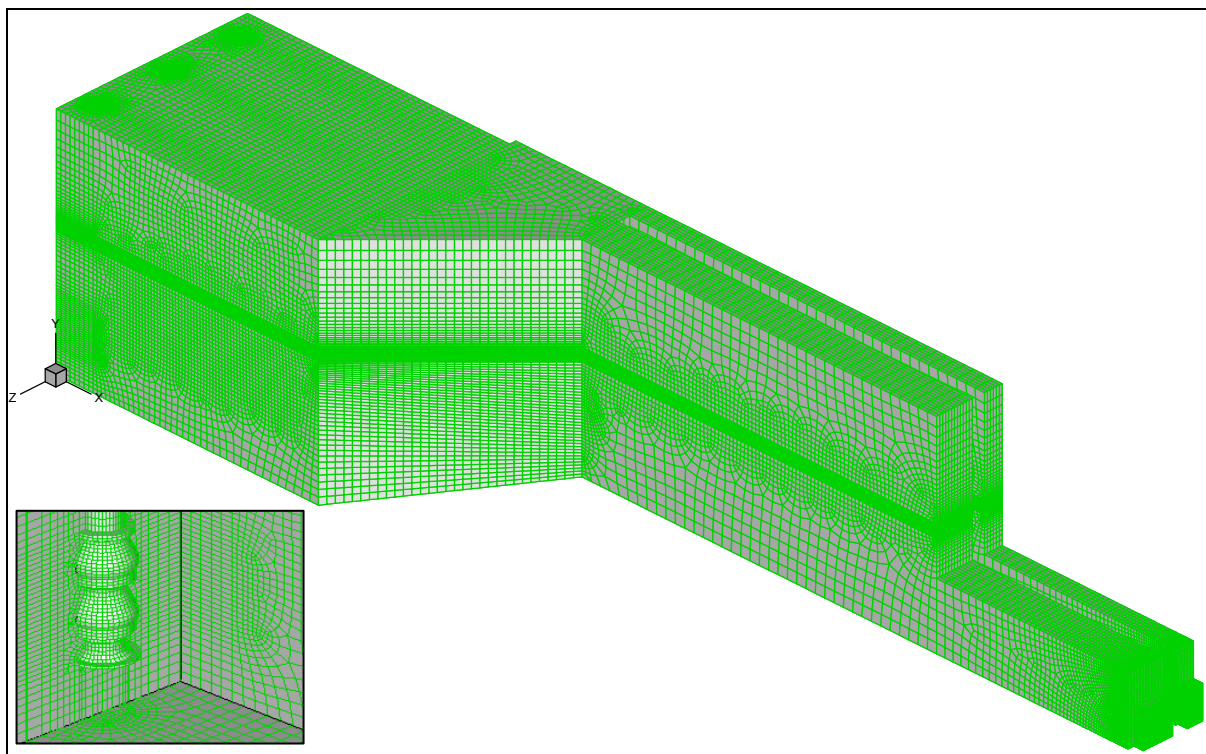


Figura 4.13 – Malha da superfície exterior do domínio de cálculo (pormenor da malha junto às condutas).

Na zona a jusante do canal de entrada, onde existe a deflexão da parede lateral, para a câmara de aspiração nota-se uma desfocagem da malha (figura 4.13). No entanto, é de realçar que a malha nesta zona é uniformemente distribuída, sendo este efeito apenas de natureza óptica.

4.2.1 Justificação da escolha das condições de fronteira

A validação das condições de fronteira do modelo tridimensional é realizada de forma semelhante à do caso bidimensional. Comparam-se os resultados obtidos através de dois

modelos: o primeiro com o domínio de cálculo a iniciar-se na secção de entrada e o segundo em que o domínio de cálculo contém a montante um reservatório semi-infinito (figura 4.14).

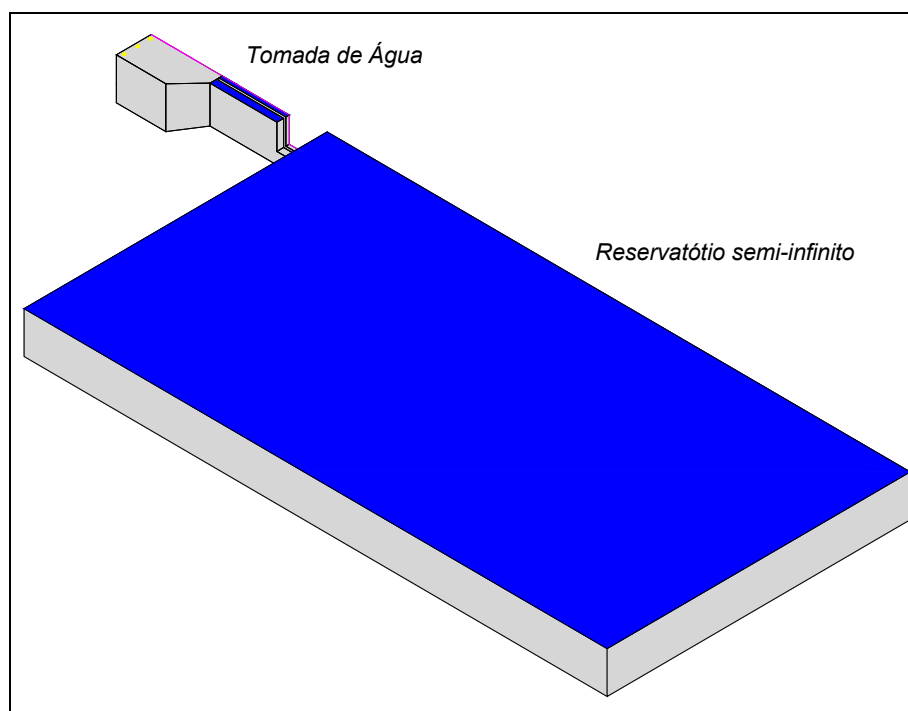


Figura 4.14 – Domínio de cálculo com reservatório semi-infinito.

A validação da condição de fronteira de entrada é efectuada utilizando como critério a comparação de propriedades do escoamento para os dois modelos geométricos. Assim compara-se: o perfil de velocidade tridimensional nas secções de controlo ($x = 24,275$ m e $x = 30,475$ m), a forma da superfície livre e o campo de velocidade na vizinhança das condutas de aspiração.

No estudo bidimensional recorreu-se às simulações onde estava incluído o regime “transitório numérico”, tal era justificado pois apenas se pretendia escolher os parâmetros numéricos evitando-se assim elevados tempos de cálculo. Desta forma não se obtiveram resultados fisicamente correctos sendo contudo numericamente relevantes. O anterior procedimento não foi repetido no estudo tridimensional, apresentando-se apenas resultados em regime permanente que são os relevantes para o estudo proposto. O critério de estabelecimento deste regime foi determinado quando não existia evolução temporal sensível do perfil de velocidade e da variação da massa na secção de entrada.

A figura 4.15 representa o perfil de velocidade na secção de controlo $x = 30,475$ m. Como o estudo concentra-se no escoamento no interior da câmara de aspiração apresenta-se na figura 4.16 o perfil de velocidade na secção de controlo $x = 24,275$ m.

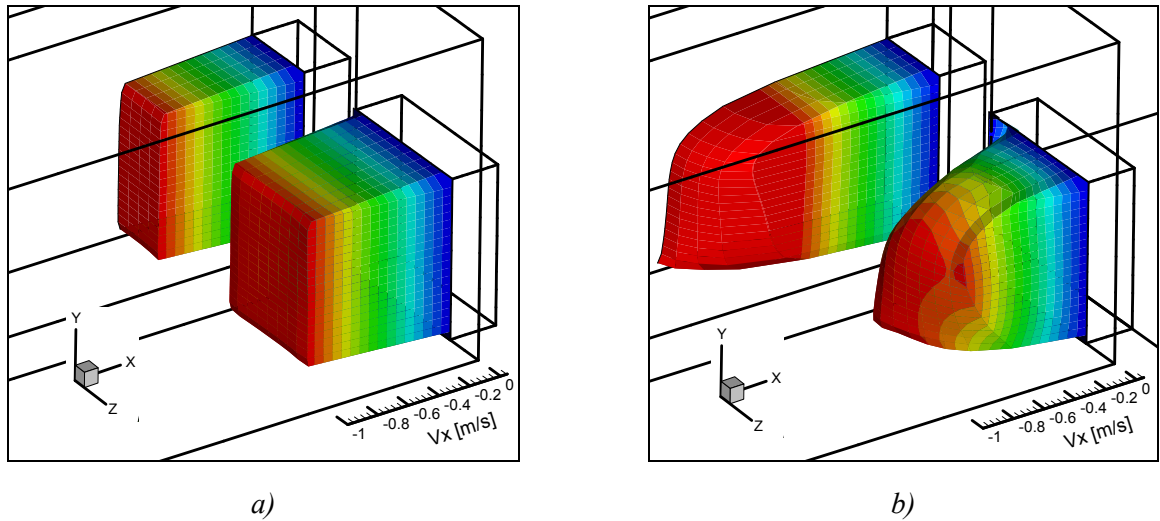


Figura 4.15 – Perfil da componente x da velocidade na secção $x = 30,475$ m: a) condição de caudal mássico; b) reservatório semi-infinito a montante.

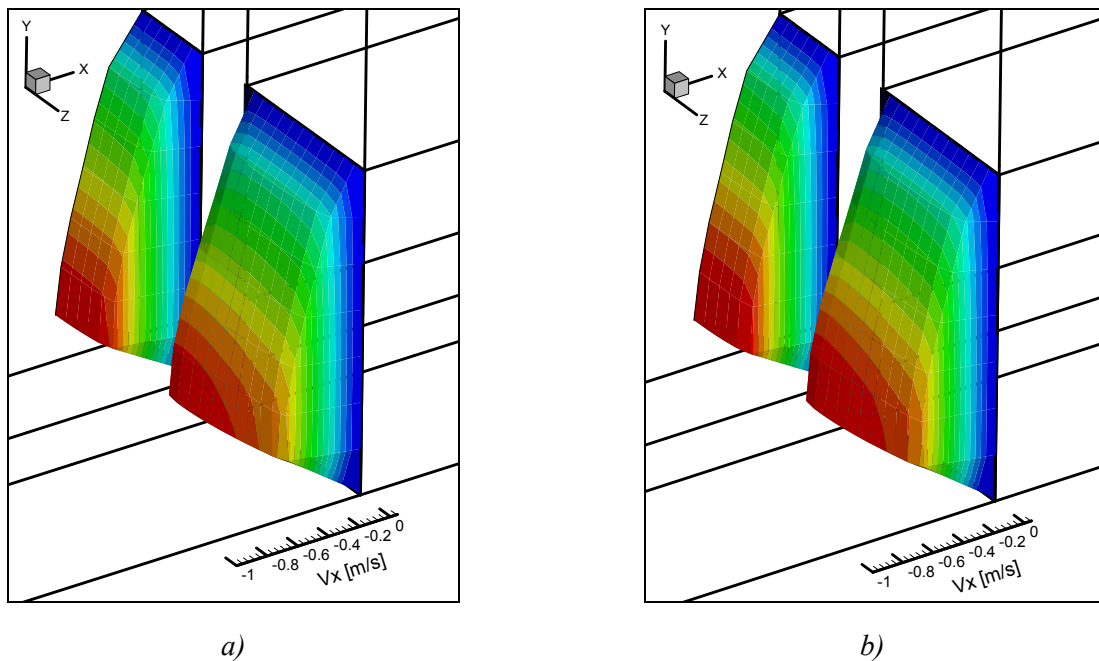


Figura 4.16 – Perfil da componente x da velocidade na secção $x = 24,275$ m: a) condição de caudal mássico; b) reservatório semi-infinito a montante.

A comparação do perfil de velocidade (figura 4.15), permite concluir que existe uma diferença significativa no perfil na secção de entrada. Parte desta diferença é justificada pelo desenvolvimento da camada limite que só é possível quando se considera a montante do canal de entrada o reservatório semi-infinito (figura 4.15-b).

Na figura 4.16 constata-se que a jusante da secção de controlo $x = 24,275$ m (correspondente ao interior do canal de entrada onde existe superfície livre) o escoamento é praticamente independente da condição de fronteira, pois não existem diferenças nos perfis de velocidade nos dois modelos.

Para completar a análise da independência do escoamento da condição de fronteira apresenta-se o campo de velocidade na vizinhança das condutas de aspiração (figura 4.17).

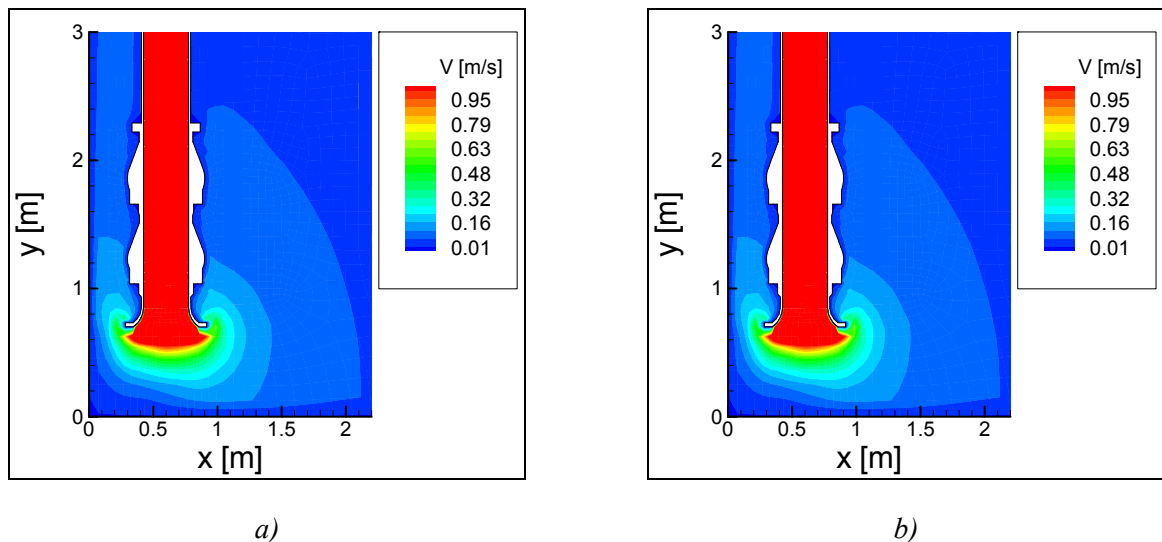


Figura 4.17 – Campo de velocidade no plano xy ($z = -5,3$ m) na vizinhança da conduta de aspiração: a) condição de caudal mássico; b) reservatório semi-infinito a montante.

Da observação do campo de velocidade (figura 4.17) conclui-se, como esperado, que o escoamento na vizinhança das condutas de aspiração não tem influência visível da condição de fronteira.

Na figura 4.18 representa-se a deformada da superfície livre nos dois modelos de modo a reforçar a análise dos resultados.

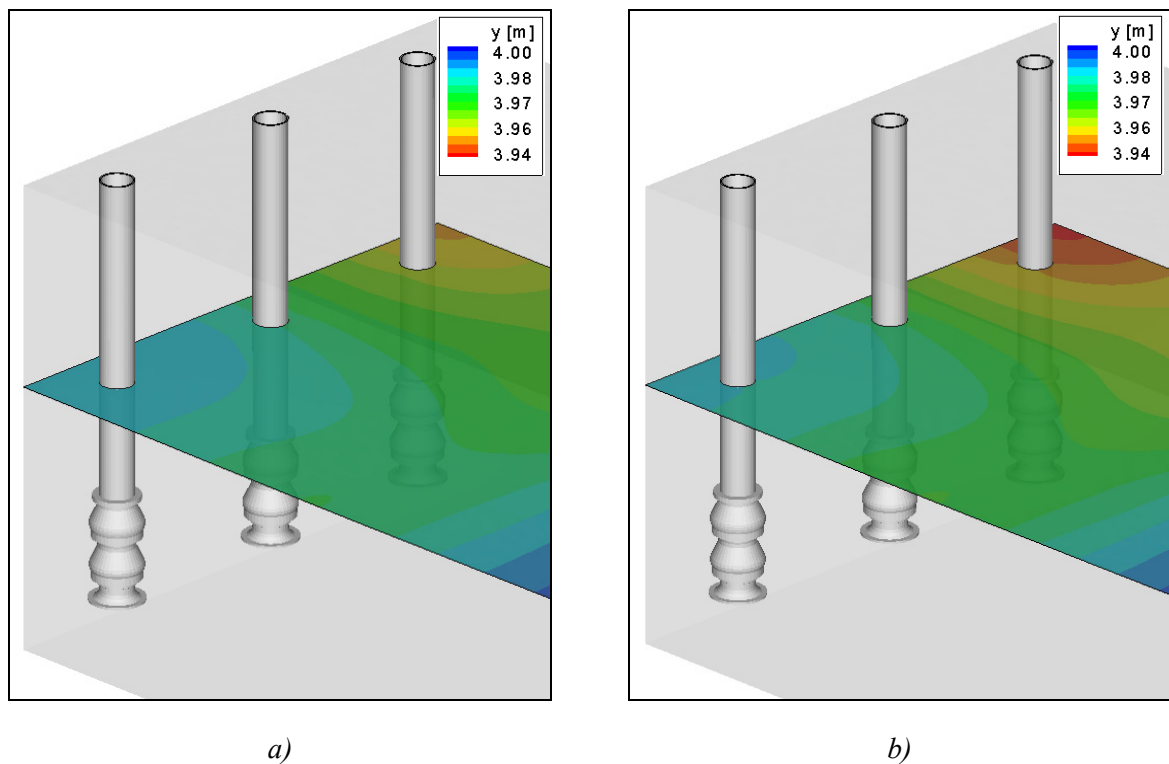


Figura 4.18 – Comparação da deformada da superfície livre junto às condutas de aspiração (nível da superfície livre em repouso: 4 m): a) condição de caudal mássico; b) reservatório semi-infinito a montante.

Da comparação da forma da superfície livre (figura 4.18) constata-se que as duas superfícies são praticamente coincidentes. Fica assim verificado que a condição de fronteira imposta na secção de entrada permite simular com rigor o problema.

A condição de fronteira de saída necessita também de ser validada. A validação é feita considerando dois modelos numéricos: o primeiro simplificado em que a velocidade imposta ao fluido tem apenas componente axial (correspondente a considerar que não há rotação à entrada do rotor das bombas). O segundo modelo em que a influência do rotor da bomba se faz sentir induzindo componente axial e tangencial ao escoamento à entrada das condutas de aspiração. A análise dos resultados numéricos destes dois modelos é feita comparando o campo de vorticidade de modo a detectar a influência da componente tangencial no escoamento.

Neste estudo considerou-se que a componente tangencial da velocidade segue uma distribuição uniforme, tal justifica-se pois no dimensionamento das pás das bombas assume-se

que existe uma distribuição uniforme de carga. A figura 4.19 representa o perfil imposto para a componente tangencial da velocidade à entrada nas condutas de aspiração.

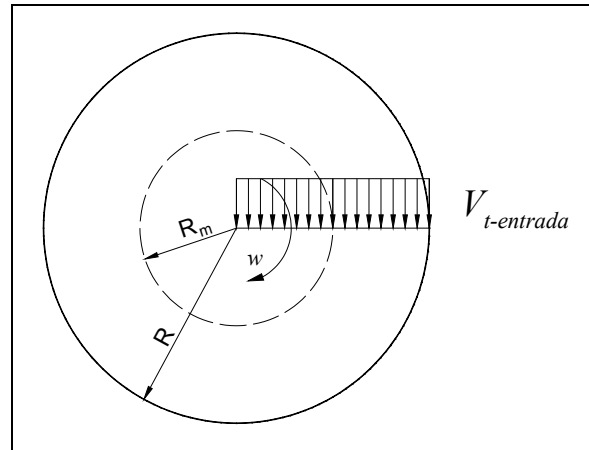


Figura 4.19 – Perfil da componente tangencial da velocidade à entrada nas condutas de aspiração.

Assume-se que a componente tangencial à entrada nas condutas de aspiração, $V_{t-Entrada}$, é apenas 5% da velocidade tangencial a jusante das bombas ($V_{t-Entrada} = 0,05 V_t$). A velocidade tangencial a jusante das bombas pode ser estimada a partir da equação de Euler das turbomáquinas, da seguinte forma:

$$P = \rho Q U V_t \quad (3.23)$$

Onde V_t é a velocidade tangencial a jusante das pás [m/s] e U é a velocidade de transporte das pás [m/s]. A velocidade U pode ser calculada como sendo o produto da velocidade de rotação da bomba, ω [rad/s], e do raio médio dos pás, R_m [m]. Então tem-se:

$$U = 156 \times 0,0875 = 13,7 \text{ m/s}$$

Como o rendimento de uma bomba axial é tipicamente na ordem dos 60% a 70% (Araújo, 1997), assumindo-se um valor médio, tem-se:

$$0,65 \times 400 \times 10^3 = 998,2 \times 0,42 \times 13,7 \times V_t \Rightarrow V_t = 45 \text{ m/s}$$

Então obtêm-se: $V_{t-Entrada} = 0,05 \times 45 = 2,25 \text{ m/s}$, este será o valor da componente tangencial da velocidade utilizada nas simulações numéricas.

Na análise que se segue optou-se por representar os resultados apenas na vizinhança da conduta de aspiração pois nas outras regiões do domínio o escoamento fica praticamente inalterado. Compara-se assim o campo de vorticidade e as linhas de corrente na vizinhança das condutas de aspiração.

A figura 4.20 apresenta o campo de vorticidades no plano xz ($y = 0,7 \text{ m}$ – correspondente à entrada nas condutas de aspiração) para os dois modelos.

