



Joana Tristão Vieira

Licenciatura em Ciências da Engenharia Civil

Influência da Direção de Propagação e da Presença dos Anéis de Estabilização nas Forças na Tubagem de Emissários Submarinos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Estruturas

Orientador: Ana Cristina Santos Mendonça, Doutora, LNEC

Coorientador: Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves, Doutora, FCT/LNEC

	Júri:
Presidente:	Professor Doutor António M. Pinho Ramos
Arguente:	Professor Doutor Luis Miguel Chagas Costa Gil
Vogal:	Professora Doutora Maria da Graça Neves



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Novembro, 2016

Influência da direção de propagação e da presença dos anéis de estabilização nas forças na tubagem de emissários submarinos

© Copyright em nome de Joana Tristão Vieira, da FCT/UNL e da UNL

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

Agradecimentos

Quero agradecer em primeiro lugar à Professora Maria da Graça Neves e à Ana Mendonça por toda a disponibilidade e ajuda que me deram para que fosse possível fazer esta dissertação.

Agradeço igualmente aos meus amigos e colegas de curso, Rita, Nuno, Jorge, Bernardo e João, por todos os trabalhos de grupo, seções de estudo e todos os outros momentos deste curso, e a todos os outros que de uma forma ou de outra estiveram presentes nesta fase da minha vida.

Em último lugar, quero agradecer aos meus pais, família e às minhas melhores amigas, que apoiaram sempre as minhas decisões e me deram força para completar este capítulo.

Resumo

Nesta dissertação estudaram-se as forças em emissários submarinos sujeitos à ação de ondas regulares. Para tal, fez-se a análise dos resultados de ensaios em modelo físico anteriormente realizados de um emissário submarino em que se variou a direção de propagação das ondas (10° , 30° e 90°), a distância do emissário ao fundo (0 m, 0.02 m e 0.033 m), com e sem anéis de afundamento, para estudar a influência destes parâmetros nas forças no emissário. Os ensaios foram realizados para um cilindro de 7 cm de diâmetro, um período de 2,07 s e uma profundidade de 0.7 m e para alturas de onda entre 0.10m e 0.25 m.

Com base nos ensaios realizados com agitação regular, fez-se a análise da influência da distância do emissário ao fundo, da direção de propagação da onda e da presença de anéis de afundamento nas forças que atuam no emissário. Estes resultados permitiram concluir que em geral, a intensidade das forças aumenta com o aumento do ângulo de incidência das ondas e a presença de anéis de afundamento e diminui com o aumento da distância do emissário ao fundo.

Com o modelo numérico IH2VOF, modelo bidimensional baseado na resolução das equações RANS, simularam-se alguns dos ensaios realizados em modelo físico, sem anéis de afundamento e para uma direção de propagação de 90° . Após uma análise de sensibilidade da dimensão da malha, simularam-se casos com três distâncias da conduta ao fundo e com diferentes alturas de onda. Compararam-se os resultados com os obtidos em modelo físico, de forma a validar o modelo para estudos de forças em condutas circulares. Os resultados obtidos apresentam as mesmas tendências dos ensaios, mas o valor das forças obtida nos ensaios e nas simulações apresentam diferenças importantes, possivelmente causadas pelas simplificações de condições simuladas e por efeitos tridimensionais dos ensaios.

Palavras-chave: Emissários submarinos, direção de propagação, anéis de afundamento, modelo numérico, IH2VOF

Abstract

This thesis studied the forces in submarine outfalls subject to the action of regular waves. For that, the results of preview physical model tests of a submarine outfall with different incident wave directions (10° , 30° e 90°), different pipe distances from the bottom (0 m, 0.02 m e 0.033 m) and with and without the presence of stabilizing concrete weights. The physical model tests were performed with a 7 cm diameter pipe, a period of 2.07 s, a water depth of 0.7 m and wave heights varying between 0.10 m and 0.25 m.

Based on the tests performed with regular waves, the influence of the pipe distance from the bottom, of the incident wave direction and of the presence of stabilizing concrete weights were analysed. These results allowed to conclude that, in general, the intensity of the forces increases with the increase of the incident wave direction and of the presence of stabilizing concrete weights and decreases with the increase of the pipe distance from the bottom.