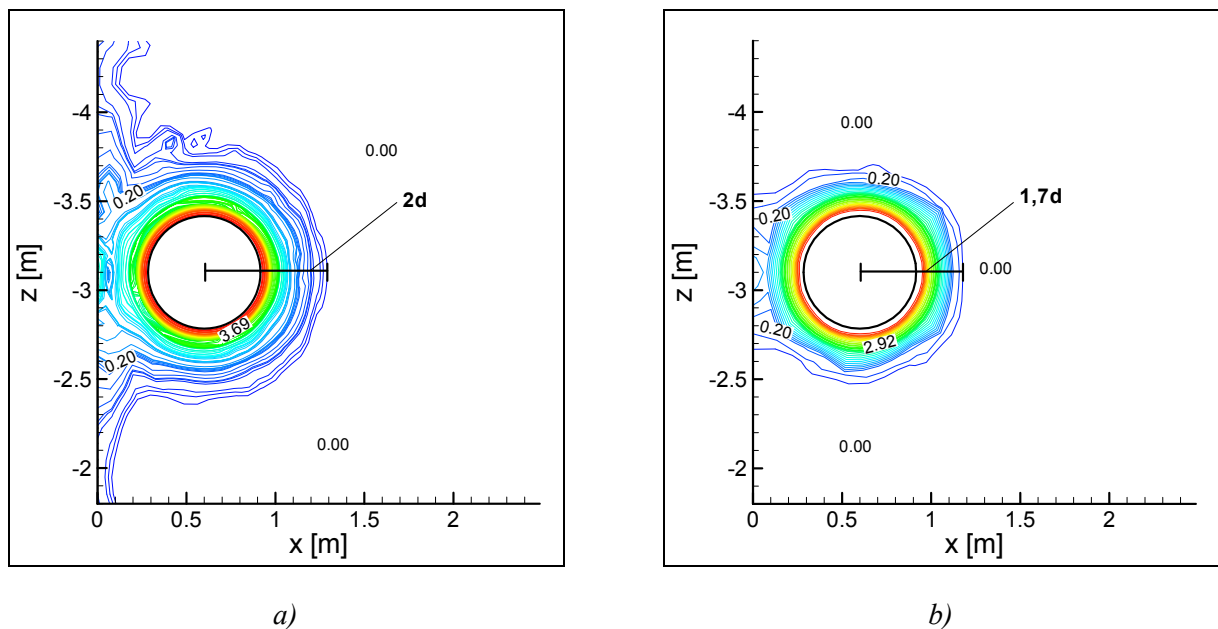


Figura 4.20 – Campo de vorticidade [1/s] no plano xz ($y = 0,7 \text{ m}$) na vizinhança da conduta de aspiração: a) componente tangencial e axial; b) componente axial.

Da observação da figura 4.20 constata-se que existem diferenças significativas no campo de vorticidade na vizinhança das condutas de aspiração. O diâmetro da zona de perturbação, situada à volta da conduta de aspiração, é aproximadamente $2d$ (d é o diâmetro interior da conduta) no modelo com componente tangencial e axial (figura 4.20-a) e $1,7d$ no modelo que considera apenas componente axial (figura 4.20-b). Também verifica-se uma interação maior com a parede quando se contabiliza as duas componentes da velocidade. A inclusão da

componente tangencial é assim importante na identificação de possíveis interferências entre as bombas e formação de vórtices.

Para reforçar a importância da componente tangencial representam-se as isobáricas em perspectiva e nos planos xy/zy , na vizinhança de uma conduta de aspiração (figura 4.21). Observa-se claramente a dependência do campo de pressão da componente tangencial da velocidade.

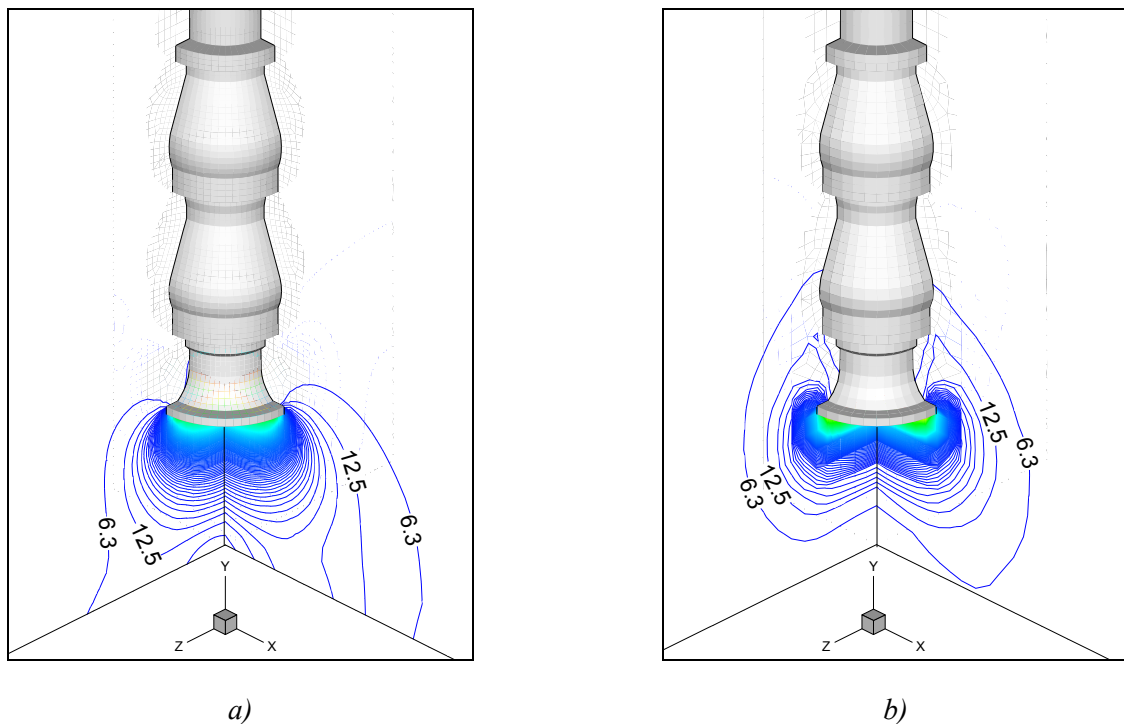


Figura 4.21 – Isobáricas [Pa] na vizinhança da conduta de aspiração: a) componente tangencial e axial; b) componente axial.

Na figura 4.22 representam-se as linhas de corrente na vizinhança da conduta de aspiração sendo possível constatar um padrão de escoamento com linhas de corrente mais distorcidas à entrada da conduta de aspiração no modelo com componente tangencial e axial da velocidade (figura 4.22-a).

Do exposto fica claro que a inclusão da componente tangencial é muito importante para a simulação do escoamento na região próxima das condutas de aspiração. É de realçar que até este ponto a validação numérica foi realizada apenas comparando resultados de vários

modelos numéricos. Na secção seguinte comparam-se os resultados numéricos com dados experimentais.

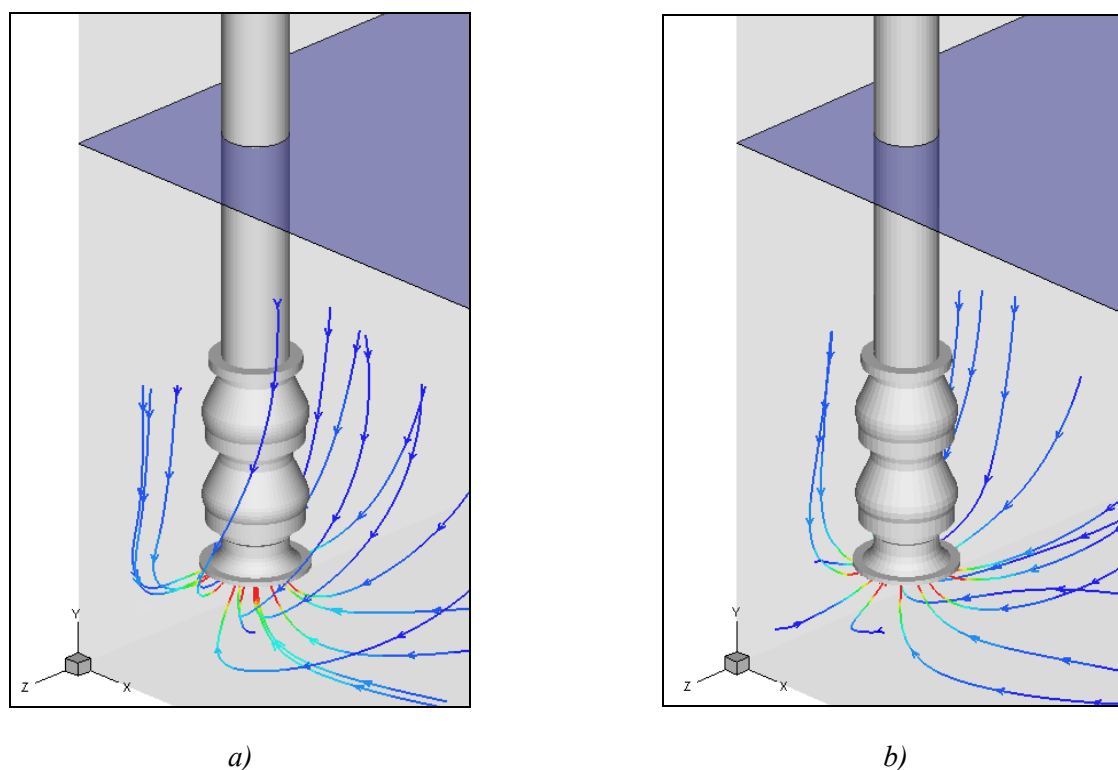


Figura 4.22 – Linhas de corrente na vizinhança da conduta de aspiração: a) componente tangencial e axial; b) componente axial.

4.3 Comparação dos resultados da simulação numérica com dados experimentais

Os ensaios experimentais foram efectuados na central de adução construída pelo Instituto Hidráulica, Engenharia Rural e Ambiente integrante do sistema de Reabilitação do Aproveitamento Hidroagrícola de Roxo e propriedade da Associação dos Beneficiários do Roxo.

A dificuldade na obtenção dos dados experimentais deve-se à fraca acessibilidade ao interior da câmara de aspiração, esta faz-se apenas através de duas escadas verticais engaioladas.

Depois de algumas tentativas de colocar equipamento que permitisse medir o nível da superfície livre e a velocidade concluiu-se não poder existir grande rigor no seu posicionamento mesmo com violação de algumas normas de segurança. Recorreu-se assim apenas a instrumentação previamente existente na instalação. O nível da superfície livre foi medido em quatro sondas do tipo resistivo situadas no interior da câmara de aspiração e no canal de entrada (figura 4.23).

O caudal escoado pela totalidade das bombas foi medido através de um caudalímetro electromagnético localizado a jusante das bombas.

Na figura 4.23 apresenta-se a configuração geométrica da tomada de água e localização dos equipamentos de medida.

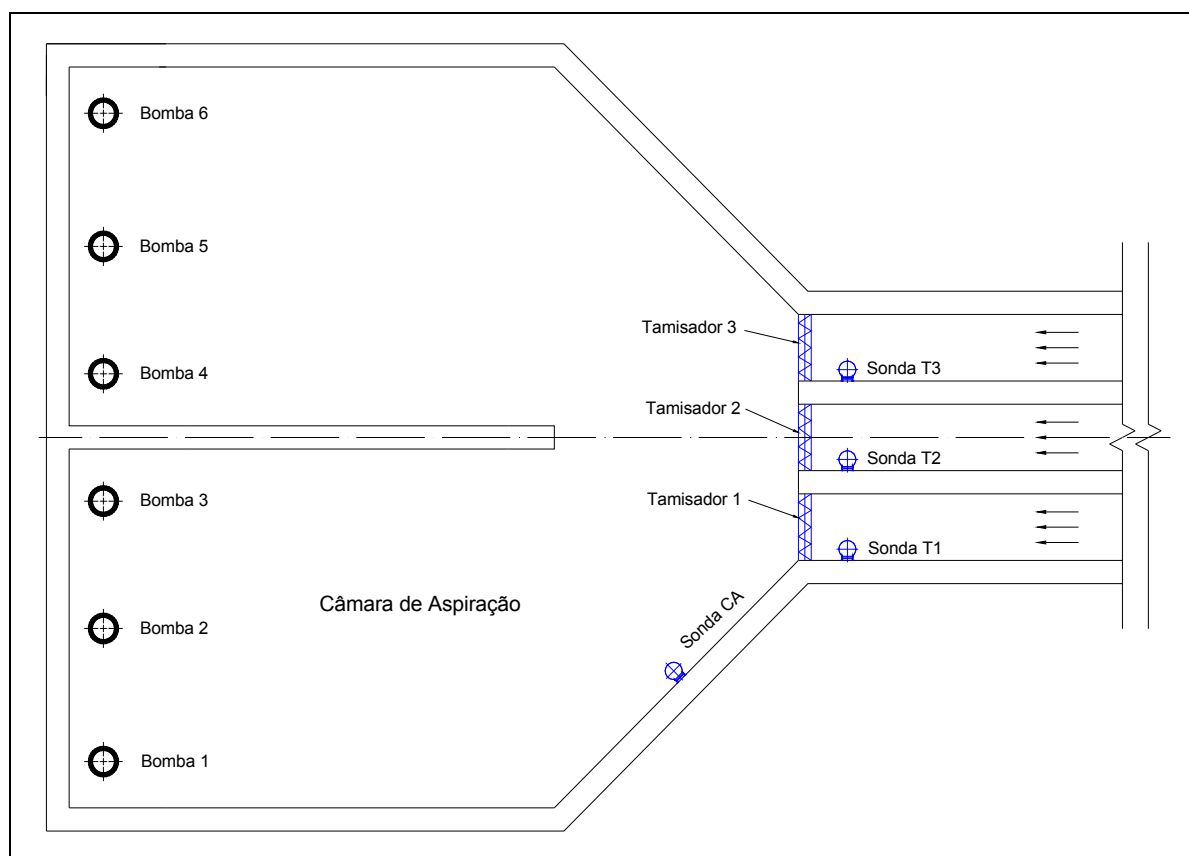


Figura 4.23 – Localização dos equipamentos de medida.

No que diz respeito aos erros de medição, à resolução e aos erros de leitura inerentes ao equipamento têm pouco significado pois por razões práticas ligadas ao controlo e

operacionalidade da central foram intercalados integradores no sinal dos captores. Desta forma apenas se tem acesso a valores médios que absorvem os erros que apenas seriam detectáveis se o sinal fosse puro e tivesse características harmónicas e ruído.

Foram efectuados três ensaios:

- i) Bomba 1 em funcionamento.
- ii) Bomba 4 em funcionamento.
- iii) Bomba 1 e 4 em funcionamento.

Na tabela 4.4 apresentam-se os resultados obtidos. Como os ensaios foram efectuadas em regime permanente observou-se a uma muito pequena variabilidade nos valores medidos.

Tabela 4.4 – Dados experimentais.

Funcionamento	Caudal [m ³ /h]	Variação do nível da superfície livre [m] (± 0,005)			
		Sonda T1	Sonda T2	Sonda T3	Sonda CA
Bomba 1	958	- 0,02	- 0,01	- 0,01	- 0,02
Bomba 4	960	- 0,01	- 0,01	- 0,02	- 0,02
Bomba 1 e 4	958	- 0,01	- 0,01	- 0,01	- 0,02

Os resultados experimentais foram simulados impondo os caudais medidos como condição de fronteira de saída. Como nenhuma das situações corresponde a um escoamento simétrico na câmara de aspiração foi simulado todo o domínio. A condição de fronteira de entrada situava-se na secção $x = 30,775\text{m}$ (ver Anexo B) correspondente à entrada do canal de entrada.

O domínio de cálculo e o domínio físico não são completamente coincidentes pois existem os tamisadores que não simulados numericamente. Este equipamento ainda que limpo introduz uma perda de carga que não foi simulada. Os resultados obtidos nas sondas T1, T2 e T3 devem ser interpretados tendo em conta esta situação.

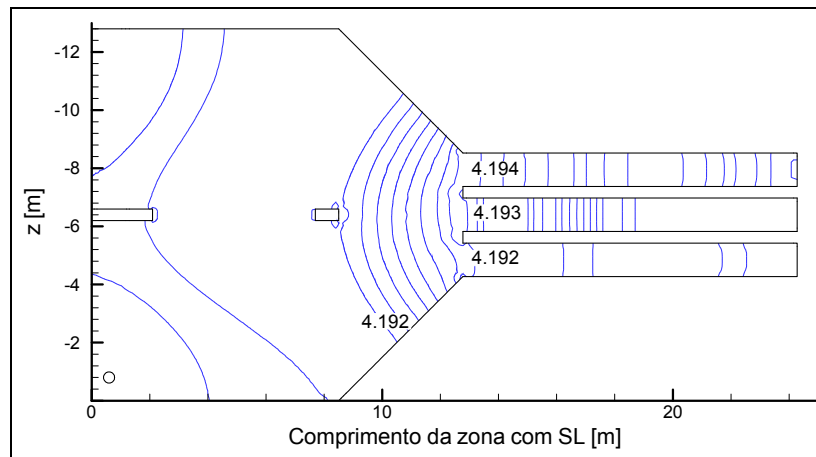
Na tabela 4.5 comparam-se os resultados experimentais e numéricos obtidos no interior da câmara de aspiração (Sonda CA).

Tabela 4.5 – Comparação dos resultados numéricos com dados experimentais.

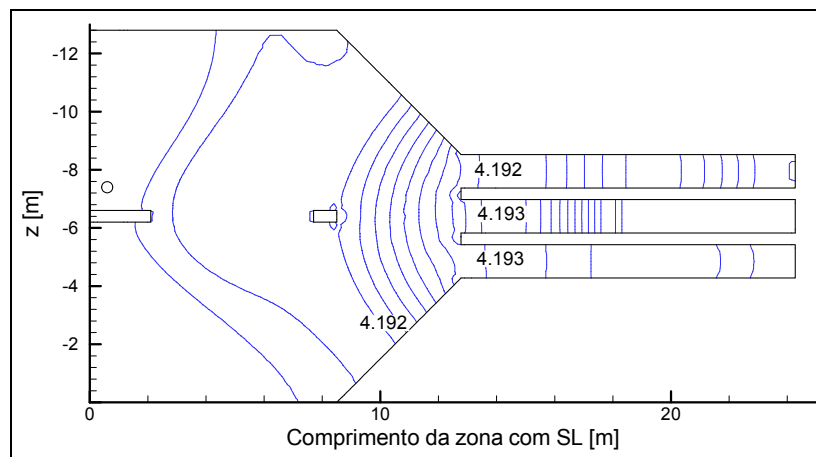
Funcionamento	Variação do nível da superfície livre no interior da câmara de aspiração [m]	
	Experimental	Numérico
Bomba 1	$- 0,02 \pm 0,005$	$\approx - 0,008$
Bomba 4	$- 0,02 \pm 0,005$	$\approx - 0,008$
Bomba 1 e 4	$- 0,02 \pm 0,005$	$\approx - 0,008$

É de realçar que devido ao caudal imposto nos três ensaios ser idêntico o nível da superfície livre manteve-se igual nos três casos, o que é consistente, pois o caudal escoado manteve-se praticamente constante (Figura 4.24).

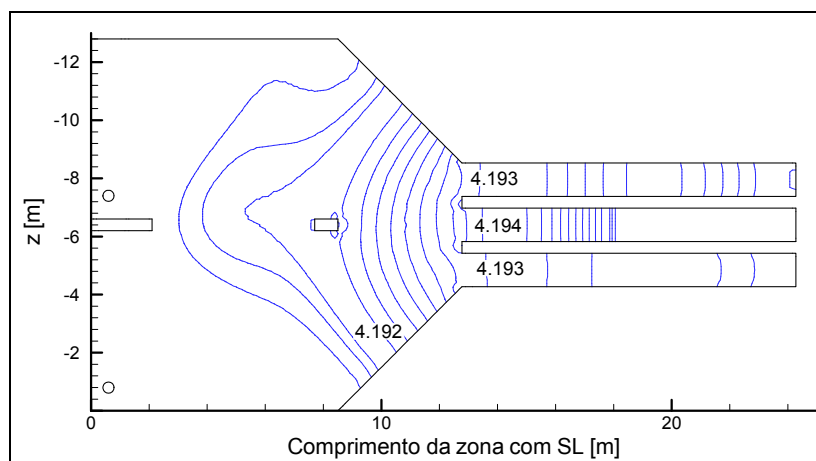
Observa-se na tabela 4.5 que os valores obtidos numericamente são aproximadamente metade dos resultados experimentais. A diferença verificada entre os valores pode ser explicada pela perda de carga imposta pelos tamisadores e ainda pela incerteza introduzida pelo equipamento de medida ou ainda pelas pequenas ondas dispersivas observadas.



a)



b)



c)

Figura 4.24 – Altura da superfície livre [m] para os três ensaios (nível da superfície livre em repouso: 4,2 m): a) Bomba 1; b) Bomba 4; c) Bomba 1e 4.

4.4 Sumário do capítulo

Os testes numéricos realizados neste capítulo permitiram concluir sobre as discretizações temporais, espaciais e as condições de fronteira. Após uma primeira abordagem ao problema, com simulações numéricas em 2D, ficou definido o passo de tempo, o número de iterações não lineares e ainda a discretização da malha (dimensões e a sua distribuição no domínio de cálculo).

Seguidamente, nas simulações numéricas em 3D, foram comparados os resultados com dois modelos geométricos, com diferentes condições de entrada. No que diz respeito à condição de entrada escolheu-se impor uma condição de caudal mássico constante na secção de entrada não sendo necessário simular o reservatório. Na condição de fronteira de saída começou por se impor apenas a velocidade axial por conservação de caudal. Posteriormente conclui-se que é importante incluir também uma componente tangencial.

Por fim, comparou-se os resultados numéricos com dados experimentais e concluiu-se sobre a capacidade do modelo numérico em simular o escoamento nas tomadas de água.

Capítulo 5

Resultados Numéricos

O aumento da capacidade de bombagem da central de adução obriga à colocação de mais condutas de aspiração. Esta situação pode ou não obrigar à alteração da geometria da câmara de aspiração. A introdução de novas condutas conduz em geral para situações não contempladas nas normas que no entanto podem ser satisfatórias do ponto de vista operacional e mais económicas porque não obrigam a obras na tomada de água.

Neste capítulo apresentam-se os resultados das simulações numéricas para os diferentes casos em estudo. Considera-se que se pretende aumentar a capacidade de bombagem da central de adução. Numa primeira fase, sem alterar a geometria da tomada de água, aumenta-se o número e o posicionamento das condutas de aspiração. Seguidamente procede-se à modificação da geometria da tomada de água. Como já referido em consequência das condições de simetria todas as simulações são efectuadas apenas em metade do domínio.

O primeiro caso de estudo consiste na introdução de mais duas bombas (idênticas às existentes) correspondente ao aumento de 33% da capacidade de bombagem. As novas condutas são introduzidas: no plano vertical médio da zona simulada a uma distância variável do eixo da conduta 2 (figura 5.1). As simulações numéricas correspondentes permitem concluir sobre o afastamento que garante que os fenómenos de interferência não sejam significativos. Estimado o valor do afastamento estudam-se mais seis configurações (figura 5.8, 5.10 e 5.12).

Seguidamente efectua-se um estudo análogo para um aumento de capacidade de bombagem de 66% (correspondente à introdução de mais quatro bombas) considerando-se quatro configurações (figura 5.15 e 5.18).

A introdução de mais seis bombas (aumento de capacidade de bombagem de 100%) é também estudada (figura 5.20). Esta simulação permite testar se o habitual dimensionamento e construção de câmaras de aspiração utiliza um coeficiente de segurança de aproximadamente 100%.

Por fim, com objectivos essencialmente académicos, procede-se à uma simulação com triplo das condutas inicialmente existentes (figura 5.24). Esta simulação serve essencialmente para testar a capacidade do programa na simulação de escoamentos viscosos com elevada vorticidade.

5.1 Adequação da tomada de água às diferentes capacidades de bombagem

5.1.1 Aumento da capacidade de bombagem em 33%

O aumento da capacidade de bombagem da central de adução em 33% corresponde à introdução de mais duas condutas na sua câmara de aspiração. No entanto no modelo numérico tridimensional, devido a condição de simetria, equivale a introduzir apenas uma conduta de aspiração (figura 5.1).

A introdução desta conduta de aspiração no domínio de cálculo implica a alteração da discretização espacial. No entanto tentou-se manter, dentro do possível, os mesmos critérios na construção da malha. O refinamento nas zonas próximas desta nova conduta origina um aumento do número de elementos e conseqüentemente o aumento do tempo de cálculo das simulações numéricas. A tabela 5.1 apresenta o número de elementos das malhas e o respectivo tempo de cálculo. Estes cálculos foram realizados num computador Intel (R) Core (TM) i7 – 2,67 GHz.

Tabela 5.1 – Características das malhas e os respectivos tempos de cálculo.

Configuração	Número de elementos	Tempo de cálculo (horas)
Inicial	956457	84
Aumento da capacidade em 33%	1001243	92

Estas simulações numéricas têm como principal objectivo determinar a distância mínima entre a nova conduta de aspiração e as pré-existentes de forma a garantir uma interferência mínima. Inicialmente, para simplificar o estudo do posicionamento, decidiu-se colocar a nova conduta de aspiração na zona central do domínio de cálculo, alinhada longitudinalmente com a conduta 2, variou-se apenas a distância longitudinal b (figura 5.1). A escolha desta geometria apoia-se na previsão de que o escoamento é praticamente simétrico pois a interferência das paredes laterais é desprezável. Desta forma é mais fácil concluir apenas sobre a dependência da distância longitudinal b .

As condições de fronteira e os parâmetros numéricos utilizados são os referenciados no Capítulo 4. Neste domínio de cálculo inicia-se as simulações com a distância $b = 2,5d$. Este estudo é realizado iterativamente de acordo com o fluxograma da figura 1.2, isto é, caso os critérios apresentados no Capítulo 2 (secção 2.2) não forem satisfeitos é aumentada a distância b . Esta distância é apresentada utilizando múltiplos do diâmetro interno da conduta (aumenta-se a distância com o rácio de 40%), nota-se que à entrada da conduta de aspiração está montado um convergente (Tulipa) pelo que o diâmetro varia com a coordenada y (a configuração geométrica da Tulipa encontra-se no Anexo A).

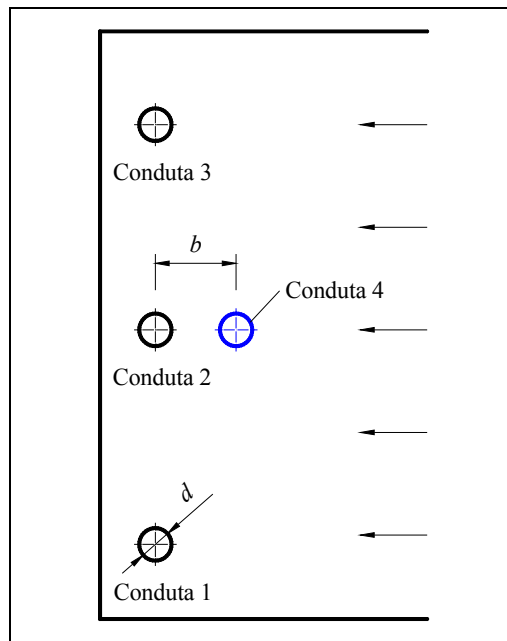


Figura 5.1 – Aumento da capacidade de bombagem em 33% - configuração 1.

A análise dos resultados das simulações numéricas é feita através do campo de vorticidade e das linhas de corrente junto às condutas de aspiração. Desta forma pode-se concluir, para a distância considerada, se existe ou não interferência no escoamento na vizinhança das condutas de aspiração que possa prejudicar o funcionamento das bombas, isto é, reduzindo a sua eficiência de bombagem.

A figura 5.2 apresenta o campo de vorticidade na vizinhança das condutas de aspiração para a distância $b = 2,5d$.

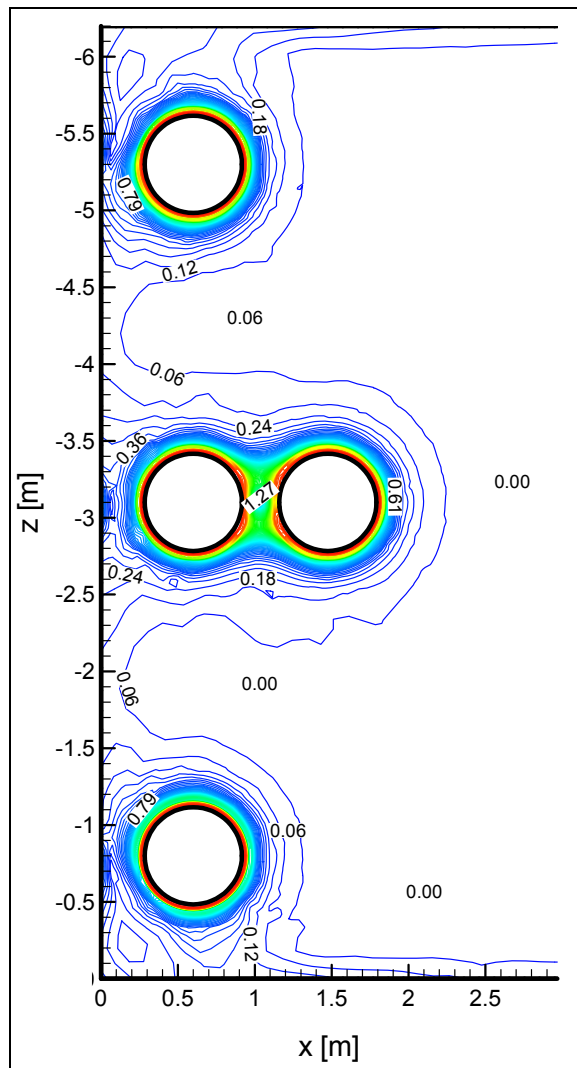


Figura 5.2 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).

Da observação da figura 5.2 identifica-se uma zona de elevada vorticidade entre as duas condutas de aspiração (conduta 2 e 4). Esta elevada vorticidade pode provocar perturbação no escoamento à entrada das condutas de aspiração e consequentemente interferência no funcionamento das respectivas bombas.

A importante perturbação no escoamento junto às condutas de aspiração é susceptível de reduzir o rendimento de bombagem devido a diminuição da pressão local a montante das bombas e elevada rotacionalidade do escoamento.

A representação das linhas de corrente (figura 5.3) permite identificar vórtices submersos de ligação entre as condutas de aspiração. A formação de vórtices submersos pode induzir a

entrada de ar nas condutas de aspiração causando elevadas vibrações e oxidação, consequentemente a rápida degradação dos componentes das bombas.

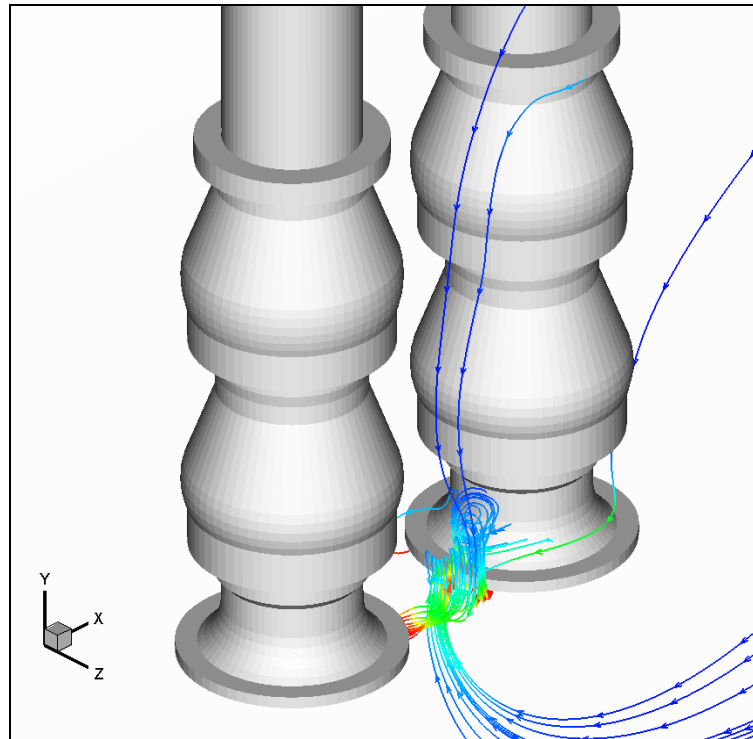


Figura 5.3 – Linhas de corrente tridimensionais.

A perturbação no escoamento junto às condutas de aspiração diminui evidentemente com o aumento da distância longitudinal. Seguidamente apresenta-se os resultados para $b = 3,5d$ obtidos mantendo os mesmos parâmetros numéricos e discretizações. A análise dos resultados também faz-se de forma semelhante, na figura 5.4 apresenta-se o campo de vorticidade na vizinhança das condutas de aspiração para $b = 3,5d$.

Da análise da figura 5.4 constata-se, como esperado, uma redução significativa na vorticidade entre as condutas 2 e 4. No entanto, nota-se ainda interferência no escoamento à entrada das mesmas.

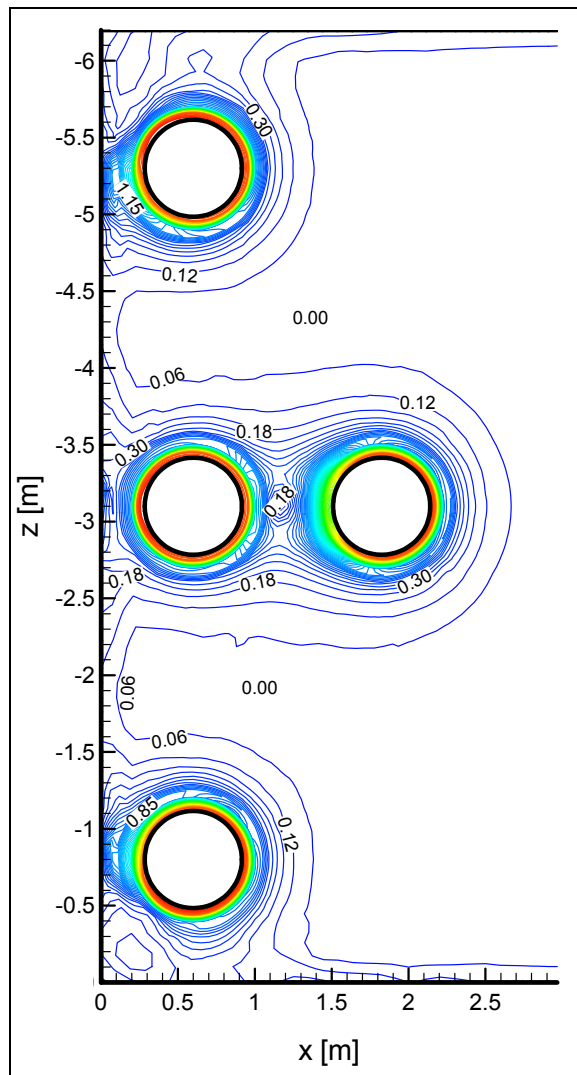


Figura 5.4 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).

De igual forma, apresenta-se na figura 5.5 o campo de vorticidade para a distância $b = 5d$.

Da observação da figura 5.5 identifica-se uma zona de escoamento não perturbado entre as condutas 2 e 4. A vorticidade junto às condutas pré-existentes (condutas 1, 2 e 3) apresenta valores semelhantes aos verificados no caso em que existem apenas as três condutas no domínio de cálculo (figura 5.28-a) e junto à nova conduta de aspiração (conduta 4) permanece praticamente circular.

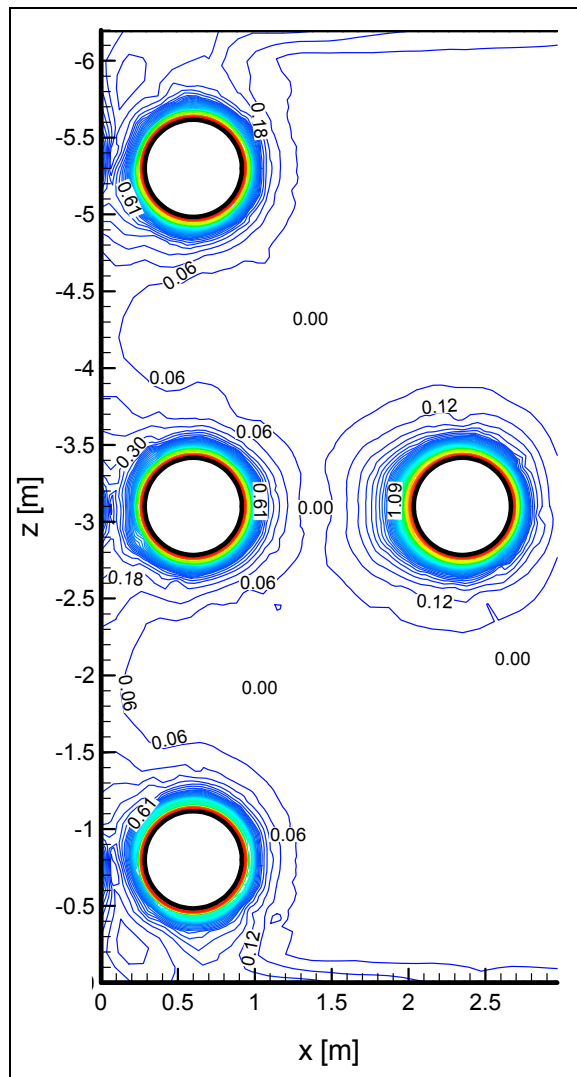


Figura 5.5 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).

A representação da distribuição de pressão dinâmica numa linha recta localizada entre as condutas de aspiração à profundidade de $y = 0,5$ m (figura 5.6) permite de forma eficaz avaliar a interacção no escoamento (a esta profundidade a pressão dinâmica entre as condutas 2 e 4 é máxima). Identifica-se assim um patamar na curva $b = 5d$ que corresponde à uma zona de escoamento não perturbado pela acção das bombas. Constata-se que a distância de $b = 3,5d$ permite garantir uma interferência inconsequente no funcionamento das bombas. No entanto, da observação das linhas de corrente, nota-se que o escoamento é mais perturbado para $b = 3,5d$ do que para $b = 5d$. Então conclui-se assim que a distância $b = 5d$ garante, com uma elevada margem de segurança, o bom funcionamento da central de adução.

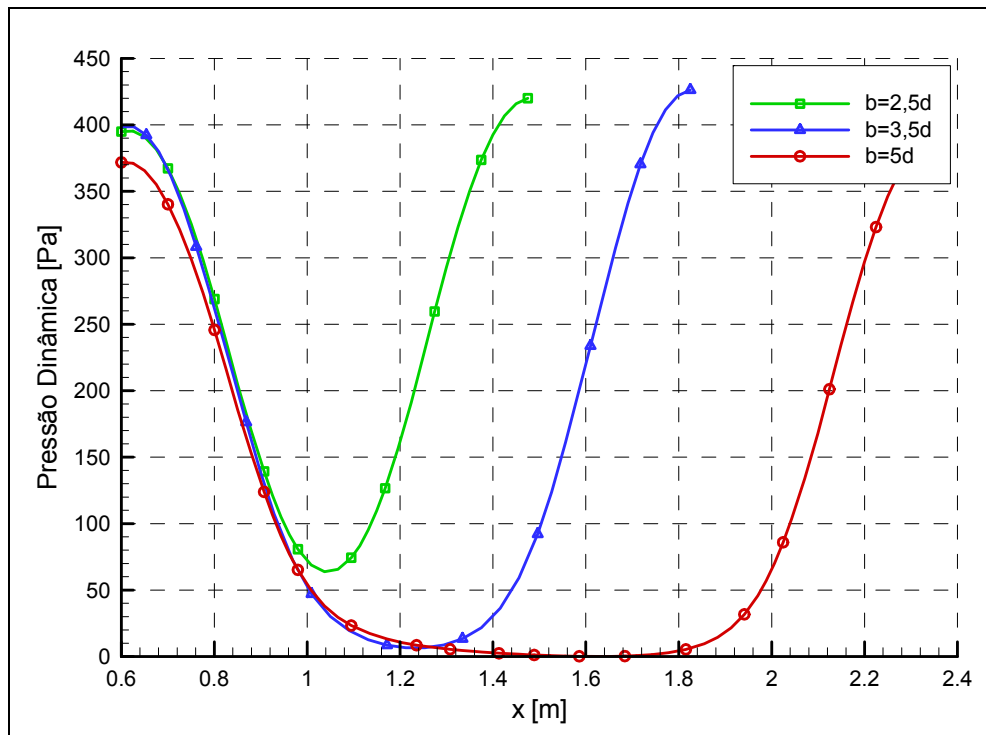


Figura 5.6 – Pressão dinâmica entre as condutas 2 e 4.

Estudada a distância longitudinal entre as condutas de aspiração, apresenta-se a deformada da superfície livre (figura 5.7).

Da observação conjunta da figura 5.7 (oito bombas em funcionamento) e figura 4.18-a (seis bombas) conclui-se que na zona próxima às condutas de aspiração não existem diferenças significativas na superfície livre, permanecendo esta praticamente horizontal. Este facto permite afirmar que a colocação de uma bomba suplementar não acarreta alterações no escoamento susceptíveis de provocar entrada de ar nas condutas.

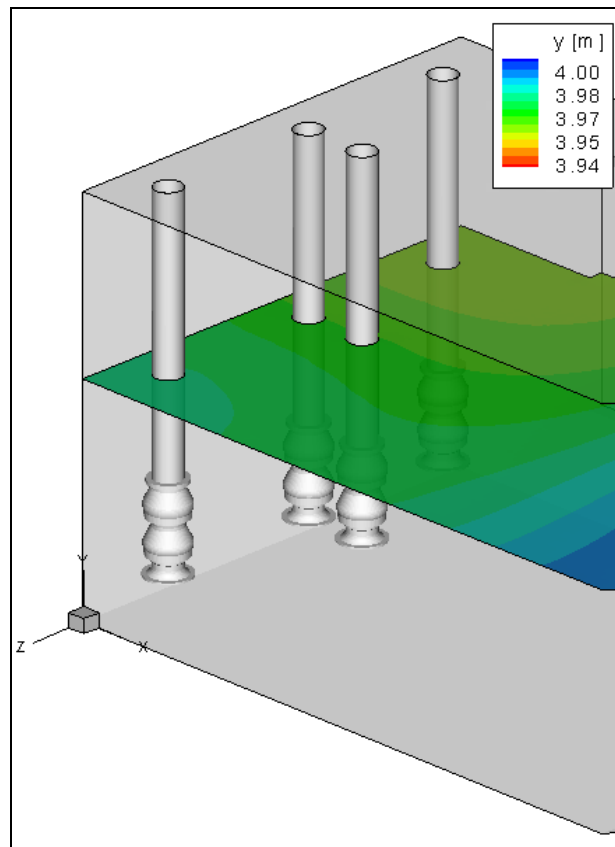


Figura 5.7 – Deformada da superfície livre na vizinhança das condutas de aspiração (nível da superfície livre em repouso: 4 m).

Concluído o estudo sobre a influência da distância longitudinal b procede-se ao estudo com a nova conduta de aspiração (conduta 4) alinhada com as pré-existentes nas zonas junto às paredes laterais (figura 5.8). A perda da simetria destas novas configurações relativamente ao caso em que a nova conduta encontra-se localizada na zona central acarreta uma maior interferência com as paredes.