With the numerical model IH2VOF, a two-dimensional model based on the resolution of the RANS equations, some of the physical model tests without weights rings and with an incident wave direction of 90° were simulated. After a sensitivity analysis of the mesh dimension, cases with three different distances of the pipe to the bottom and three different wave heights were simulated. The obtained results were compared with the physical model in order to validate the model for studies with forces in circular pipes. These results show the same trend obtained at the physical model tests but the values of the forces obtained on the physical and the numerical model present differences that can be due to the simplified simulated conditions and to the tri-dimensional effects of the physical model tests.

Keywords: Marine outfalls, propagation direction, sinking rings, numerical model, IH2VOF

Índice Geral

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice de Figuras	xi
Acrónimos e abreviaturas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Motivação e enquadramento do tema	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Organização da dissertação	2
2 Emissários Submarinos	3
2.1 Estruturas dos Emissários	3
2.2 Forças atuantes no cilindro	4
2.3 Agitação marítima	6
2.4 Escoamento em torno do cilindro	7
3 Ensaios em modelo físico para o cálculo das forças em emissários submarinos	9
3.1 Características do modelo físico	9
3.2 Condições de agitação	13
3.3 Cálculo das forças	14
3.4 Resultados dos ensaios	15
3.4.1 Análise da influência da presença de anéis de afundamento e da distância da conduta ao fundo	16
3.4.2 Análise da influência da direção de propagação forças na tubagem de emissários submarinos	23
4 Modelação numérica das forças em cilindros, utilizando o modelo IH2VOF	33
4.1 Considerações gerais	33
4.2 Descrição do modelo	34
4.3 Condições de agitação, domínio de cálculo e malhas	34
4.4 Dimensão da camada limite	36
4.5 Análise de sensibilidade	39
4.6 Comparação dos resultados do modelo físico com o modelo numérico	40
5 Conclusões e Trabalho Futuro	45
Referências Bibliográficas	47
Anexo	49

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Exemplo de colocação de um emissário submarino com anéis de afundamento (www.royalhaskoningdhv.com).....	3
Figura 2.2 – Forças atuantes no cilindro	4
Figura 2.3 – Variação da força de arrasto e força de inércia em relação ao tem em escoamentos oscilatórios (adaptado de Sumer e Fredsøe, 2006)	5
Figura 2.4 - Perfil longitudinal de uma onda regular (referencial espacial ou temporal) (Correia et al., 2015)	6
Figura 2.5 - Tipo de escoamento num escoamento oscilatório, em torno de um cilindro para $Re = 10^3$ (adaptado de Sumer e Fredsøe, 2006).....	8
Figura 3.1- Geometria dos Anéis Tipo A e B (Neves et al., 2013)	9
Figura 3.2 - Esquema da estrutura e do equipamento utilizado (Neves et al., 2013)	10
Figura 3.3.- Disposição do primeiro conjunto de sensores	11
Figura 3.4 – Grupo de sensores de pressão	11
Figura 3.5 – Sensores de força.....	12
Figura 3.6 – Representação esquemática da propagação de uma onda incidente e outra refletida (Sousa et al., 2011)	13
Figura 3.7 – Posições dos sensores de pressão e respetivo canal de gravação de dados	15
Figura 3.8 – F_{X+} e F_{X-} para a direção de onda incidente de 10°	16
Figura 3.9 – Forças horizontais para $e=0.02$ m e anel A ($H=0.25$ m e 10°).....	17
Figura 3.10 - F_{Y+} e F_{Y-} para a direção de onda incidente de 10°	17
Figura 3.11 – Forças verticais para $e=0.02$ m e anel A ($H=0.25$ m e 10°).....	18
Figura 3.12 – F_{X+} e F_{X-} para a direção de onda incidente de 30°	18
Figura 3.13 – F_{Y+} e F_{Y-} para a direção de onda incidente de 30°	20
Figura 3.14– F_{X+} e F_{X-} para a direção de onda incidente de 90°	21
Figura 3.15 – F_{Y+} e F_{Y-} para a direção de onda incidente de 90°	22
Figura 3.16 - F_{X+} e F_{X-} para a conduta com $e/D=0$	23
Figura 3.17 - F_{Y-} para a conduta com $e/D=0$	24
Figura 3.18 - F_{X+} e F_{X-} para a conduta com $e/D=0.3$	24
Figura 3.19 - F_{Y+} e F_{Y-} para a conduta com $e/D=0.3$	25
Figura 3.20 - F_{X+} e F_{Y-} para a conduta com o anel A	26
Figura 3.21 - F_{X+} e F_{Y-} para a conduta com o anel A	26
Figura 3.22 - F_{X+} e F_{X-} para a conduta com $e/D=0.5$	27
Figura 3.23 – F_{Y+} e F_{Y-} para a conduta com $e/D=0.5$	27
Figura 3.24 - F_{X+} e F_{X-} para a conduta com o anel B.....	28
Figura 3.25 - F_{Y+} e F_{Y-} para a conduta com o anel B.....	28
Figura 3.26 – Forças horizontais para 10° , 30° e 90° ($H=0.25$ m e $e=0.02$ m)	29
Figura 3.27 - Espectro correspondente às forças horizontais F_X	29
Figura 3.28 – Forças verticais para 10° , 30° e 90° ($H=0.25$ m e $e=0.02$ m)	30