De acordo com estudo anterior mantém-se a distância longitudinal de $5d$ entre os eixos das condutas. Pretende-se averiguar se esta distância mínima longitudinal continua suficiente e também avaliar se a proximidade das condutas com as paredes laterais acarreta alguma diferença significativa no escoamento.

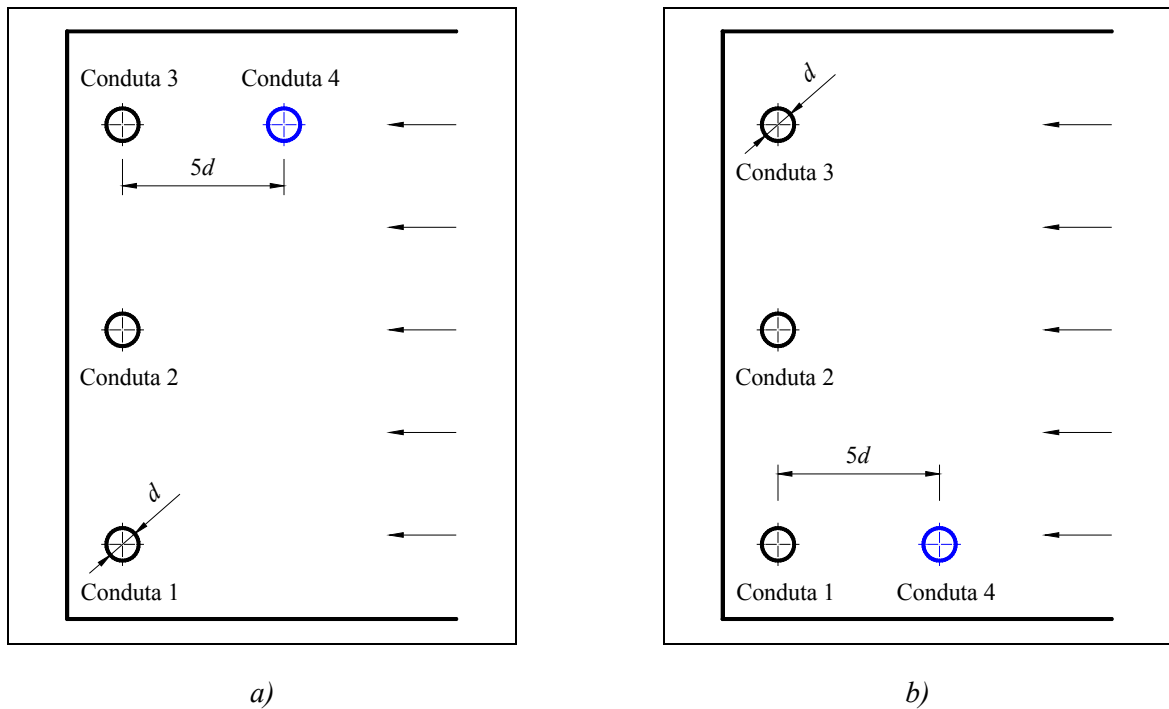


Figura 5.8 – Aumento da capacidade de bombagem em 33%: a) configuração 2; b) configuração 3.

Na figura 5.9 representa-se o campo de vorticidade junto às condutas de aspiração. A vorticidade junto às condutas pré-existentes (conduta 1, 2 e 3) apresenta valores semelhantes aos verificados no caso em que existem apenas as três condutas de aspiração no domínio de cálculo (figura 5.28-a). No entanto, próximo das paredes laterais existe uma maior perturbação que no entanto pela intensidade exibida não parece pôr em causa o bom funcionamento da câmara de aspiração.

A comparação entre as duas configurações permite constatar que vorticidade é mais intensa na zona entre as condutas 3 e 4 no primeiro caso (figura 5.9-a). Este facto está ligado à geometria da câmara de aspiração. Na figura 5.9-b as condutas 1 e 4 estão colocadas numa zona influenciada pelo aumento de área da câmara de aspiração (Anexo B) que provoca por si só deflexão nas linhas de corrente. Na figura 5.9-a constata-se que na zona junto ao eixo de simetria da tomada de água (onde estão colocadas as condutas 3 e 4) as linhas de corrente a jusante das condutas apresentam pequena curvatura. Desta forma o escoamento está sujeito a maior rotação quando atinge a zona entre as condutas 3 e 4 (figura 5.9-a), a escolha desta configuração induz assim valores de vorticidade superiores.

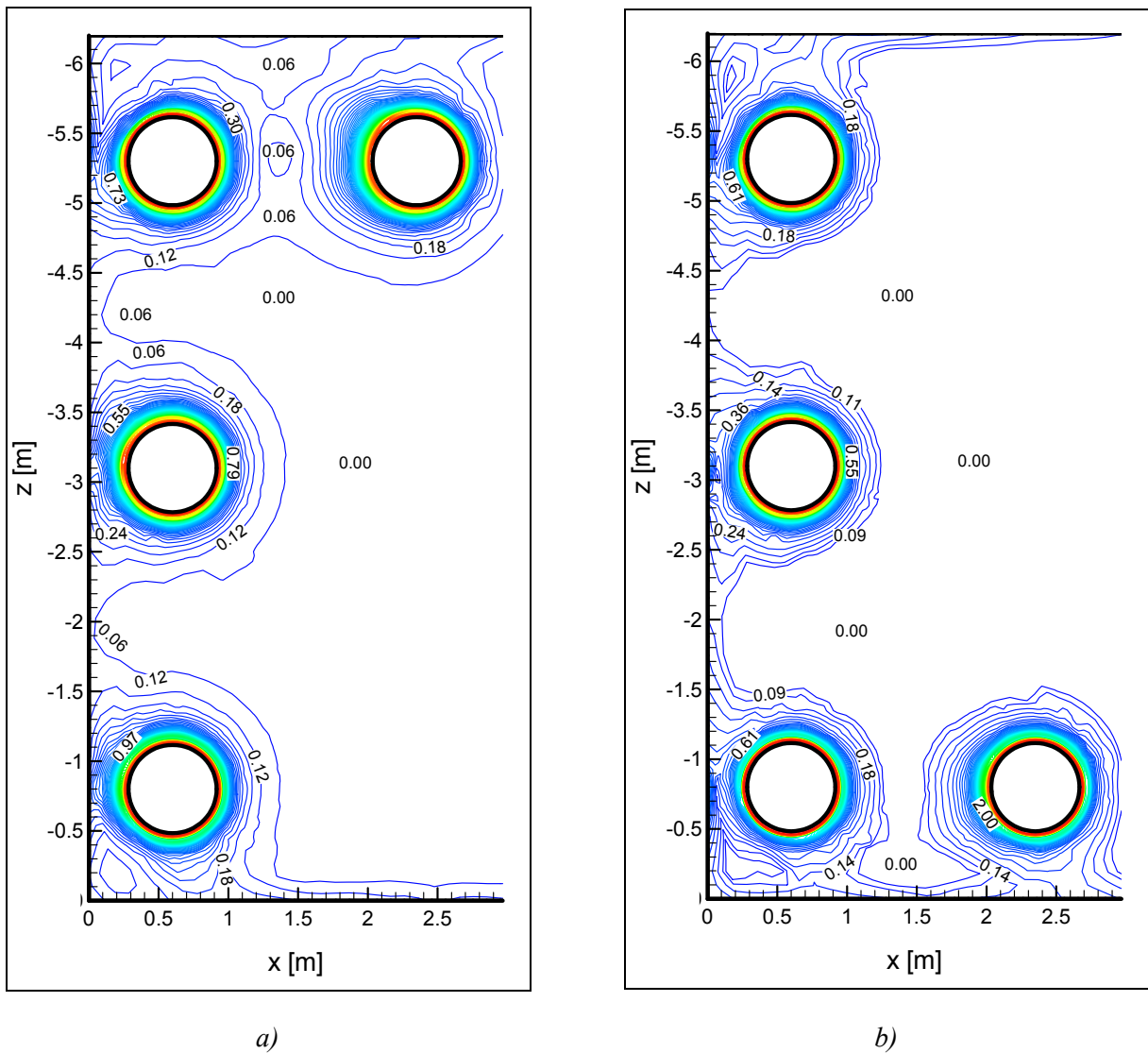


Figura 5.9 – Campo de vorticidade [1/s] no plano xz ($y = 0,7$ m): a) configuração 2; b) configuração 3.

No que diz respeito à deformada da superfície livre, os resultados para estas duas últimas configurações são praticamente idênticos aos obtidos com a nova conduta de aspiração na zona central (figura 5.7) o que é consistente pois o caudal escoado é igual nos três casos.

Efectuado o estudo sobre a influência da distância e do posicionamento longitudinal, coloca-se agora a nova conduta de aspiração entre as condutas já existentes (figura 5.10). Mantêm-se os parâmetros numéricos, as discretizações e a metodologia de análise.

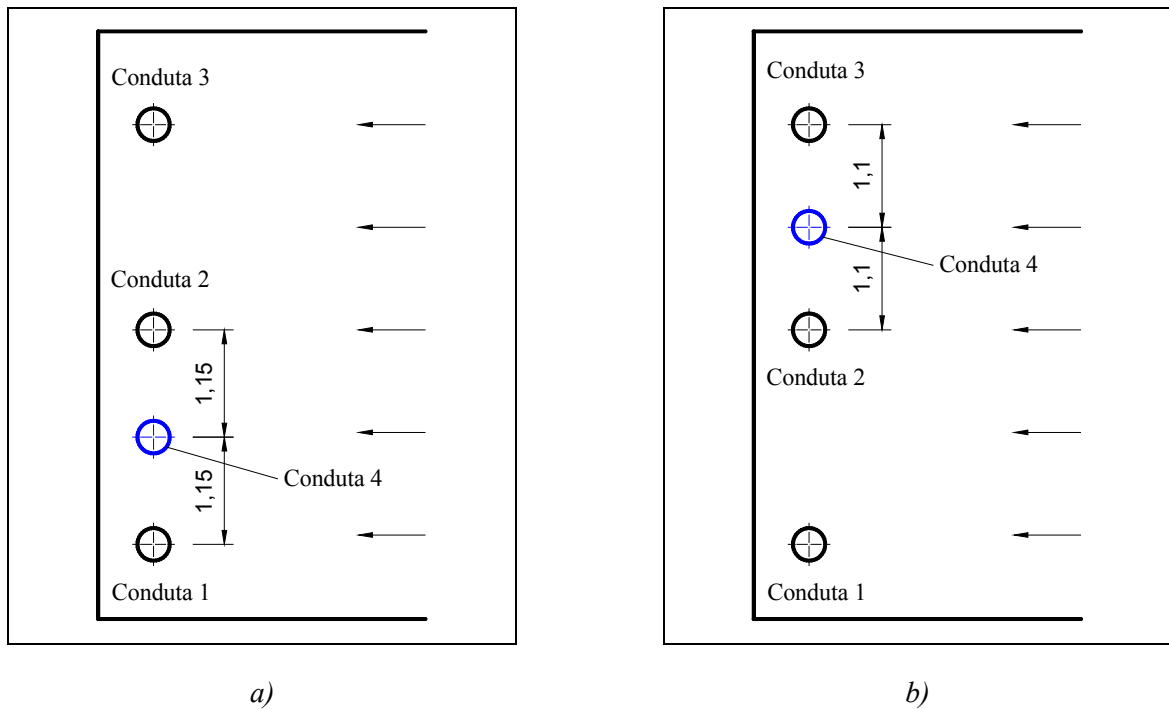
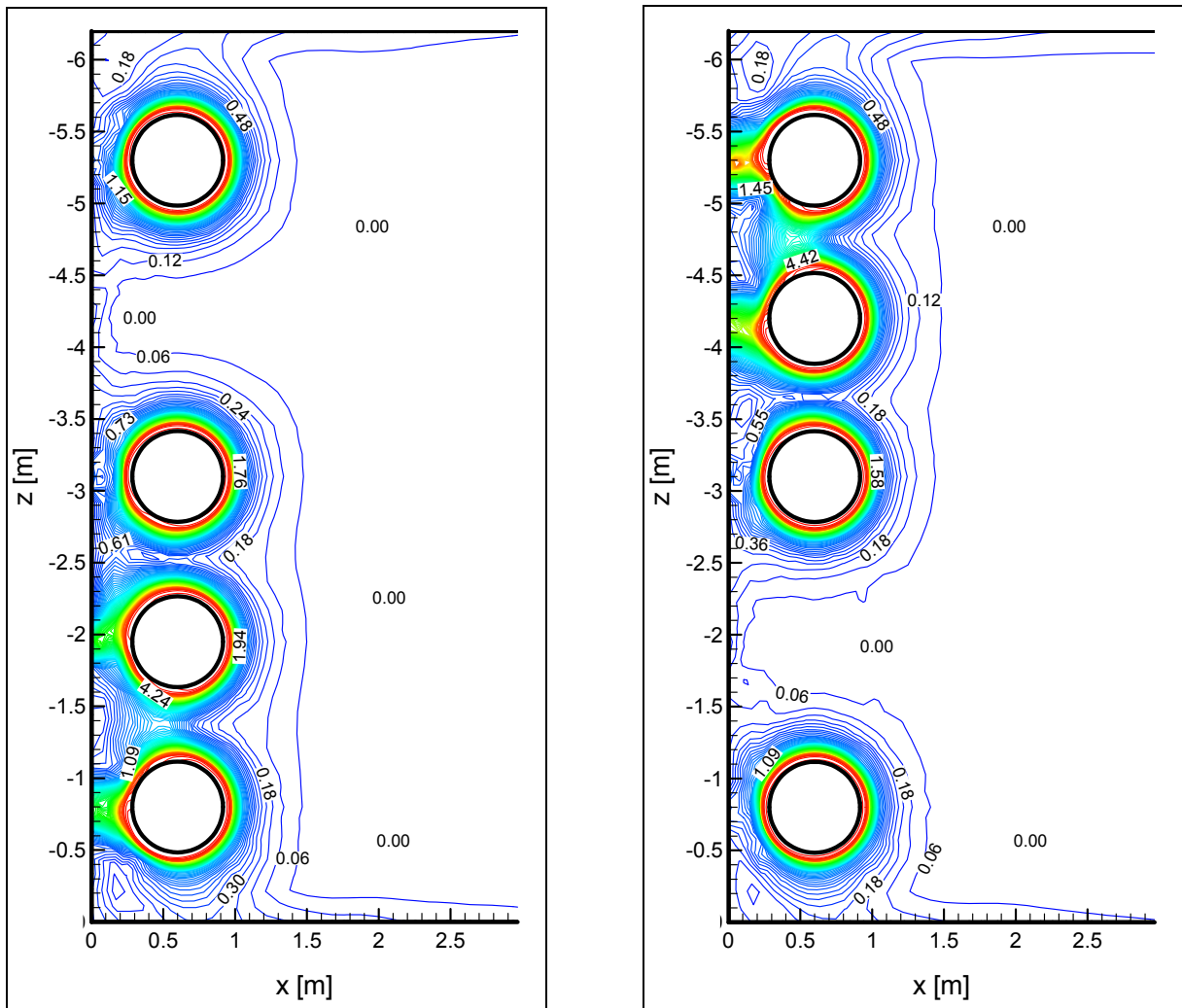


Figura 5.10 – Aumento da capacidade de bombagem em 33%: a) configuração 4; b) configuração 5.

A análise dos resultados é feita através da observação e comparação do campo de vorticidade junto às condutas de aspiração (figura 5.11).

A análise da figura 5.11 permite concluir que introdução da nova conduta provoca uma elevada perturbação no escoamento na zona contígua às três condutas. Constata-se assim que a perturbação ao escoamento no interior da câmara é maior quando as novas condutas são introduzidas na direcção transversal a mesma. Não obstante as simulações numéricas o confirmarem este resultado era espectável através de uma simples análise baseada na deflexão previsível das linhas de corrente.



a)

b)

Figura 5.11 – Campo de vorticidade [1/s] no plano xz ($y = 0,7$ m): a) configuração 4; b) configuração 5.

Nas próximas simulações numéricas ensaiam-se configurações geométricas intermédias e avalia-se a perturbação junto às condutas de aspiração (figura 5.12), aumenta-se a distância longitudinal do eixo da conduta relativamente a parede mais a jusante ($x = 0$ m).

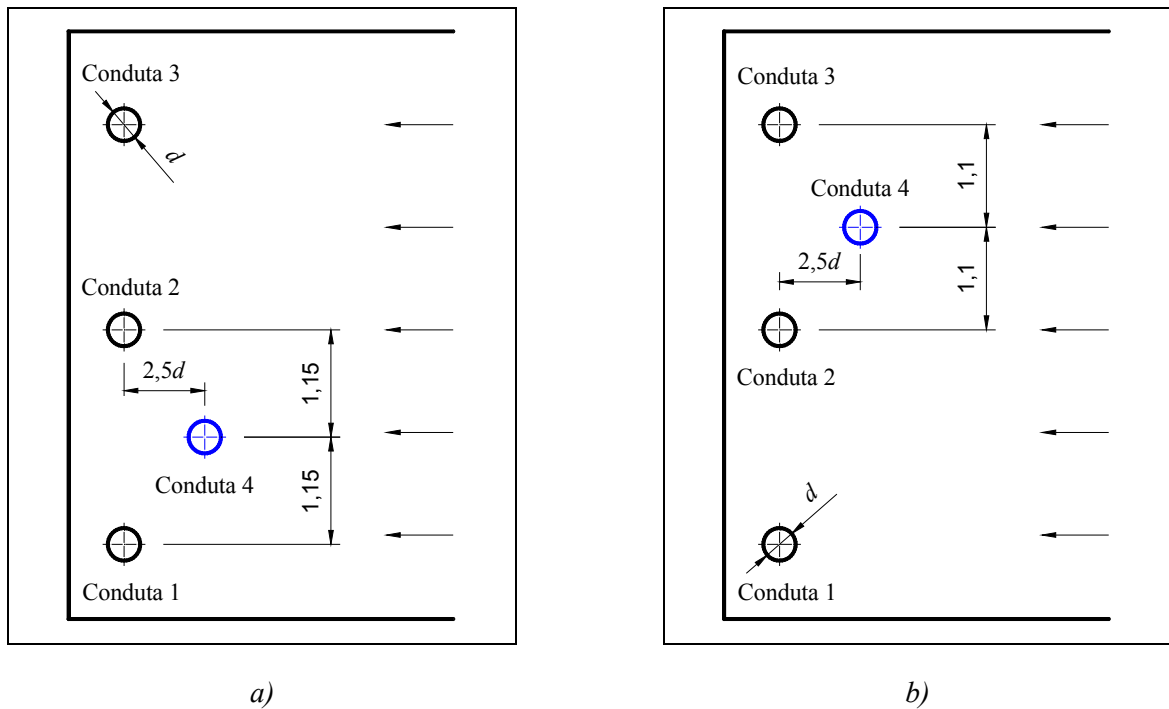


Figura 5.12 – Aumento da capacidade de bombagem em 33%: a) configuração 6; b) configuração 7.

Da análise do campo de vorticidade, representado na figura 5.13, constata-se, como previsto, uma redução significativa na intensidade do campo de vorticidade entre a nova conduta e as pré-existentes relativamente às configurações 4 e 5 (figura 5.11). No entanto da comparação com a figura 5.28-a (configuração inicial) verifica-se que existe ainda uma perturbação significativa no escoamento e conseqüentemente uma possível interferência no funcionamento entre as bombas, pois o campo de vorticidade não permanece circular as novas condutas de aspiração.

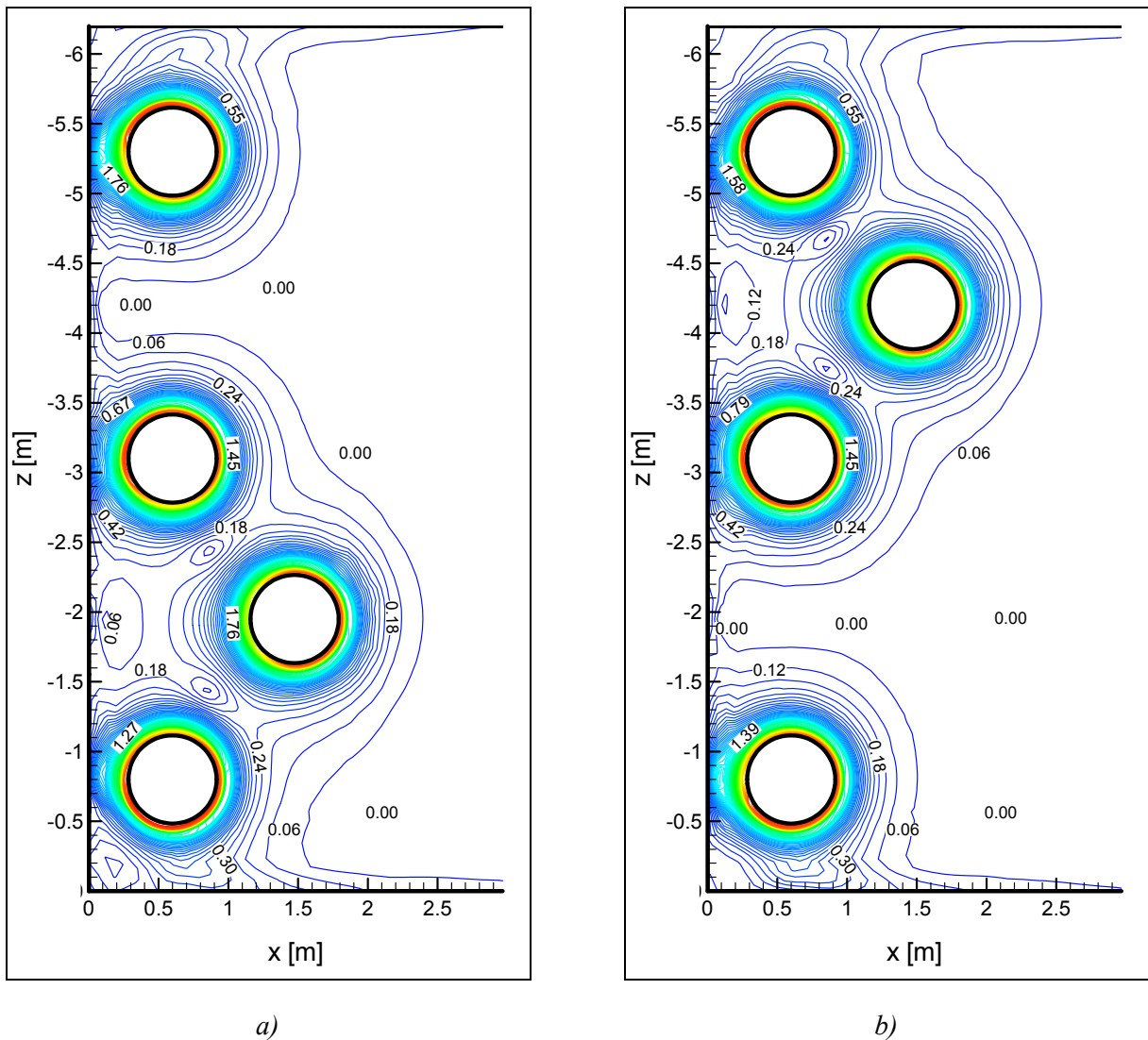


Figura 5.13 – Campo de vorticidade [1/s] no plano xz ($y = 0,7$ m): a) configuração 6; b) configuração 7.

Na simulação seguinte, para diminuir esta perturbação, aumenta-se a distância do eixo da nova conduta de aspiração para $5d$. Na figura 5.14 apresenta-se a campo de vorticidade junto às condutas de aspiração.

Da observação da figura 5.14 constata-se que o campo de vorticidade permanece circular junto às novas condutas de aspiração o que significa que praticamente não interagem. Conclui-se ainda que a deformada da superfície livre é praticamente idêntica em todos os casos pelo que se optou por apresentar apenas para o caso com a nova conduta de aspiração na zona central (figura 5.7).

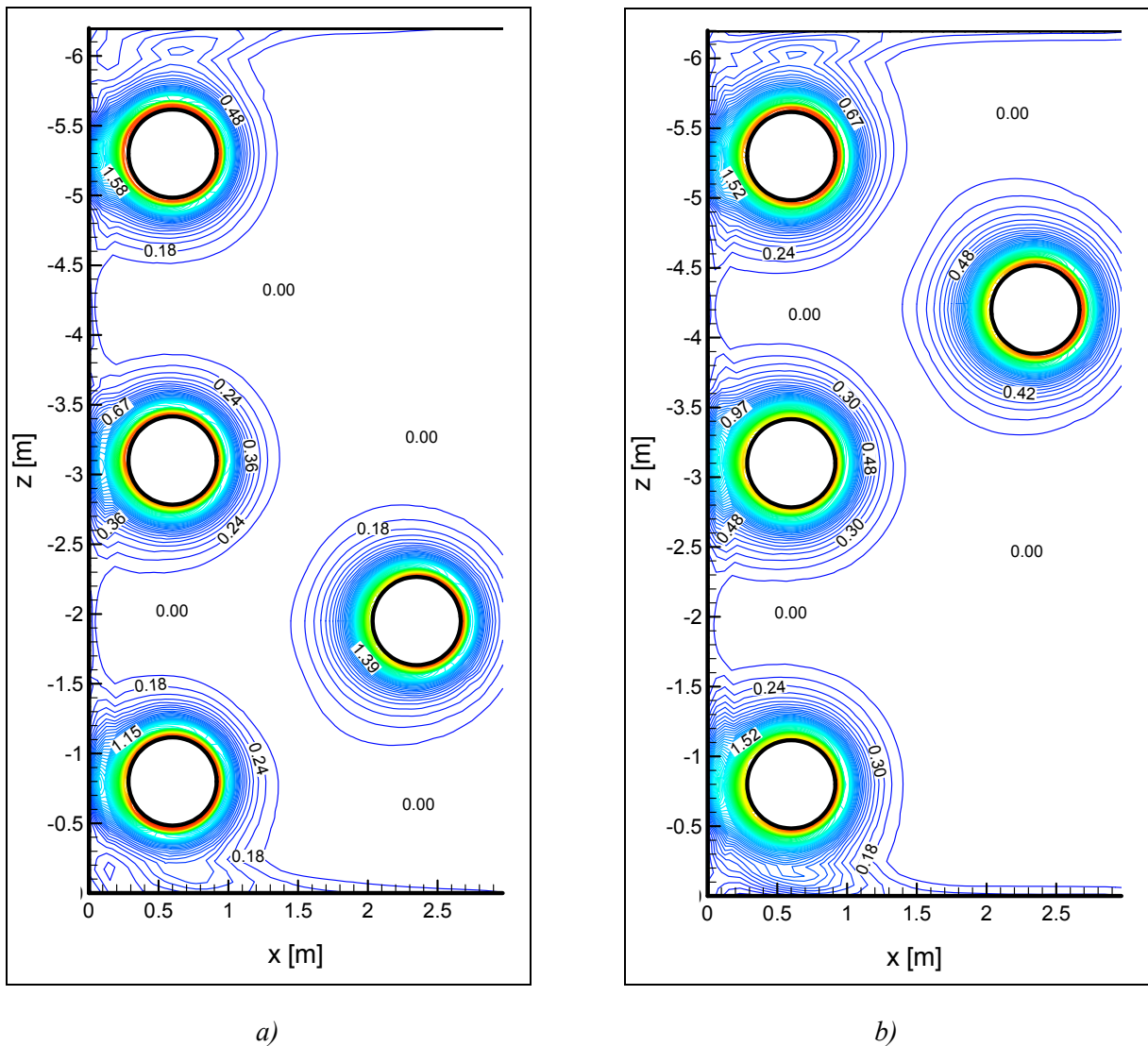


Figura 5.14 – Campo de vorticidade [1/s] no plano xz ($y = 0,7$ m): a) configuração 8; b) configuração 9.

As simulações numéricas realizadas demonstram que o posicionamento da nova conduta correspondente às configurações 2, 3, 8 e 9 permite um aumento da capacidade de bombeamento de 33% sem a necessidade de alterar geometricamente a câmara de aspiração da central de adução do Roxo.

5.1.2 Aumento da capacidade de bombagem em 66%

O aumento da capacidade de bombagem em 66% obriga à introdução de mais quatro condutas na câmara de aspiração esta alteração corresponde no domínio de cálculo, devido à condição de simetria, à introdução de mais duas condutas.

Inicia-se o estudo de forma análoga, as novas condutas são colocadas na zona intermédia da câmara de aspiração e desalinhas com as condutas pré-existentes (figura 5.15). Esta disposição é vulgarmente designada por condutas em quincôncio.

Pretende-se com esta configuração averiguar se a distância longitudinal de $5d$ e transversal de $1,1d$ e $1,15d$ entre os eixos das condutas continua adequada.

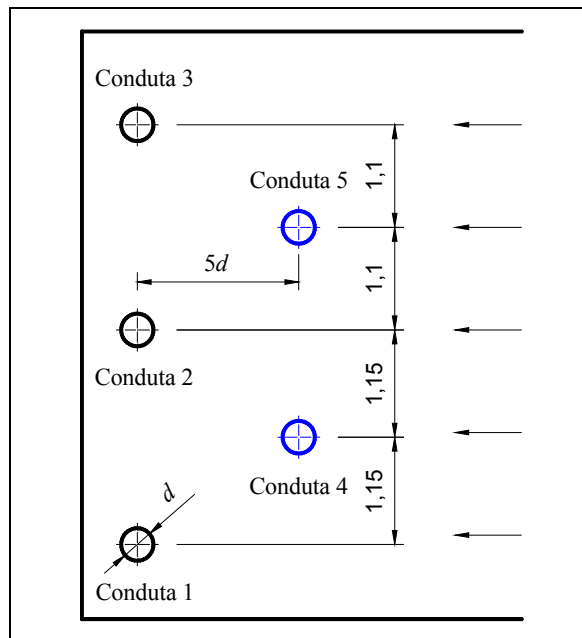


Figura 5.15 – Aumento da capacidade de bombagem em 66% - configuração 1.

A discretização respeita os critérios gerais referidos no Capítulo 4 sendo mais cuidada nas zonas entre as condutas de aspiração com refinamento radial progressivo. Nestas zonas impôs-se um maior número de elementos, o que permite a convergência dos resultados e consequentemente o cálculo preciso dos parâmetros do escoamento. A malha do domínio de cálculo é constituída por 1078475 elementos e o tempo de cálculo é aproximadamente de 98 horas.

A análise dos resultados numéricos é feita de forma semelhante, a partir da observação do campo de vorticidade (figura 5.16).

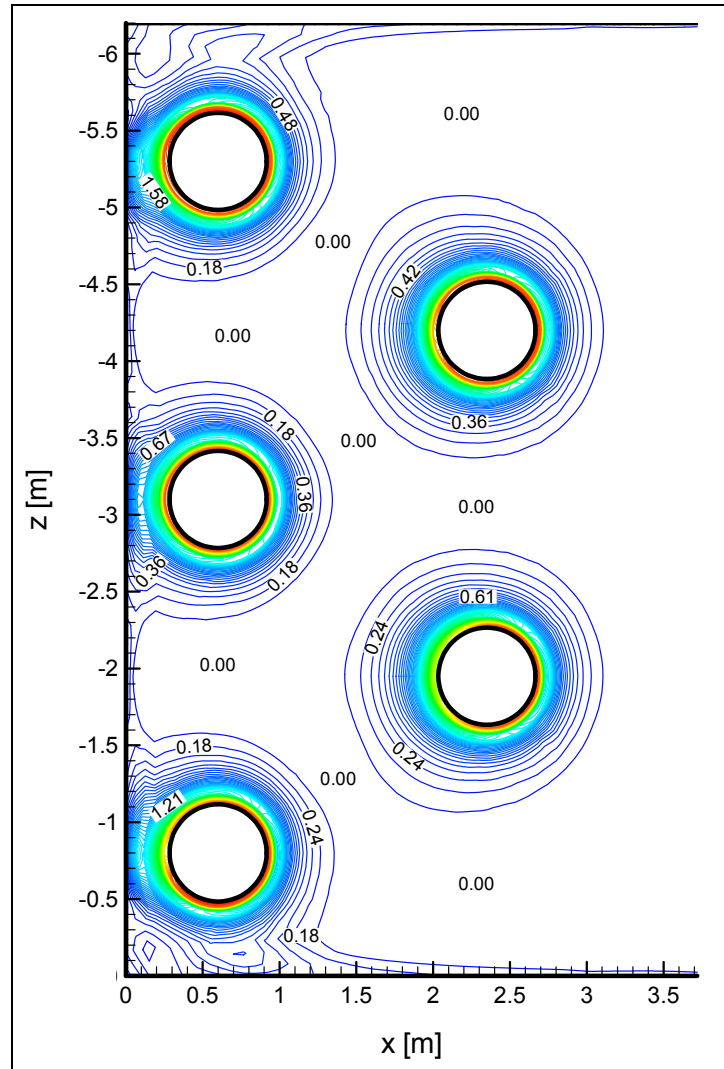


Figura 5.16 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).

Do resultado da simulação numérica realizada observa-se que não existe perturbação relevante no escoamento entre as condutas de aspiração (figura 5.16). Observa-se também que o campo de vorticidade junto às condutas pré-existentes é praticamente igual ao caso apresentado na figura 5.28-a (correspondente a configuração inicial) e permanece praticamente circular junto às novas condutas.

A representação da deformada da superfície livre (figura 5.17) permite constatar que esta configuração não afecta o adequado funcionamento da central de adução no que diz respeito à

entrada de ar nas condutas, pois existe submergência suficiente e vorticidade moderada. No entanto, nota-se uma maior deflexão da superfície livre na vizinhança das condutas relativamente ao caso de aumento da capacidade de bombagem em 33%.

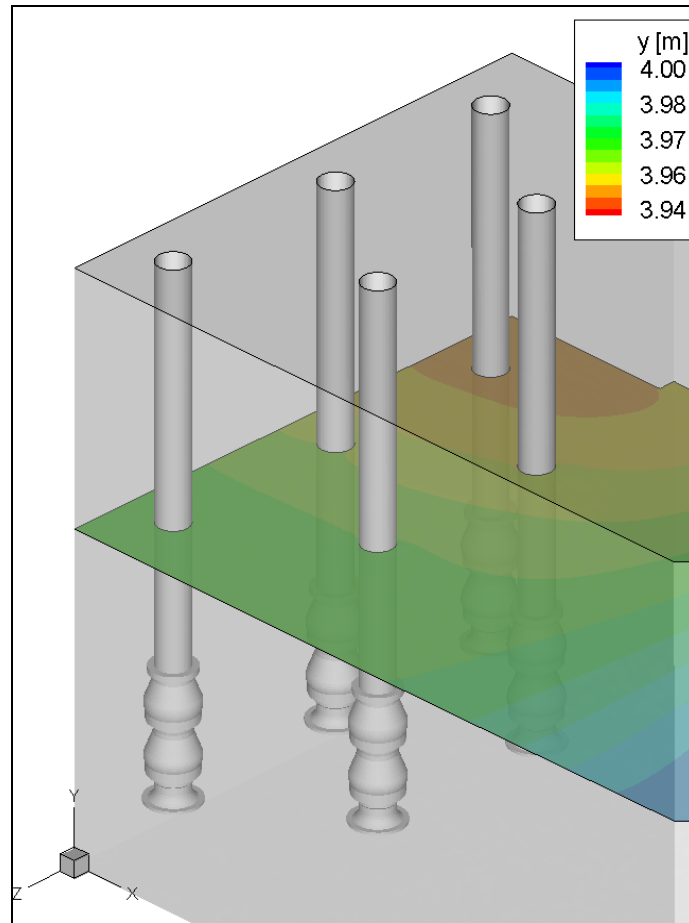


Figura 5.17 – Deformada da superfície livre na vizinhança das condutas de aspiração (nível da superfície livre em repouso: 4 m).

Embora a solução anterior pareça a mais adequada existem, no caso da central de adução do Roxo, dificuldades de ordem construtiva na fixação das condutas. Desta forma decidiu-se analisar o escoamento para configurações que embora menos eficientes do ponto de vista hidráulico são de mais fácil implementação prática.

Na figura 5.18 apresentam-se configurações que permitem efectuar o suporte em zonas estruturais mais robustas o que corresponde alinhar as novas condutas de aspiração com as pré-existentes.

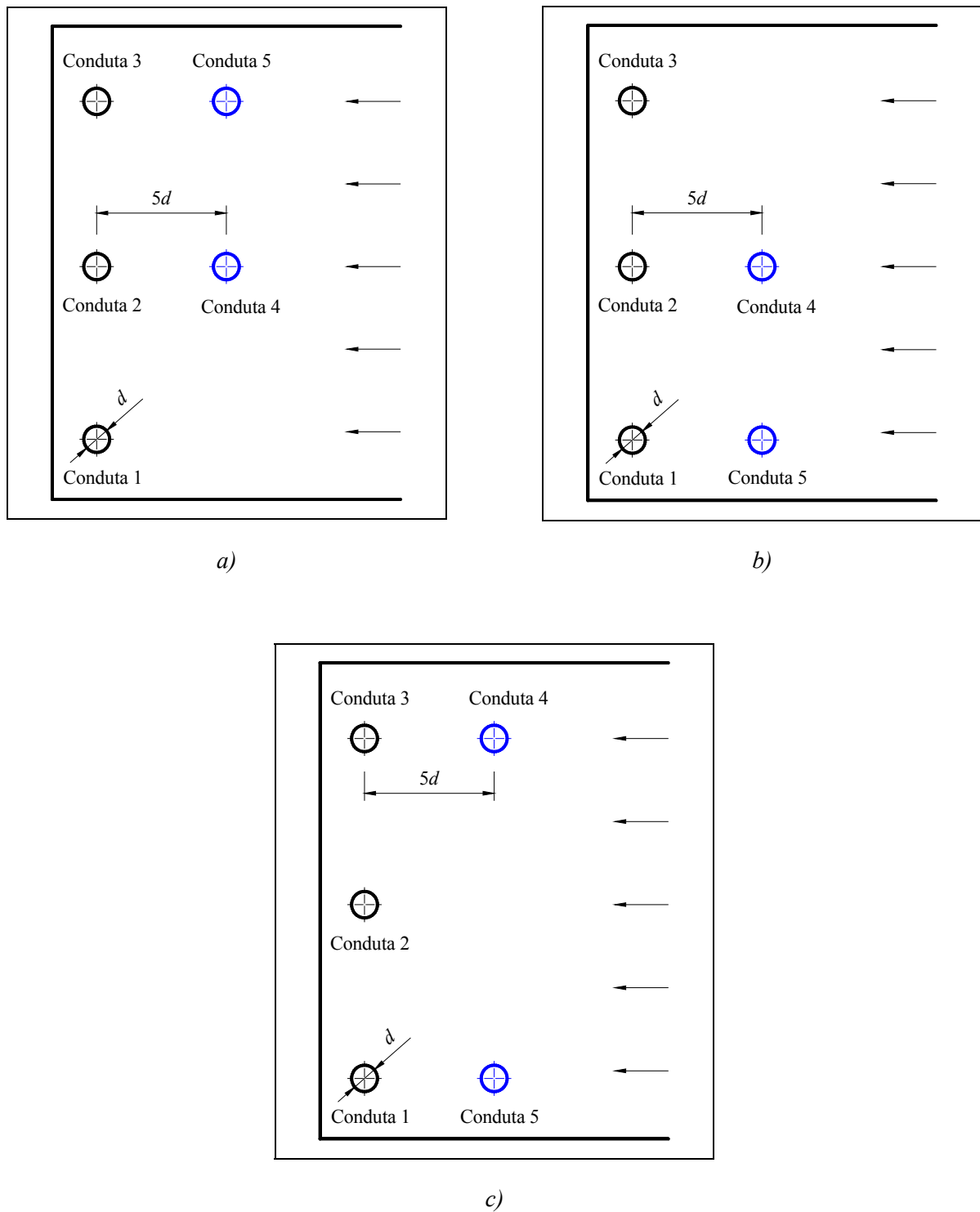
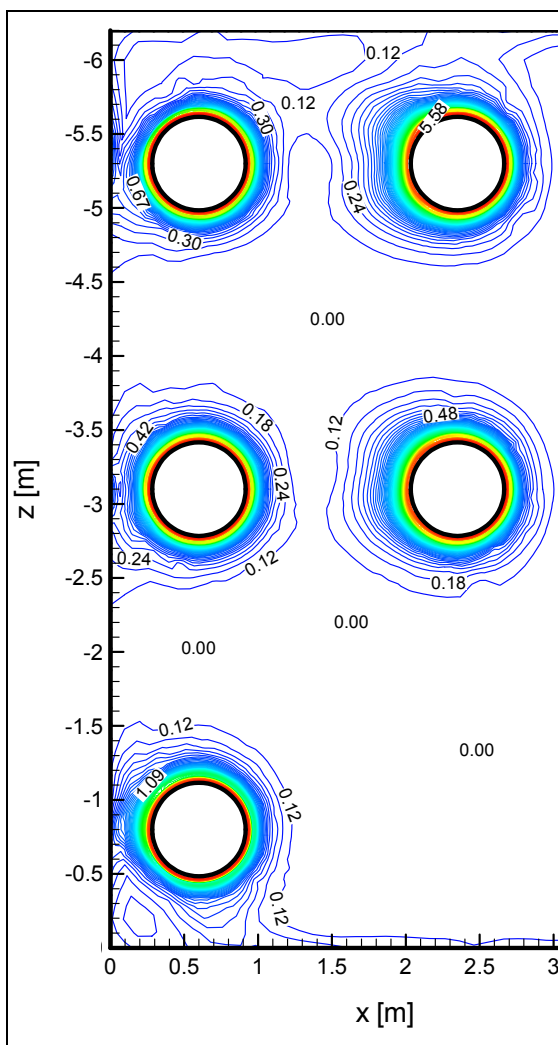


Figura 5.18 – Aumento da capacidade de bombagem em 66%: a) configuração 2; b) configuração 3; c) configuração 4.

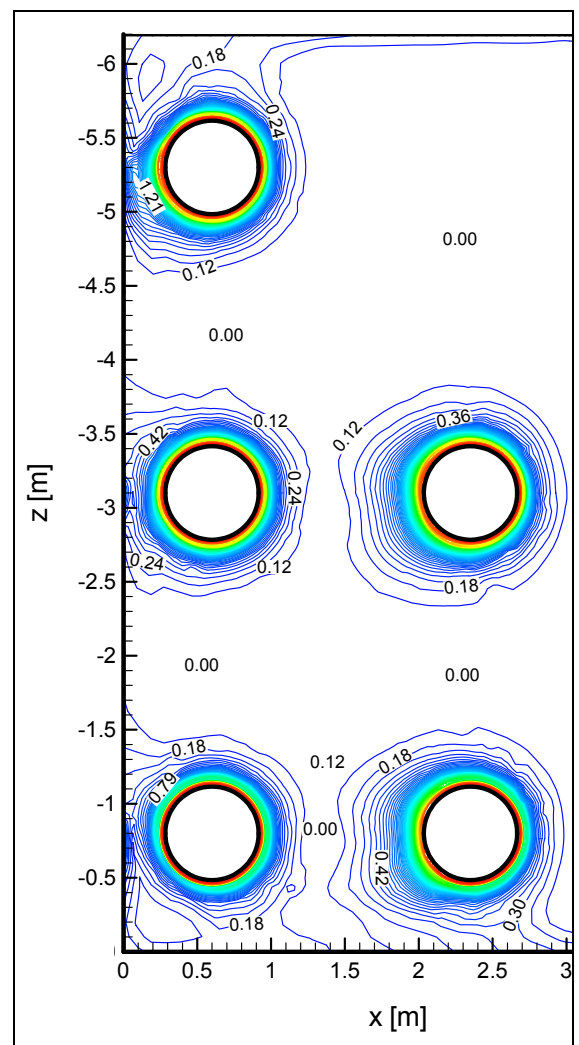
Da análise dos campos de vorticidade (figura 5.19-a, b e c) verifica-se que existe perturbação no escoamento na zona em que as condutas se encontram mais próximas das paredes. Nas

zonas onde as linhas de iso-vorticidade se apresentam circulares a interação entre as condutas tem efeitos desprezáveis. Na comparação da figura 5.19 e da figura 5.28-a (seis condutas de aspiração) verifica-se que o escoamento em trono das condutas pré-existentes mantém-se semelhante.