Figura 3.29 - Espectro correspondente às forças verticais FY	30
Figura 3.30 - Imagens do escoamento nos ensaios com anéis do tipo A para a) 10°, b) 30° e c) 90° (Neves et al., 2013).....	31
Figura 4.1 – Malha dividida em subzonas.....	34
Figura 4.2 – Malha com as subzonas utilizadas	35
Figura 4.3 – Posição das sondas no modelo IH2VOF	36
Figura 4.4 - Camada Limite (Lacerda et al, 2001)	37
Figura 4.5 - Perfis de velocidade aquando da passagem da cava, para a altura de onda 0.15m	37
Figura 4.6 - Perfis de velocidade aquando da passagem da crista, para a altura de onda 0.15m	38
Figura 4.7 - Perfil de velocidades aquando da passagem da cava, para a altura de onda 0.15m em X=2.35m	38
Figura 4.8 - Perfil de velocidade aquando da passagem da crista, para a altura de onda 0.15m em X=2.35m	39
Figura 4.9 - Análise de sensibilidade – valores das forças horizontais	40
Figura 4.10 - Análise de sensibilidade – valores das forças verticais.....	40
Figura 4.11 – Comparação de forças horizontais máximas e mínimas dos ensaios com o modelo numérico com variação da altura de onda	41
Figura 4.12 – Comparação de forças verticais máximas e mínimas dos ensaios com o modelo numérico com variação da altura de onda	41
Figura 4.13 – Comparação de forças horizontais máximas e mínimas dos ensaios com o modelo numérico com variação da distância do emissário ao fundo.....	42
Figura 4.14 – Comparação de forças verticais máximas e mínimas dos ensaios com o modelo numérico com variação da distância do emissário ao fundo.....	43
Figura A.0.1- Planta nas direções x e y.....	49

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Posição das sondas de nível	10
Tabela 3.2 - Posição dos ADVs.....	11
Tabela 3.3 – Testes analisados	12
Tabela 3.4 - Alturas e períodos da onda gerada no batedor e da onda incidente	14
Tabela 4.1 – Casos simulados	33
Tabela 4.2 – Discretização das malhas	35
Tabela 4.3 – Coordenadas das sondas no modelo IH2VOF.....	36
Tabela 4.4 - Análise de sensibilidade	40
Tabela 4.5 – Comparação das forças horizontais e verticais dos ensaios e do modelo IH2VOF com variação da altura de onda	42
Tabela 4.6 – Comparação das forças horizontais e verticais dos ensaios e do modelo IH2VOF com variação da distância do emissário ao fundo	43

Lista de Símbolos

a	Amplitude de onda
A_c	Amplitude da crista
A_s	Amplitude da cava
A_x	Área de influência do sensor na direção x
A_z	Área de influência do sensor na direção z
B_x	Área de influência do sensor na direção x
B_z	Área de influência do sensor na direção z
c	Celeridade
$células$	Número de células da malha
D	Diâmetro do cilindro
dx	Dimensão das células na direção horizontal
dy	Dimensão das células na direção vertical
$dyirregular$	Maior dimensão das células na direção vertical na zona irregular
$dyregular$	Dimensão das células na direção vertical na zona regular
e	Distância entre o cilindro e fundo
f	Frequência
F_D	Força de arrasto
F_{Hm}	Força horizontal
F_L	Força de sustentação
F_M	Força de inércia
F_{Vm}	Força vertical
H	Altura de onda
h	Profundidade
KC	Número de Keulegan-Carpenter
L	Comprimento de onda
p	Pressão
p_i	Pressão no sensor i
Re	Número de Reynolds
S	Densidade de energia
t	Tempo
T	Período de onda
T_W	Período de escoamento oscilatório
U	Velocidade do escoamento não perturbado
Um	Velocidade máxima do escoamento oscilatório numa zona não perturbada
η	Elevação da superfície livre
ρ	Massa volúmica do fluido
θ	Ângulo entre a horizontal e a posição no perímetro do cilindro
μ	Coefficiente de atrito
ν	Viscosidade cinemática do fluido