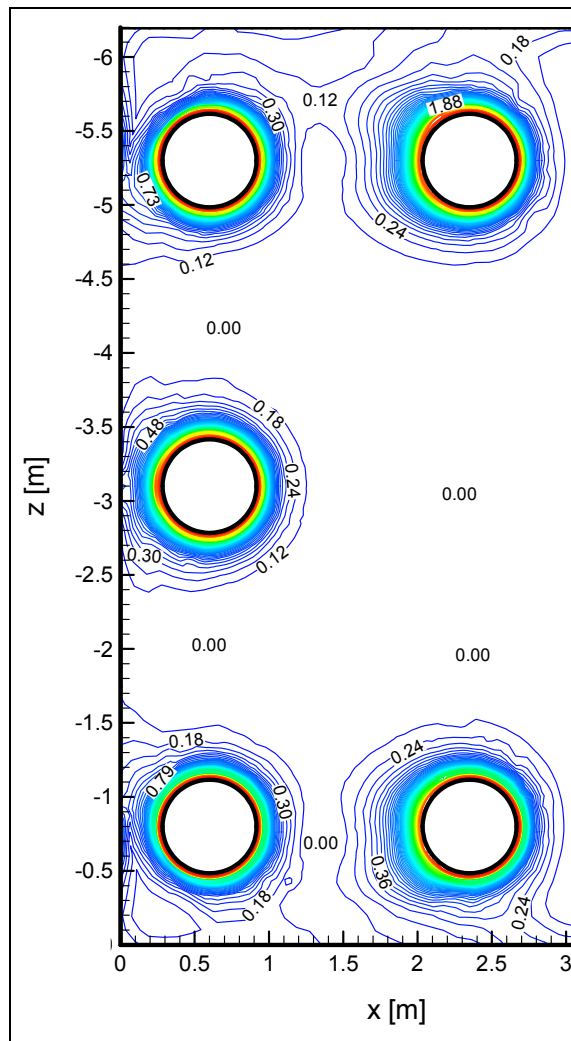
No que diz respeito à deformada da superfície livre, os resultados para estas três últimas configurações são praticamente idênticos aos obtidos com as duas novas condutas de aspiração em quincôncio (figura 5.17) o que é consistente pois o caudal escoado é igual nos quatro casos.



a)



b)



c)

Figura 5.19 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m): a) configuração 2; b) configuração 3; c) configuração 4.

De acordo com as simulações numéricas realizadas é possível aumentar em 66% a capacidade de bombagem sem ter a necessidade de alterar geometricamente a câmara de aspiração da central de adução do Roxo.

5.1.3 Aumento da capacidade de bombagem em 100%

O aumento da capacidade de bombagem em 100% corresponde à simulação com o dobro das condutas iniciais (figura 5.20). Se a tomada de água conseguir responder à esta situação

significa que foi projectada, embora seguindo as normas, com um coeficiente de segurança superior a 100%. A configuração foi escolhida mantendo a distância $5d$ entre as condutas de aspiração (figura 5.20).

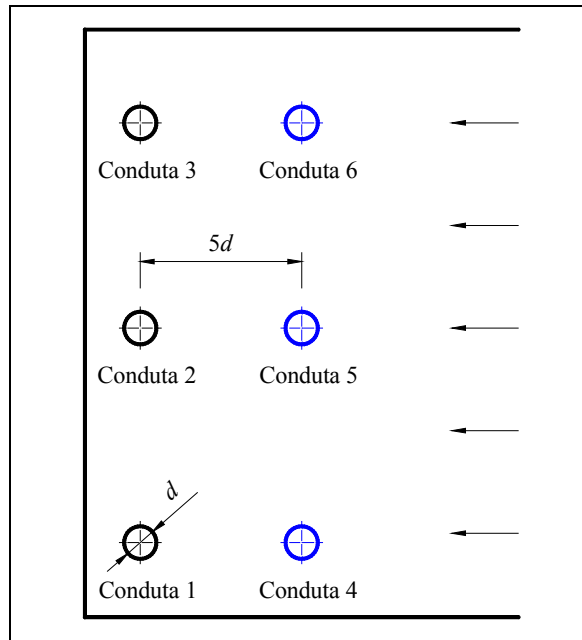


Figura 5.20 – Aumento da capacidade de bombagem em 100%.

O espaço reduzido entre as condutas implicou uma alteração significativa da discretização espacial. No entanto, mantiveram-se os mesmos critérios na construção da malha o que originou um aumento substancial do número de elementos e consequentemente do tempo de cálculo. A malha do domínio de cálculo é constituída por 1378475 elementos e o tempo de cálculo é aproximadamente de 154 horas.

A figura 5.21 apresenta o campo de vorticidade na vizinhança das condutas de aspiração.

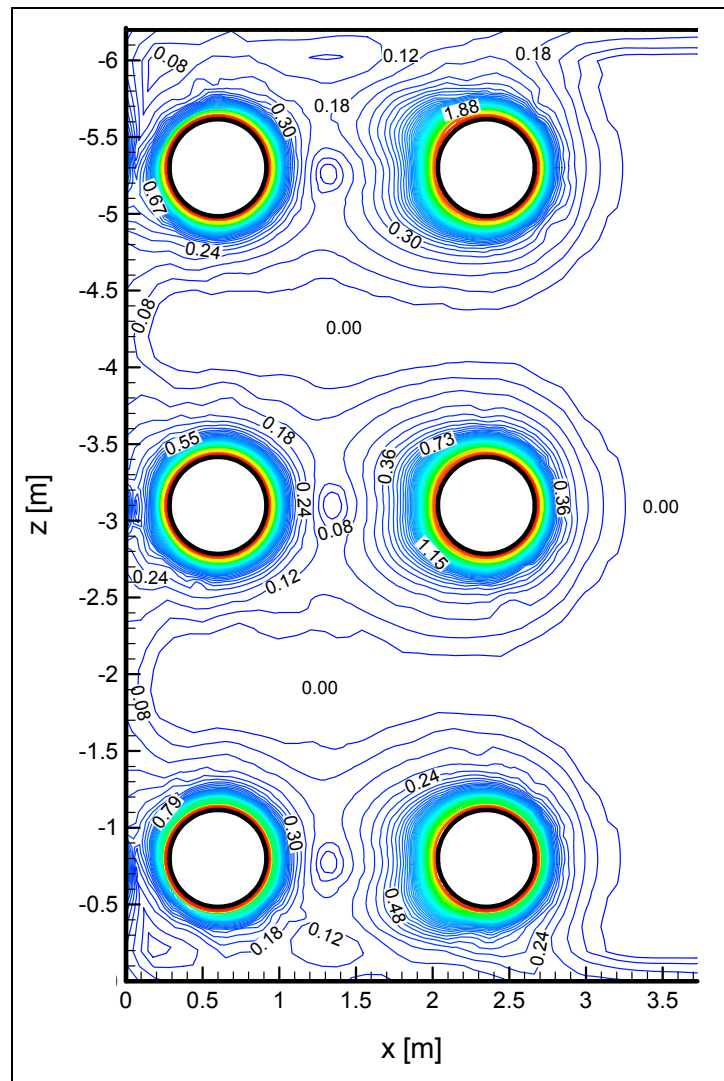


Figura 5.21 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).

O campo de vorticidade (figura 5.21) permite visualizar uma interferência relevante no escoamento (o campo de vorticidade não permanece circular junto às novas condutas). No entanto a câmara de aspiração tem dimensão que permite afastar as condutas. Seguidamente apresentam-se os resultados para a distância longitudinal para $6d$, na figura 5.22 o campo de vorticidade e na figura 5.23 a deformada da superfície livre.

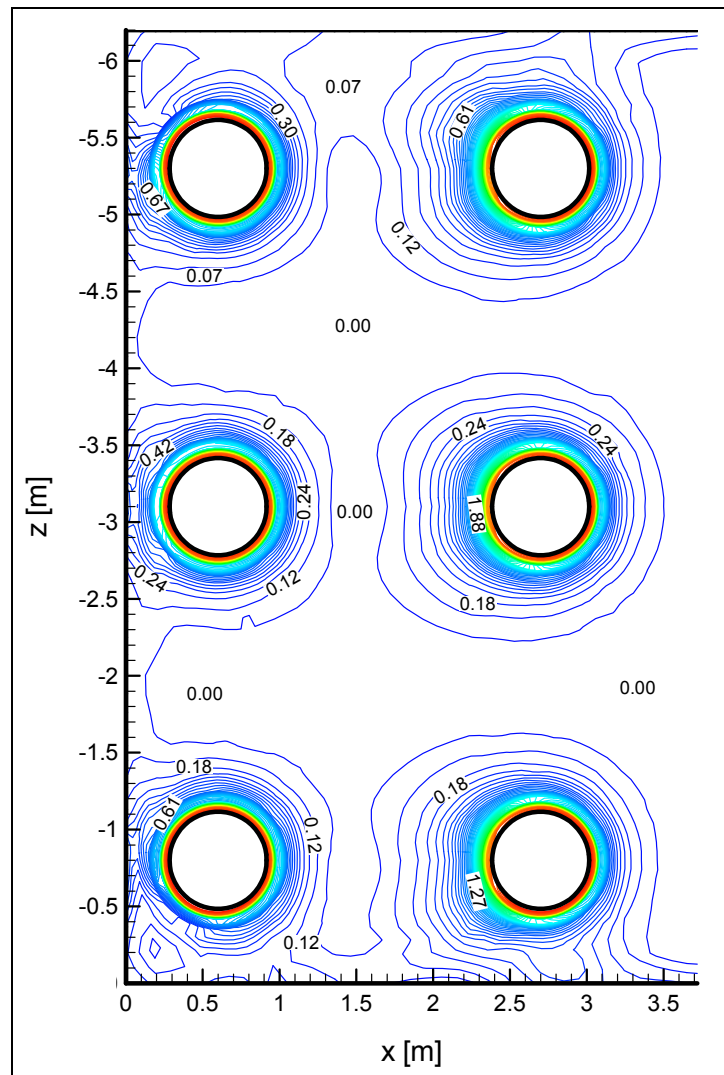


Figura 5.22 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).

Constata-se uma redução significativa na intensidade do campo de vorticidade entre as novas condutas e as pré-existentes. Da comparação com o caso inicial, figura 5.28-a (seis condutas de aspiração) verifica-se que o escoamento na região junto às condutas pré-existentes é semelhante.

Da observação conjunta da figura 4.18-a (seis bombas em funcionamento) e figura 5.23 (doze bombas) conclui-se que na zona próxima às condutas de aspiração não existem diferenças significativas na superfície livre. A deflexão máxima da superfície livre é: no primeiro caso 0,04 m e no segundo 0,08 m sendo a submergência ainda suficiente.

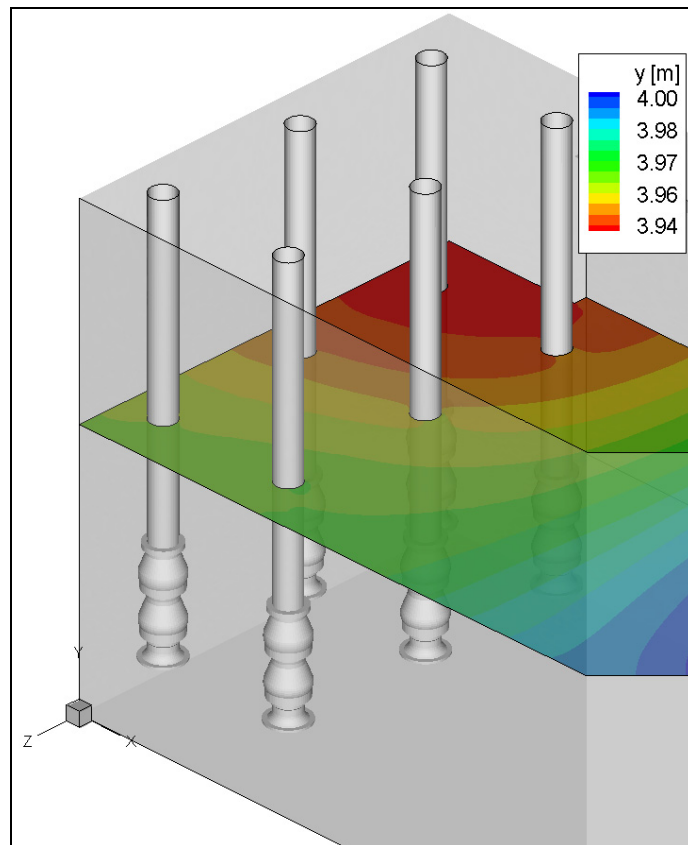


Figura 5.23 – Deformada da superfície livre na vizinhança das condutas de aspiração (nível da superfície livre em repouso: 4 m).

Conclui-se então que a tomada de água é ainda eficiente quando se aumenta a capacidade de bombagem para dobro.

5.1.4 Aumento da capacidade de bombagem 200%

O objectivo deste estudo é essencialmente académico, onde pretende-se testar a capacidade do programa *FLUENT* na simulação de escoamentos viscosos com elevada vorticidade e escoamento bifásico eminente.

Na sequência do estudo anterior considera-se uma configuração geométrica com as condutas de aspiração alinhadas longitudinalmente com uma distância de $6d$ entre os seus eixos (figura 5.24).

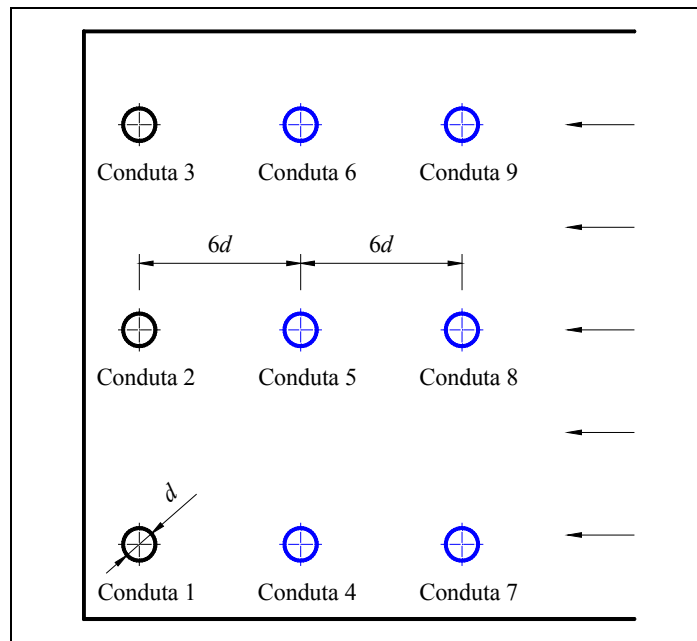


Figura 5.24 – Aumento da capacidade de bombagem em 200%.

Verifica-se através do campo de vorticidade (figura 5.25) que esta configuração provoca elevada assimetria no campo de vorticidade entre as novas condutas. Com efeito, a jusante das condutas 7, 8 e 9 nota-se um efeito de transporte, “esteira”, que contribui para a difusão da vorticidade decorrente do escoamento principal.

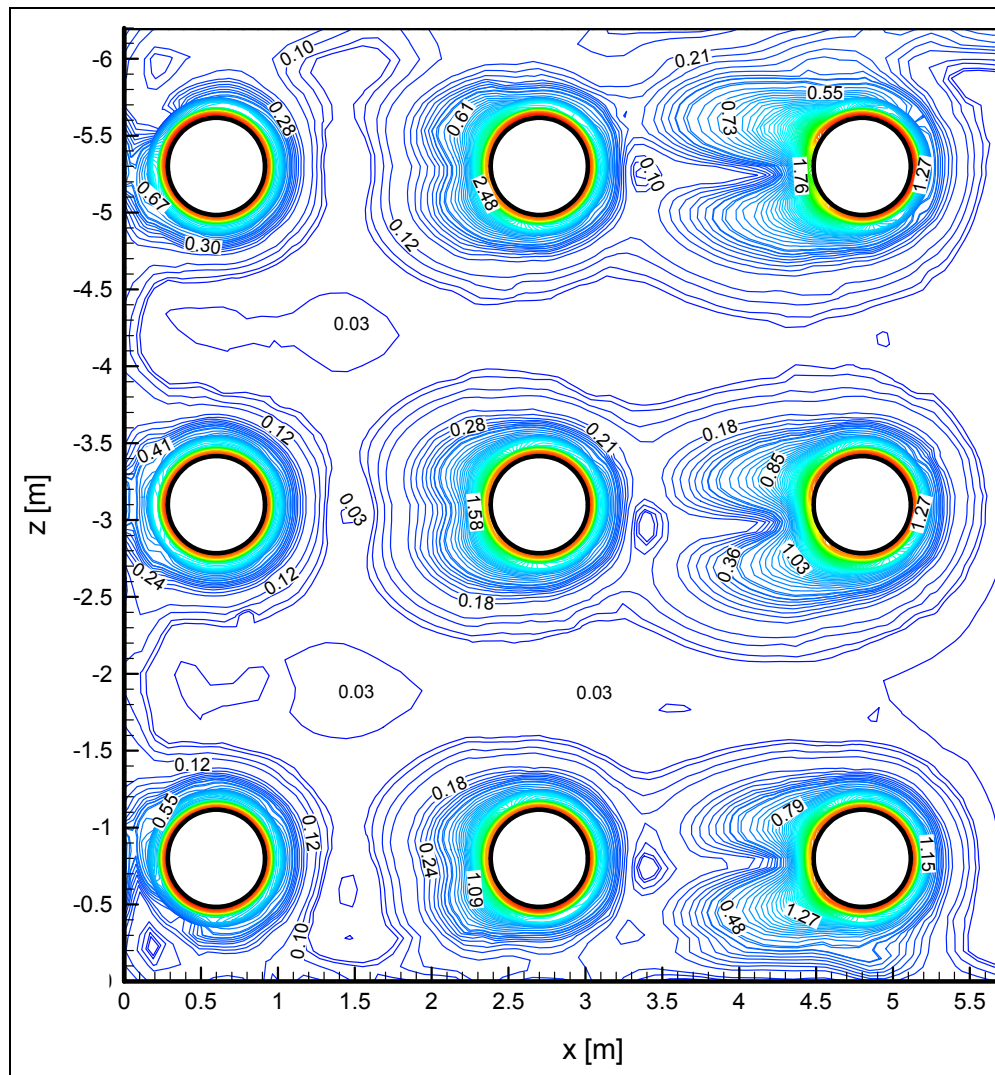


Figura 5.25 – Campo de vorticidade [1/s]: plano xz ($y = 0,7$ m).

Não obstante o elevado aumento da capacidade de bombagem ao nível da superfície livre não existe ainda intensidade da vorticidade que possa induzir a entrada de ar para as condutas de aspiração (figura 5.26). No entanto, nota-se ainda que junto às condutas de aspiração 3, 6 e 9 a perturbação se faz sentir ao nível da superfície livre. Esta perturbação provoca uma pequena depressão da superfície livre. É de realçar que com esta depressão a deflexão máxima da superfície livre é 0,12 m.

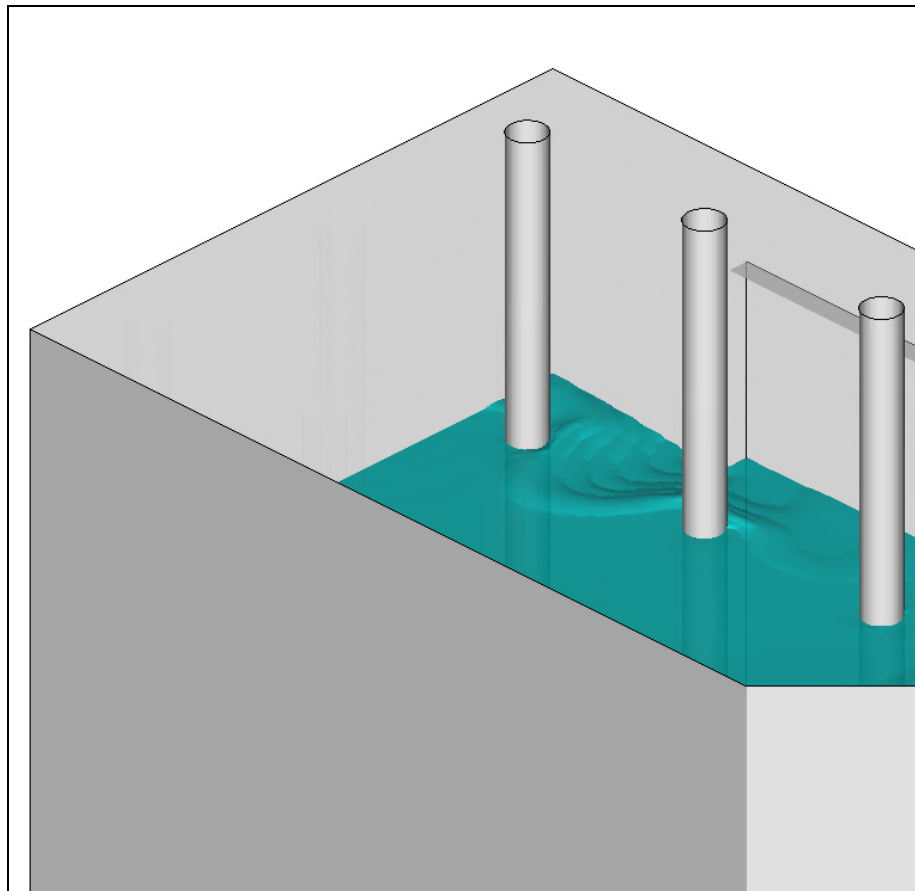


Figura 5.26 – Deformada da superfície livre junto às condutas 3, 6 e 9.

5.2 Câmara de aspiração curta

Esta secção tem como principal objectivo ilustrar a importância da modelação numérica como ferramenta de teste no dimensionamento das tomadas de água. Pretende-se então verificar que uma câmara de aspiração mais curta, correspondente à redução de 8,5 m para 1,2 m na sua direcção longitudinal (figura 5.27) permite assegurar o caudal de projecto.

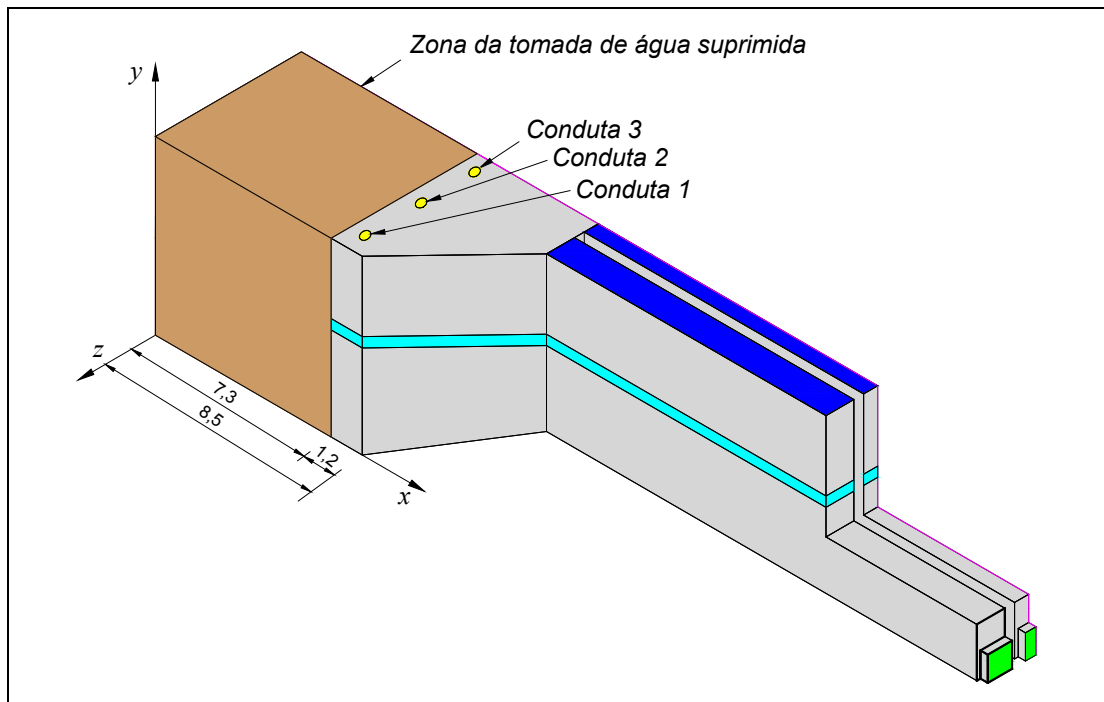


Figura 5.27 – Domínio de cálculo reduzido.

A descrição pormenorizada desta configuração geometria encontra-se em Anexo B. Esta alteração à geometria da câmara de aspiração (figura 5.27) reduz a distância das condutas relativamente ao canal de entrada mantendo-se todas as outras dimensões.

Na discretização dos elementos entre as condutas de aspiração impôs-se um refinamento progressivo até a zona a jusante do canal de entrada o que permite a convergência e melhor precisão dos resultados numéricos.

Para avaliar a influência da proximidade das condutas de aspiração relativamente à secção de entrada apresenta-se na figura 5.28 o campo de vorticidade na geometria pré-existente e na alterada.

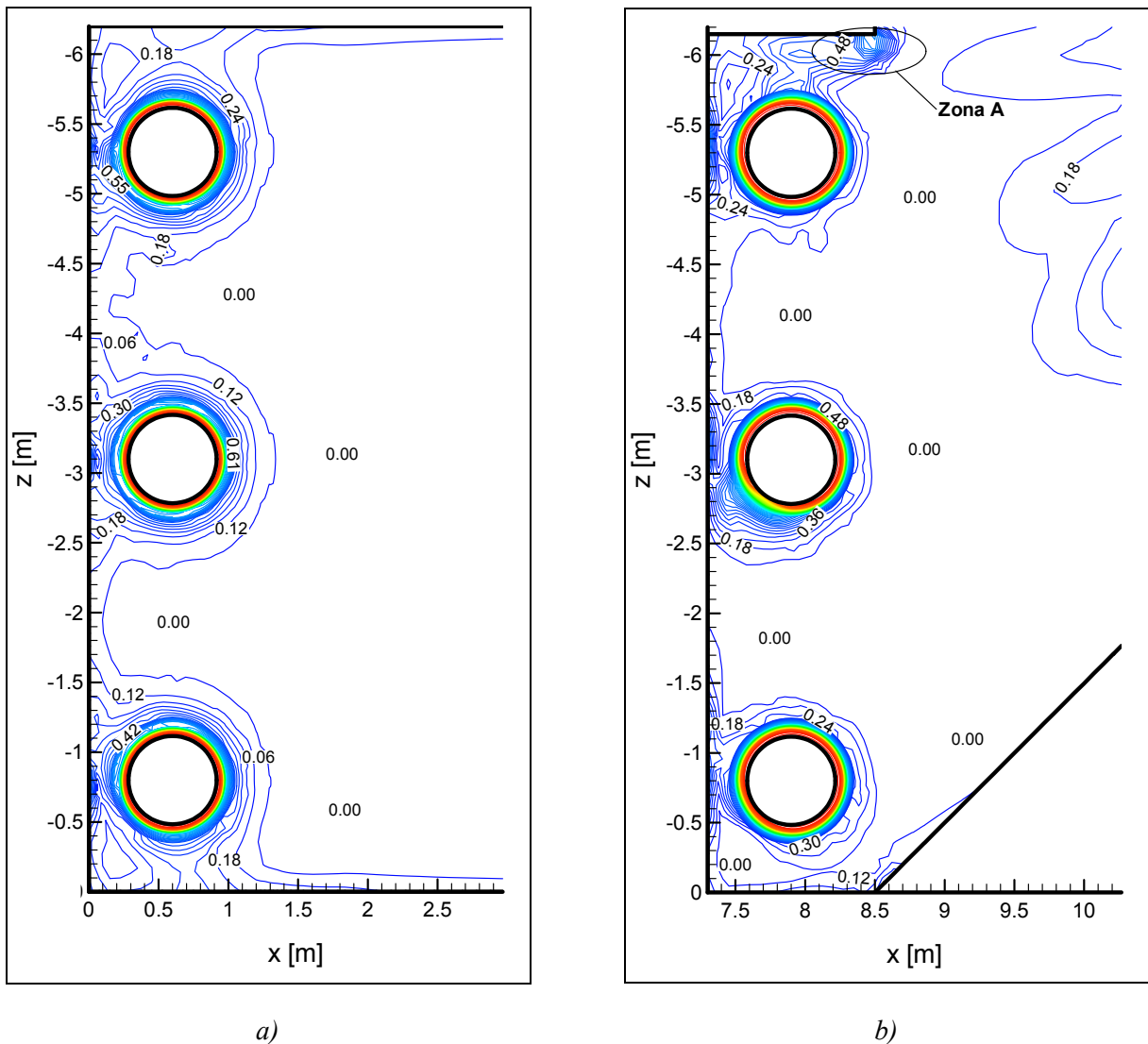


Figura 5.28 – Campo de vorticidade [1/s] no plano xz ($y = 0,7$ m): a) geometria pré-existente; b) geometria alterada.

O escoamento apresenta uma diferença substancial na zona adjacente a conduta 3 observando-se entre esta e as paredes um elevado gradiente no campo de vorticidade. Na zona adjacente no início da parede longitudinal central (Zona A, figura 5.28 - b) observa-se também uma elevada vorticidade. A utilidade desta parede na câmara de grandes dimensões (separação e homogeneização) desaparece com a redução da dimensão pelo que deveria ser suprimida.

No que diz respeito ao escoamento de aproximação às condutas induzido pelo divergente observa-se que a vorticidade é idêntica nas duas situações. Para reforçar esta afirmação

construí-se o perfil da componente horizontal da velocidade em função da profundidade (figura 5.29) numa linha a uma distância de 0,5 m a montante da conduta central na direcção longitudinal x .

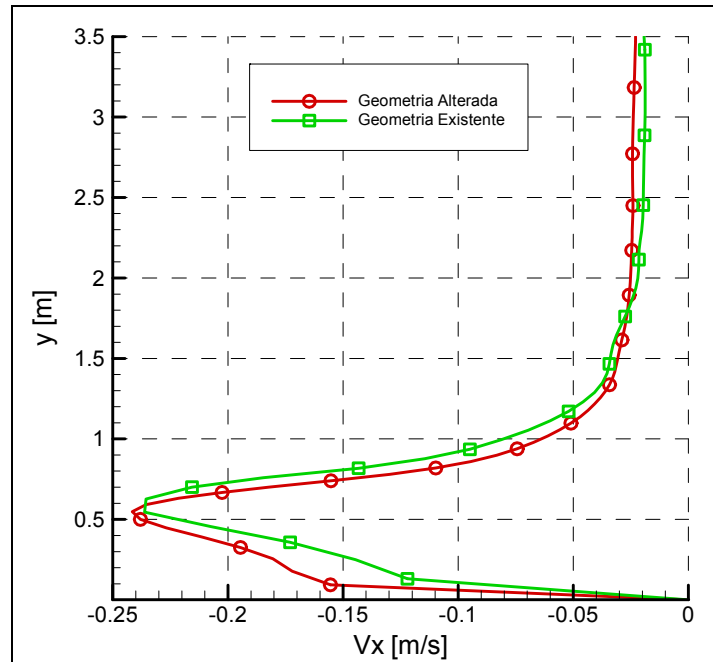


Figura 5.29 – Perfil da componente x da velocidade a 0,5 m das condutas de aspiração: a) geometria pré-existente; b) geometria alterada.

Constata-se assim uma pequena diferença no perfil de velocidade do escoamento de aproximação pelo que o comprimento da câmara de aspiração parece suficiente.

A representação da deformada da superfície livre (figura 5.30) permite constatar que esta configuração não põe em causa o adequado funcionamento da central de adução no que diz respeito à entrada de ar nas condutas, pois existe submergência suficiente e vorticidade moderada. No entanto, nota-se uma maior deflexão da superfície livre na vizinhança das condutas relativamente a geometria pré-existente (figura 4.18-a).

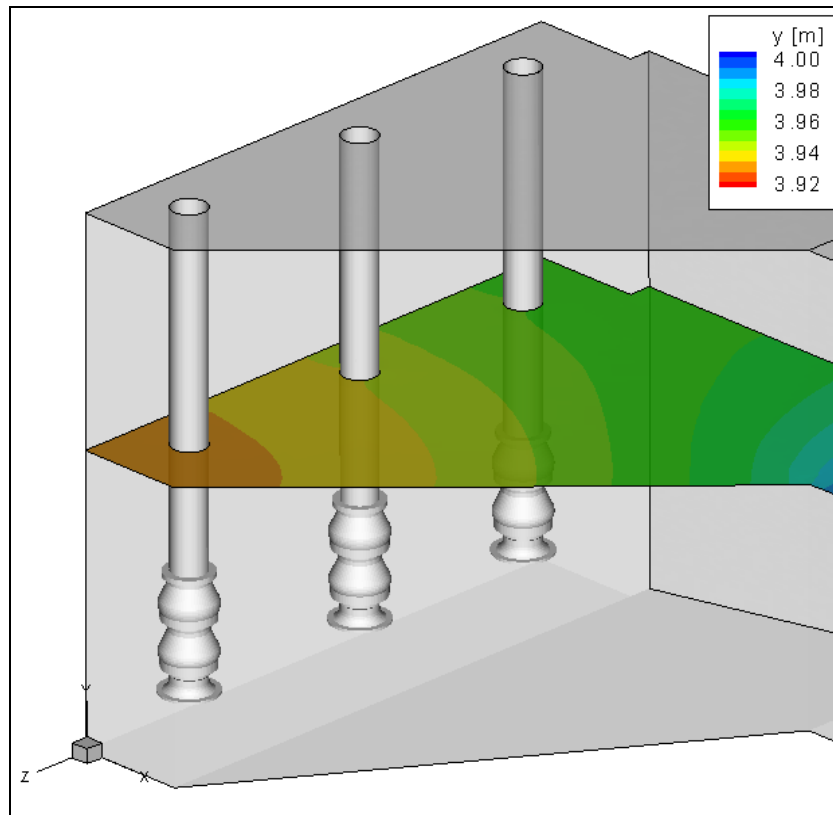


Figura 5.30 – Deformada da superfície livre (nível da superfície livre em repouso: 4 m).

Os resultados obtidos indicam que a câmara de aspiração reduzida pode garantir o normal funcionamento da instalação. Não obstante esta configuração teria impedido o aumento da capacidade de bombagem no horizonte de projecto. No entanto, no âmbito deste trabalho fica demonstrada a utilidade deste tipo de simulações numéricas na fase de projecto pois pode permitir uma redução significativa do custo de construção das tomadas de água reduzindo o seu sobredimensionamento.

Capítulo 6

Conclusões

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado e ainda sugestões para desenvolvimentos futuros.

6.1 Conclusões e trabalho futuro

O trabalho desenvolvido nesta tese centrou-se essencialmente no estudo das consequências do aumento da capacidade de bombagem na tomada de água da central de adução construída pelo Instituto Hidráulica, Engenharia Rural e Ambiente integrante do sistema de Reabilitação do Aproveitamento Hidroagrícola de Roxo e propriedade da Associação dos Beneficiários do Roxo.

Do ponto de vista pessoal este trabalho constituía uma oportunidade para desenvolver a minha formação na área da hidráulica nomeadamente na modelação numérica de escoamentos com superfície livre. Paralelamente foi necessário aprender a trabalhar com programas profissionais de representação gráfica especialmente vocacionados para a área de Mecânica dos Fluidos, no caso do programa *TecPlot* (versão 9.0). A pesquisa bibliográfica efectuada e a consulta de diversas memórias descritivas de projectos de centrais de adução possibilitou-me formar uma visão geral sobre este tema.

O estudo iniciou-se com a escolha dos parâmetros numéricos que garantiam a independência dos resultados face às discretizações temporais e espaciais. Seguidamente realizou-se a validação do modelo numérico construído tendo por base o programa comercial *FLUENT*. Para tal recorreu-se a ensaios experimentais efectuados na central de adução do Roxo.

Validado o modelo numérico estudou-se o escoamento no interior da tomada de água para diferentes geometrias e capacidades de bombagem. Em todas as simulações efectuadas a escolha de uma distância $5d$ entre as condutas de aspiração revelou-se suficiente no ponto de vista da interacção entre condutas e formação de vórtices. Foram ainda efectuadas simulações que permitiram concluir que a câmara de aspiração existente foi largamente sobredimensionada. Testes efectuados permitiram ainda concluir que uma câmara com comprimento longitudinal de apenas 14% permitiria assegurar o caudal de projecto.

O modelo numérico apresentado tem inequivocamente capacidade para simular com precisão o escoamento no interior de tomadas de água sendo portanto uma ferramenta útil no seu projecto e/ou adequação.

O estudo bibliográfico efectuado permitiu concluir que este trabalho apresenta aspectos inovadores pois não foram encontradas referências a simulações numéricas utilizando as equações *RANS* e superfície livre para o tipo de aplicações realizadas. Nota-se que na tese de doutoramento de Issa (2009), que também utilizou o programa *FLUENT*, a superfície foi modelada com uma condição de simetria, inviabilizando assim a determinação da sua deformada. Neste trabalho a superfície livre foi descrita utilizando o método *VoF* o que correspondeu a um aumento substancial da complexidade numérica mas garantiu a autenticidade física do problema.

A curto prazo seria interessante comparar os campos de velocidade e de pressão nas vizinhanças das condutas de aspiração com resultados experimentais. Seria ainda interessante medir experimentalmente a velocidade tangencial induzida pelo rotor da bomba de forma a definir a condição de fronteira adequada nas secções de saída do domínio de cálculo. Também seria interessante medir a deformação da superfície livre nas zonas onde se verificou as maiores alterações.

A capacidade revelada pelo programa na simulação de escoamento com superfície livre com baixo número de Froude e pequena deformação da superfície livre criou expectativas

fundamentadas sobre o seu desempenho em escoamentos com velocidade mais elevadas e deformadas de superfície livre complexas. Seria assim interessante simular descarregadores, ondas de superfície e ressaltos hidráulicos e comparar os resultados com os obtidos através de métodos numéricos clássicos.

Referências Bibliográficas

AFNOR E44-203. (1989). *Association Française de Normalisation*.

Almeida, A. B. (1999). *Controlo Hidráulico - Operacional de Sistemas Adutores* (1ª ed.). Lisboa: EPAL.

ANSI/HI 9.8. (1998). *American National Standard for Pump Intake Design*. Hydraulic Institute.

Araújo, S. (1997). *Apontamentos de Máquinas Hidráulicas*. Monte da Caparica: Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciência e Tecnologia.

ASTEE. (2005). *Association Scientifique et Technique pour l'Eau et l'Environnement - Les stations de pompage d'eau* (6ª ed.). Paris: TEC & DOC.

Barreiro T. (2009). *Estudo da interacção de uma onda monocromática com um conversor de energia*, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

Barreiro T., Didier E., Gil L., Alves M., (2009). *Simulação numérica não linear do escoamento gerado pela interacção entre a agitação marítima e conversores pontuais de energia das ondas*. Proc. III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia, ISBN 978-989-96264-0-9, pp 157 (10p. CDRom), Bragança, Portugal.

Blazek, J. (2001). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications* (1ª ed.). Baden-Daettwil, Switzerland: ELSEVIER.

Cardoso, M. J. (2004). *Análise de Regime Transitório numa Estação de Elevação*, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

- Chadwick, A., & Morfett, J. (1998). *Hidráulica em Engenharia Civil e Ambiente* (1ª ed.). Lisboa: INSTITUTO PIAGET.
- Constantinescu, G., & Patel, V. (1998). *A Numerical Model for Simulation of Pump Intake Flow and Vortices*. Journal of Hydrodynamics Engineering.
- Didier E., Gil L. e Anselmo A., (2007). *Análise do escoamento viscoso em torno dum cargo (Tipo Série60, $C_b=0.6$)*. Proc. Métodos Numéricos e Computacionais em Engenharia - CMNE/CILAMCE, ISBN 978-972-8953-16-4, pp 548 (19 p. CDrom), Porto, Portugal.
- Ferziger, J. H., & Peric, M. (1999). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*.
- FLUENT 6.3. (2008). *User's Guide*. Fluent Incorporated.
- Fox, R. W., & McDonald, A. T. (1995). *Introdução à Mecânica dos Fluidos* (4ª ed.). Rio de Janeiro: Guanabara Koogan.
- Gordon, J. L. (1970). *Vortices at Intakes*. Water Power.
- Hirsch, C. (1988). *Numerical Computation of Internal and External Flows* (Vol. 1). John Wiley.
- Hirt, C., & Nichols, B. (1981). *Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of free Boundaries*. J. Comput. Phys.
- Isbasoiu, E. C., Muntean, T., Safta, C. A., & Stanescu, P. (2005). *Swirling Flows in the Suction Sumps of Vertical Pumps: Theoretical Approach*. Timisora, Romania: Scientific Bulletin of the PUT.
- Issa, A. (2009). *Études Hydroliques de L'Influence des Géométries des Bassins sur L'Alimentation des Pompes*. Laboratoire de Mécanique de Lille, Paris: L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.
- Jones, M. G. (2008). *Pumping Station Design* (3ª ed.). San Diego, California: BH.