Acrónimos e abreviaturas

ADV	<i>Acoustic Doppler Velocity</i>
COBRAS	<i>Cornell Breaking waves and structure</i>
FFD	Ferro fundido dúctil
GUI	<i>Graphic user interface</i>
NMM	Nível médio do mar (repouso)
PEAD	Polietileno de alta densidade
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
VARANS	<i>Volume Averaged Reynolds Navier-Stokes</i>
VOF	<i>Volume of fluid</i>

1 Introdução

1.1 *Motivação e enquadramento do tema*

Os emissários submarinos são estruturas tubulares utilizadas para a libertação de efluentes no fundo do mar, aproveitando assim a capacidade de autodepuração das águas marinhas, sendo uma solução cada vez mais popular em todo o mundo, devido ao mínimo impacto ambiental e económico. No entanto, no caso de ocorrerem acidentes com a estrutura, poderão ter consequências graves a nível económico, ambiental e de saúde pública, já que muitos estão em zonas turísticas. Assim, o seu dimensionamento deve ser cuidado de forma a ser um compromisso entre o custo e a sua fiabilidade.

De modo a otimizar o dimensionamento dos emissários sem comprometer a sua fiabilidade, isto é, evitando a ocorrência de acidentes, é necessário calcular, o mais fielmente possível, as forças hidrodinâmicas que neles atuam. Normalmente os cálculos de forças em emissários são feitos considerando o emissário como uma conduta circular, sem anéis de afundamento ou estabilização e considerando a agitação perpendicular à conduta. Este não é o caso mais comum dos emissários em Portugal, que são normalmente construídos perpendicularmente à costa e, como tal, a agitação atinge o emissário com uma obliquidade bastante inferior a esta e onde a maioria dos emissários possui anéis. Desta forma, é especialmente importante conhecer a influência do ângulo de incidência da agitação e da presença de anéis de afundamento e/ou estabilização nas forças em emissários.

Para contribuir para compreender a influência destes parâmetros nas forças em emissários submarinos, foram realizados ensaios experimentais em 2013 com o objetivo de estudar “*a influência da agitação incidente, da presença dos anéis de estabilização e da distância da conduta ao fundo*” nas forças em emissários (Neves et al., 2013). Estes dados foram a base de parte do trabalho realizado nesta dissertação. Este trabalho vem ainda na sequência da dissertação desenvolvida por João Inverno, intitulada *Modelação Numérica da Interação de Ondas com Emissários Submarinos*, onde se fez uma validação do modelo numérico IH2VOF para o caso da interação das ondas com um emissário submarino.

1.2 *Objetivos*

O objetivo desta dissertação é analisar a influência que a altura de onda, a direção de propagação das ondas, a distância do emissário ao fundo e a presença de anéis de afundamento têm nas forças que atuam no emissário.

Para este estudo analisam-se os dados dos ensaios realizados em 2013 no que às forças em emissários sujeitos à ação de agitação regular diz respeito. Nos ensaios experimentais foram simulados escoamentos oscilatórios para números de Reynolds entre 2.7×10^4 e 6.4×10^4 ; números de Keulegan-Carpenter entre 12.8 e 28.8; uma profundidade de 0.7 m; um período de 2.07 s; alturas de onda variáveis

(0.10 m, 0.15 m, 0.20 m e 0.25 m); direção de propagação de ondas variáveis (10° , 30° e 90°); distâncias do emissário a fundo variáveis (0.00 m, 0.02 m e 0.033 m); e presença de anéis de afundamento com distância ao fundo do emissário variáveis (0.02 m e 0.033 m). Com base nos resultados de forças obtidos nos ensaios é analisada a influência que a direção de propagação e a presença de anéis tem nas forças na estrutura.

É ainda feita a modelação numérica, utilizando o modelo numérico IH2VOF, do caso estudado nos ensaios experimentais, mas para o emissário constituído apenas pela tubagem circular e para uma agitação perpendicular à tubagem, já que o modelo é bidimensional. No modelo numérico fizeram-se inicialmente 3 simulações, com 20, 28 e 35 células por diâmetro, de modo a fazer uma análise de sensibilidade da dimensão da malha nos resultados das forças na conduta. Esta análise foi feita para uma altura de onda de 0.15 m e uma distância ao fundo de 0.02 m.

De seguida, já com uma malha de 35 células por diâmetro, fizeram-se 3 simulações, para uma distância ao fundo fixa de 0.02 m e variando a altura de onda (0.10 m, 0.20 m e 0.25 m). Por fim, também para a malha de 35 células por diâmetro, fizeram-se 2 simulações para uma altura de onda de 0.10 m mas, desta vez, variando a distância ao fundo (0.00 m e 0.033 m). Com base nos resultados destes casos, validou-se o modelo para este caso de estudo. Uma vez validado, o modelo pode ser utilizado para ampliar as condições estudadas em modelo físico.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação é composta por esta introdução (Capítulo 1), uma breve descrição de um emissário submarino e das forças que nele atuam, da agitação marítima, principal ação a que a estrutura está submetida, e ao escoamento em torno de um cilindro (Capítulo 2). No Capítulo 3 é feita uma descrição dos ensaios experimentais utilizados nesta dissertação, são descritas as condições de agitação dos mesmos, é apresentada a metodologia usada para calcular as forças no emissário e, por fim, é feita uma análise dos resultados das forças para as diversas condições ensaiadas. No Capítulo 4 é feita a descrição do modelo IH2VOF e são apresentadas as condições de agitação simuladas em modelo numérico, a discretização do domínio de cálculo, o processamento dos resultados, incluindo a análise da camada limite e a análise de sensibilidade das malhas e ainda a análise das forças no cilindro. Finalmente é feita a validação do modelo por comparação entre os resultados do modelo físico e do modelo numérico. Por ultimo são apresentadas as conclusões do trabalho (Capítulo 5).

2 Emissários Submarinos

2.1 Estruturas dos Emissários

Os emissários submarinos são estruturas tubulares utilizadas para a libertação de efluentes no fundo do mar, aproveitando assim a capacidade de autodepuração das águas marinhas. Estas estruturas são uma solução cada vez mais popular em todo o mundo devido ao facto de terem o mínimo impacto ambiental e económico.

Em Portugal, como os principais aglomerados urbanos e industriais se encontram junto ao litoral, o principal método de disposição de efluentes é o uso de emissários submarinos. O maior emissário submarino implantado em Portugal é o de São Jacinto, com cerca de 3400 m de comprimento e 1600 mm de diâmetro.

Os emissários construídos em Portugal são geralmente constituídos por uma tubagem flexível de polietileno de alta densidade (PEAD) e, nalguns casos, ferro fundido dúctil (FFD). Em relação à colocação da tubagem no fundo, nestes emissários a tubagem é simplesmente assente sobre o fundo, geralmente com ajuda dos anéis de afundamento e estabilizadores, fora da zona de rebentação. Os anéis de afundamento servem para conferir ao emissário estabilidade e também para evitar que a parte inferior do tubo entre em contacto com o fundo natural, evitando-se danos na tubagem, se o fundo for rochoso ou de consistência superior ao material do tubo (Neves & Reis et al., 2003). No entanto, a tubagem é normalmente enterrada numa vala no fundo do mar quando a profundidade é pequena, a agitação e a corrente são fortes e/ou se encontra em zonas de praia e formações rochosas.

Os emissários estão sujeitos à ocorrência de acidentes, quer devido as ações dinâmicas causadas pela agitação marítima quer a outras ações, tais como ações mecânicas diretas provocadas, por exemplo, por âncoras de navios.



Figura 2.1 – Exemplo de colocação de um emissário submarino com anéis de afundamento (www.royalhaskoningdhv.com)

2.2 Forças atuantes no cilindro

O cálculo de forças em emissários é feito considerando as forças na conduta, isto é, num cilindro de determinado diâmetro, com ou sem anéis. O escoamento em torno do cilindro vai exercer uma força resultante no mesmo, que pode ser decomposta em duas componentes: uma horizontal e uma vertical.

As forças horizontais, que atuam paralelamente à direção da propagação das ondas, podem ser decompostas em forças de inércia, FM, e forças de arrasto, FD (Figura 2.2). As forças de inércia resultam das pressões induzidas por um escoamento não perturbado pela presença do cilindro e da resultante das variações do campo de pressões quando se considera a presença do cilindro.