- Larock, B. E., Jeppson, R. W., & Watters, G. Z. (2000). *Hydraulics of Pipeline Systems*. CRC Press.
- Lauder, B., & Spalding, D. (1974). *The Numerical Computation of Turbulent Flows*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3.
- Marghzar, S. H., Rahimzadeh, H., & Montazerin, N. (2002). *Numerical Simulation of Flow at an Asymmetric Horizontal Intake*. Hafez Ave, Tehran, Iran: Amirkabir University of Technology.
- Montazerin, N., Rahimzadeh, H., & Marghzar, S. H. (2001). *Prediction of Critical Condition at a Horizontal Intake Through Pressure Contours*. Beijing, China: Proc. of the XIV IAHR Congress in Hydraulics.
- Nagahara, T., Sato, T., & Okamura, T. (2001). *Effect of the Submerged Vortex Cavitation Occurred in Pump Suction Intake on Hydraulic Forces of Mixed Flow Pump Impeller*. California, Institute of Technology, Pasadena, CA USA: Presented at CAV 2001: Fourth International Symposium on Cavitation.
- Paixão Conde J.M., Didier E., (2009). *Simulação numérica de um dispositivo de aproveitamento da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante*. Proc. 9º Congresso Iberoamericano de engenharia Mecânica, CIBIM9, ISBN 978-84-692-8516-9, 5, pp 88-95, Las palmas de Gran Canaria, Spain.
- Paterson, I. S., & Noble, R. M. (1982). *The Right Approach. Symposium on Operation Problem of Pump Station and Power Plants*. Amsterdam.
- Peric, M. (1985). *A Finite Volume Method of the Prediction of Three Dimensional Fluid Flows in Complex Ducts*. PhD Thesis: University of London.
- Peyret, R., & Taylor, T. D. (1977). *Computational Methods for Fluid Flow*. Springer Verlag.
- Prosser, M. J. (1977). *The Hydraulic Design of Pump Sumps and Intakes*. Cranfield, Bedford, England: British Hydromechanics Research Association.
- Rajendran, V., & Patel, V. (1999). *Experimental Validation of Numerical Model of Flow in Pump Intake Bay*. Journal of Hydrodynamics Engineering.

- Rodi, W. (1980). *Turbulence Models and their Application in Hydraulic Models*. Delft, The Netherlands: International Association for Hydraulic Research.
- Shukla, S. N., & Kshirsagar, J. T. (2008). *Numerical Prediction of Air Entrainment in Pump Intakes*. Pune, India: Corporate Research and Engineering Division.
- Tomoyoshi, O., & Kyoji, K. (2005). *CFD Simulation of Flow in Model Pump Sumps for Detection of Vortices*. Yichang, China: Organized and Sponsored by the Chinese Fluid Engineering Institution.
- Tsutiya, M. T. (1995). *Reservatório de Distribuição de Água: Principais Aspectos Hidráulicos Relacionados com a Saida de Água*. São Paulo, Brasil: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Ubbink, O., & Issa, R. I. (1999). *A Method for Capturing Sharp Fluid Interfaces on Arbitrary Meshes*. Pretoria, South Africa: Journal of Computational Physics 153.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Longman Scientific and Technical.
- Vesilind, P. A. (2003). *Wastewater Treatment Plant Design*. Cornwall: Water Environment Federation.
- White, F. M. (1999). *Mecânica dos Fluidos* (4ª ed.). Rio de Janeiro: Mc Graw Hill.
- Wicklein, E., Sweeney, C., Senon, C., Schultz, B., Hattersley, D., & Naef, R. (2006). *Computacional Fluid Dynamic Modeling of a Proposed Influent Pump Station*. Redmond, WA: WEFTEC.

Anexos

Em complemento aos resultados já apresentados neste trabalho, apresentam-se as características da bomba e as principais vistas da tomada de água em estudo de modo a ser possível perceber os planos de simetria e de corte referenciados ao longo do trabalho. Esta secção encontra-se organizada da seguinte forma:

Anexo A – Características nominais da bomba.

Anexos B – Geometria da tomada de água da central de adução construída pelo Instituto Hidráulica, Engenharia Rural e Ambiente integrante do sistema de Reabilitação do Aproveitamento Hidroagrícola de Roxo e propriedade da Associação dos Beneficiários do Roxo.

Anexo B.1 – Planta de cobertura.

Anexo B.2 – Vista em planta A-A.

Anexo B.3 – Vista em corte B-B, C-C, D-D, E-E e F-F.

Anexo B.4 – Vista em planta da geometria alterada.

Anexo A

Na figura A.1 apresenta-se as características nominais da bomba: caudal, potência, velocidade de rotação nominal e a configuração geométrica usada para o cálculo do caudal e para a modelação das condutas de aspiração.

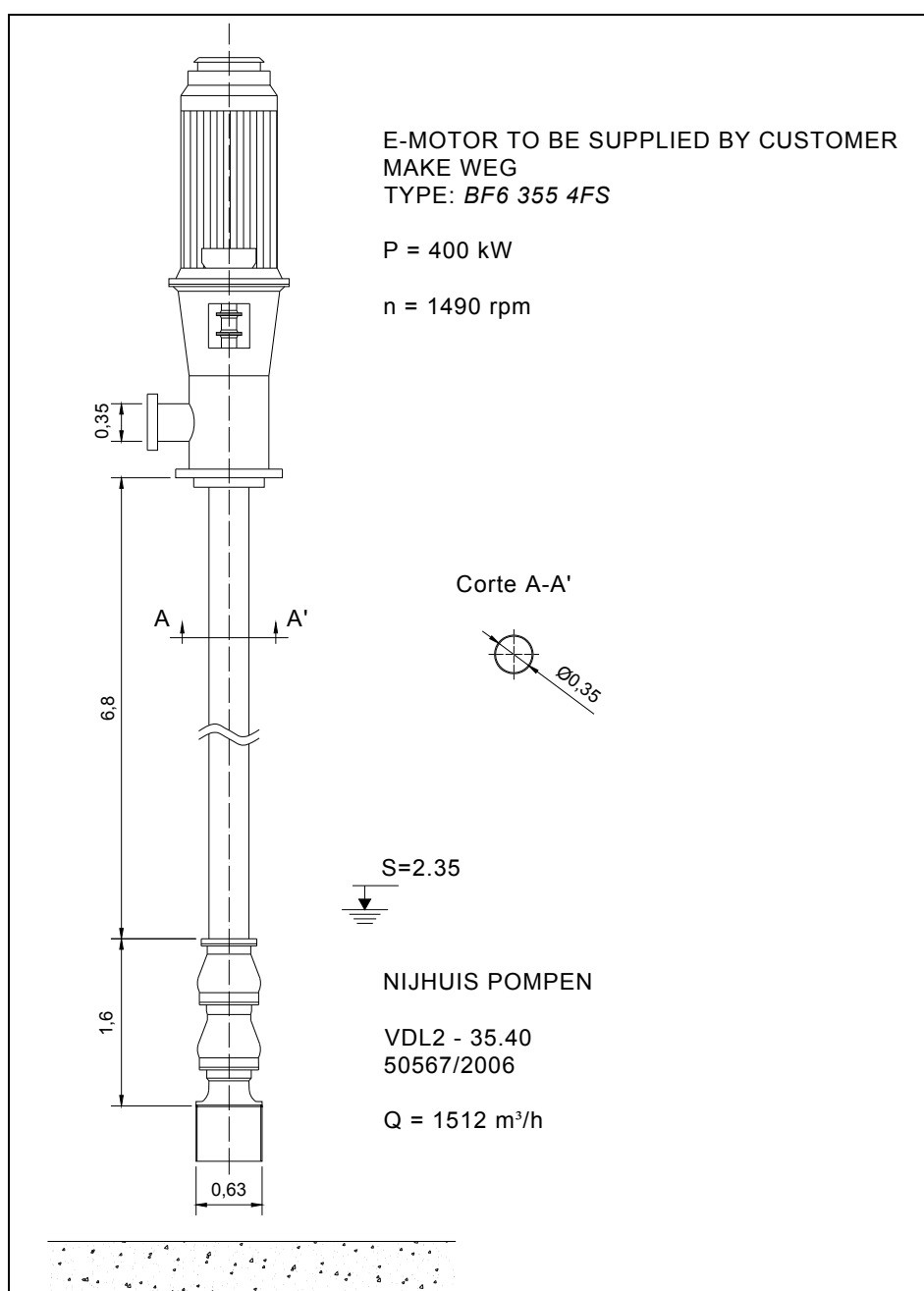


Figura A.1 – Características da bomba.

Anexos B

Anexo B.1

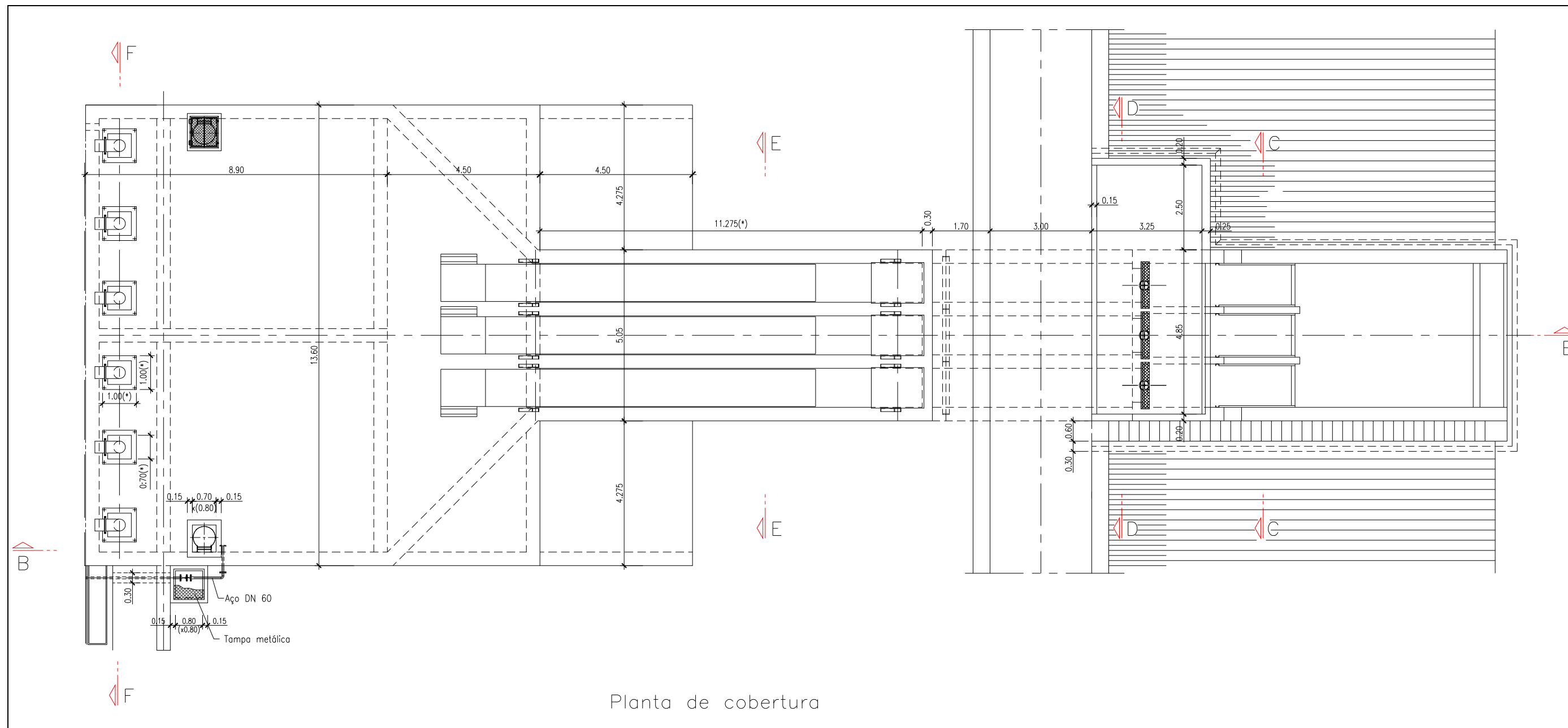
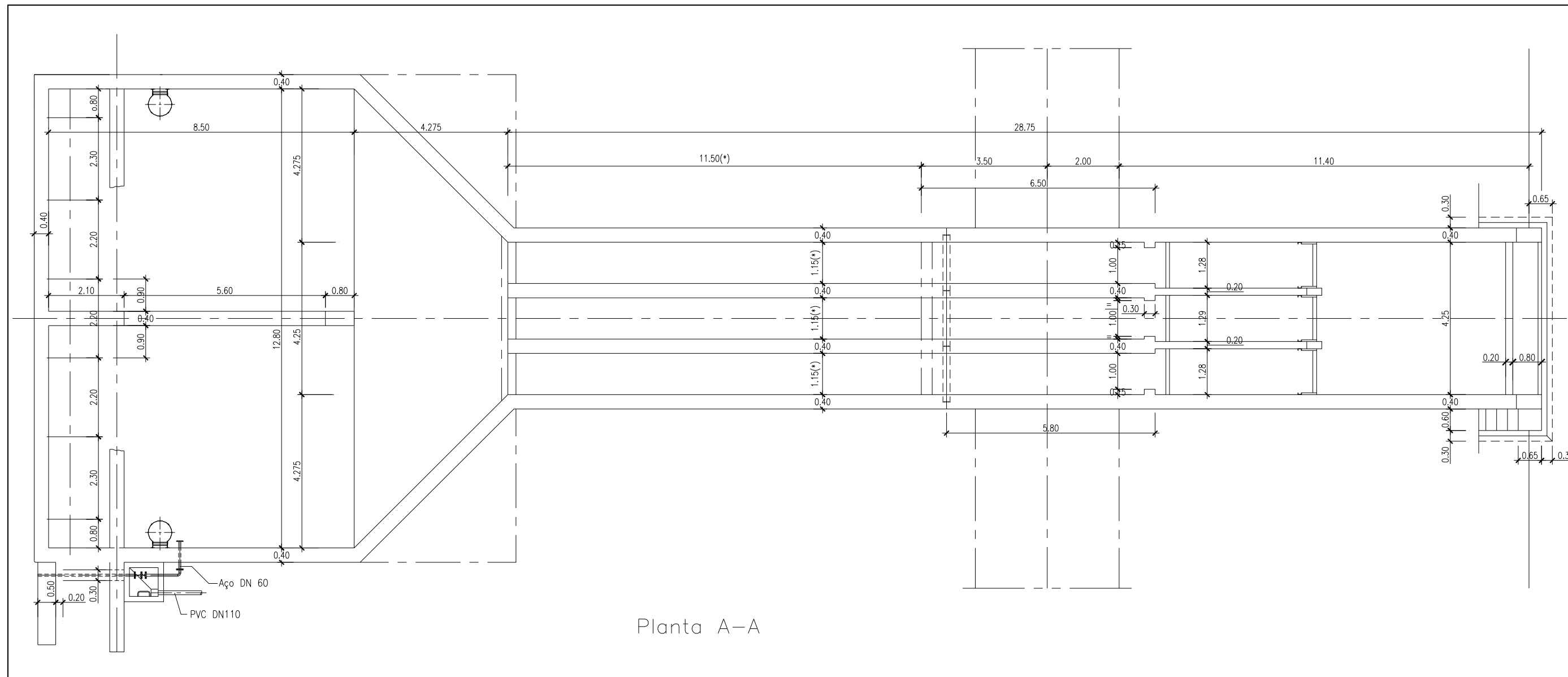


Figura B.1 – Planta de cobertura da tomada de água.

Anexo B.2



Planta A-A

Figura B.3 – Vista em planta A-A.

Anexo B.3

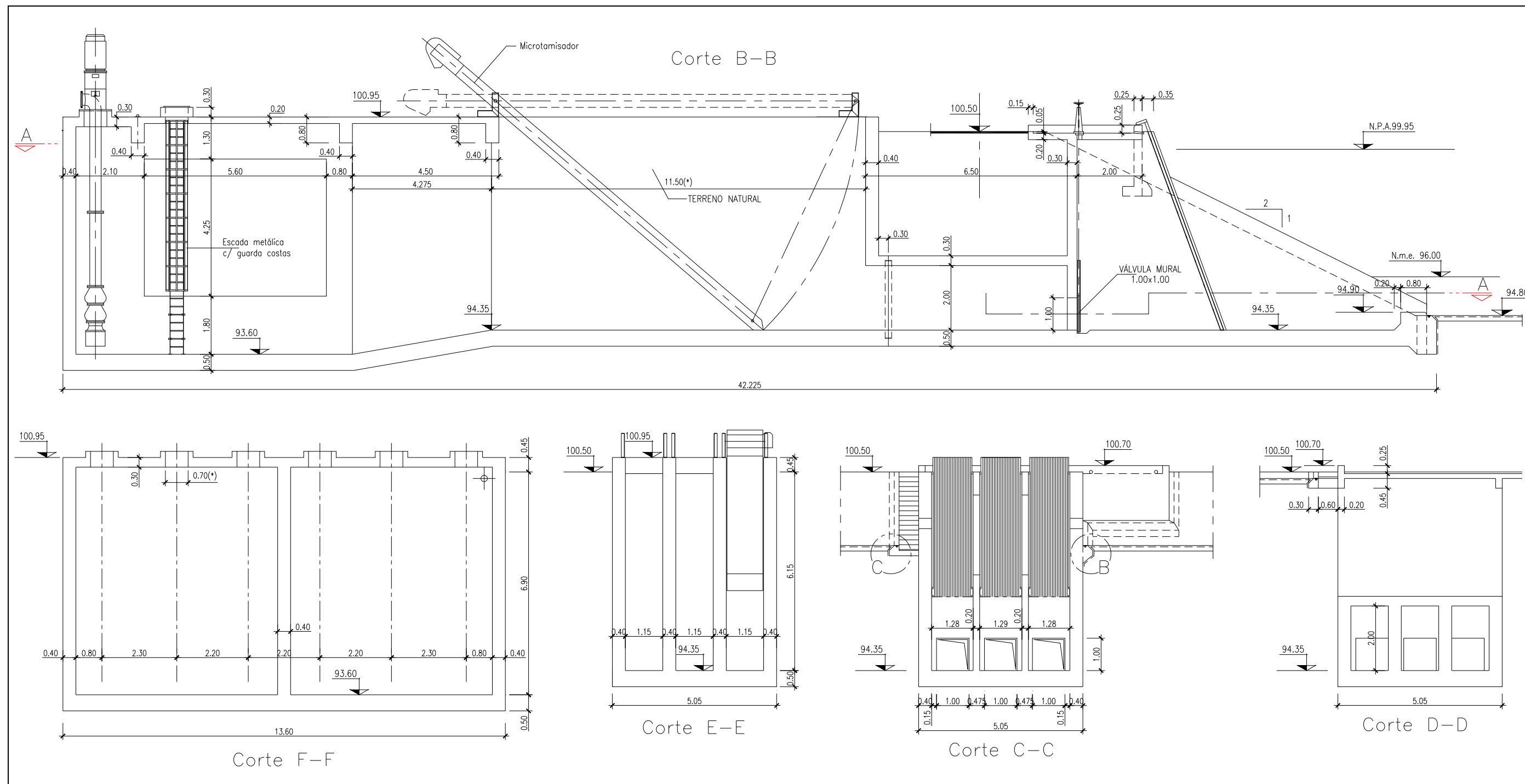
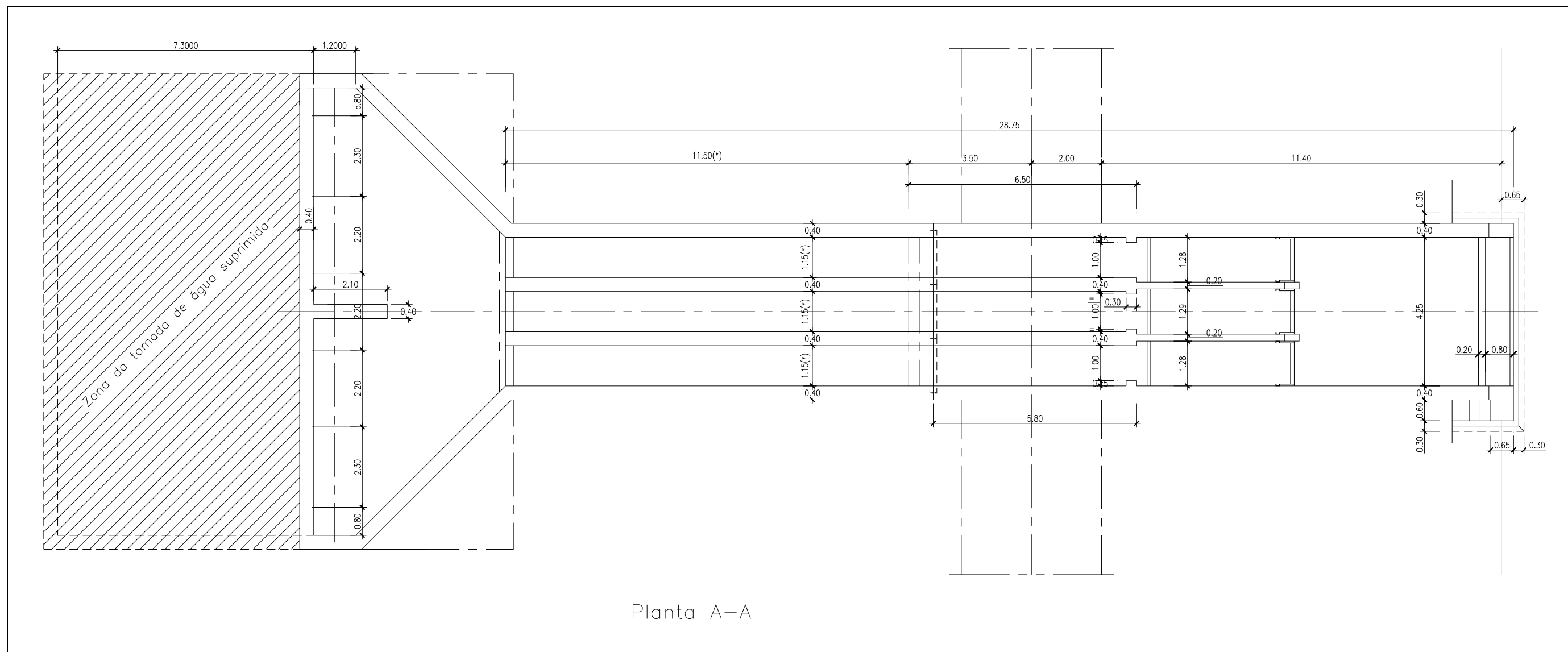


Figura B.2 – Vista em Corte B-B, C-C, D-D, E-E e F-F.

Anexo B.4



Planta A-A

Figura B.3 – Vista em planta da geometria alterada.