A força de arrasto tem duas componentes: a componente proveniente do atrito, resultante da tensão de corte entre a camada limite que se desenvolve sobre a superfície do cilindro e o restante escoamento; e a componente proveniente da pressão causada pelo escoamento no cilindro. A força de arrasto é, então, a soma destas duas componentes e a força horizontal total é a soma da força de inércia e da força de arrasto.

A força vertical é a força de sustentação, FL (Figura 2.2), que atua perpendicularmente à direção da incidência e é proporcional ao quadrado da velocidade do escoamento e à área exposta ao escoamento.

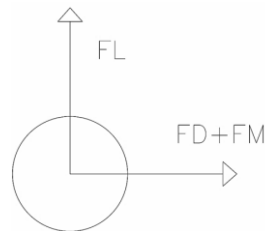


Figura 2.2 – Forças atuantes no cilindro

A resultante das forças horizontais e verticais varia com o tempo, tendo um máximo no instante em que é máxima a velocidade horizontal das partículas e em que é nula a sua aceleração, o que acontece quando as forças de arrasto e sustentação são máximas e a força de inércia é nula (Figura 2.3).

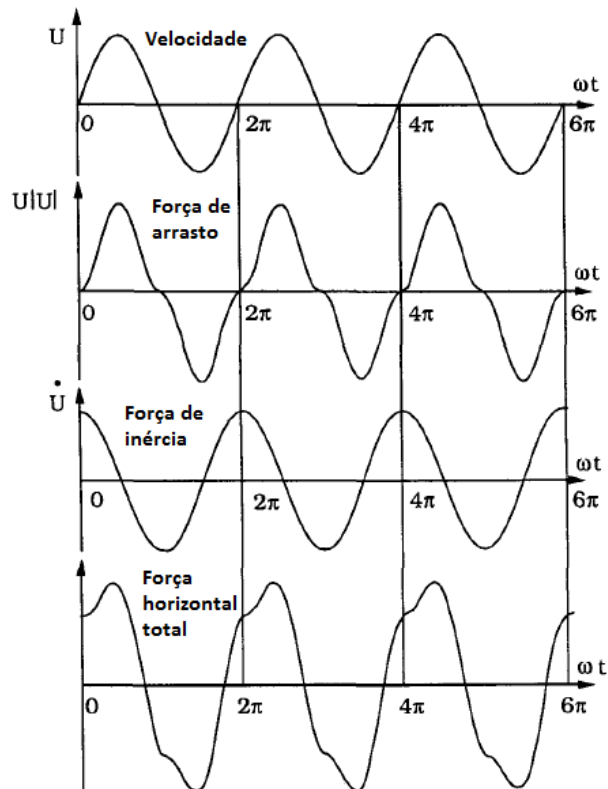


Figura 2.3 – Variação da força de arrasto e força de inércia em relação ao tem em escoamentos oscilatórios (adaptado de Sumer e Fredsøe, 2006)

A intensidade das forças sobre o cilindro varia com o ângulo entre a direção de propagação das ondas e o eixo do emissário. Quando este ângulo é nulo, a intensidade das forças no cilindro é mínima. Para outros ângulos, o cilindro está sujeito, em cada instante, a forças com diferentes intensidades e sentidos, até atingir um máximo para o caso de 90° . Nesse caso registra-se a situação mais desfavorável, não só porque essas forças têm o seu valor máximo, como também porque esse máximo atua simultaneamente em todo o cilindro (Neves & Reis et al., 2003).

As forças variam ainda com a distância do cilindro ao fundo. Estudos anteriores (Inverno et al., 2013) analisaram esta influência e verificaram que a força horizontal varia com o aumento da relação entre a distância ao fundo e o diâmetro da conduta, e/D . No caso estudado por estes autores, os módulos das forças horizontais tomam valores relativamente constante para valores de $e/D > 0.5$ e, para $e/D < 0.5$, os valores crescem e atingem um máximo para um valor de e/D de aproximadamente 0.125. Já para as forças de sustentação, o seu valor médio muda de sinal consoante o posicionamento do cilindro em relação ao fundo, ou seja, passa de uma tendência de repulsão face ao fundo para não interação com o fundo.

2.3 Agitação marítima

A principal ação que atua num emissário é a agitação marítima, isto é, as ondas. Uma onda é uma perturbação oscilatória e periódica que ocorre na superfície do mar, principalmente devido às forças de pressão e fricção causadas pelo vento.

Na Figura 2.4 apresenta-se uma onda regular e as respectivas características, onde:

- Elevação da superfície livre, η ;
- Profundidade, h ;
- Nível do mar em repouso, S.W.L;
- Comprimento de onda, L .

A agitação marítima é aleatória e irregular. As ondas variam nas suas características, tais como:

- Direção de propagação;
- Período, T ;
- Altura de onda, H ;
- Amplitude da crista, A_c ;
- Amplitude da cava, A_s .

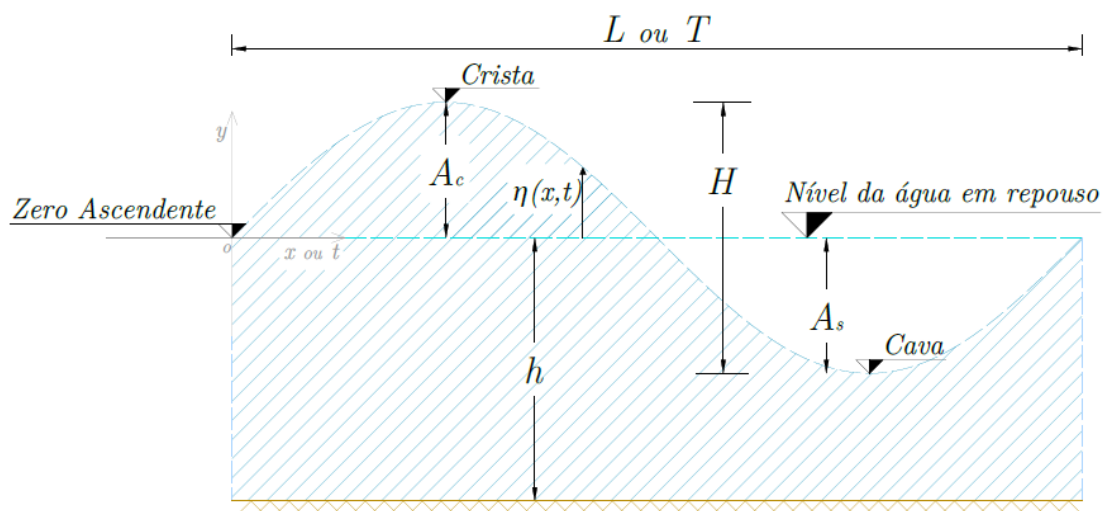


Figura 2.4 - Perfil longitudinal de uma onda monocromática regular (referencial espacial ou temporal) (Correia et al., 2015)

2.4 Escoamento em torno do cilindro

De forma simplificada, podem ser considerados, essencialmente, dois tipos de escoamentos em torno de cilindros: o escoamento permanente, associado a correntes marítimas, e o escoamento oscilatório, associado à agitação marítima.

O escoamento permanente em torno de cilindros é caracterizado por um parâmetro adimensional, o número de Reynolds, definido por:

$$Re = \frac{DU}{\nu} \quad (1)$$

$D \rightarrow$ Diâmetro do cilindro [m]

$U \rightarrow$ Velocidade do escoamento não perturbado máxima no centro do cilindro [m/s]

$\nu \rightarrow$ Viscosidade cinemática do fluido [m/s²]

À medida que o número de Reynolds se afasta de zero, o escoamento vai sofrendo grandes alterações, variando desde o caso sem desprendimento de vórtices até ao caso com uma camada limite totalmente turbulenta (Sumer e Fredsoe, 1997).

Para o caso em que o cilindro está exposto a um escoamento oscilatório, é importante considerar outro parâmetro adimensional, o número de Keulgan-Carpenter, KC, definido por:

$$KC = \frac{UT_w}{D} \quad (2)$$

$T_w \rightarrow$ Período de escoamento oscilatório [s]

Quando KC é muito pequeno pode não ocorrer a separação de vórtices do cilindro. No entanto, para grandes valores de KC, existe uma separação de vórtices do cilindro e possivelmente até o seu desprendimento.

A Figura 2.5 representa o tipo de vórtices que se geram em torno do cilindro, para diferentes valores de KC e para um $Re = 10^3$.


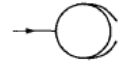

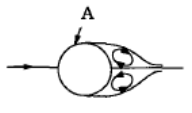


	Regime laminar sem desprendimento das partículas de água	$KC < 1.1$
	Desprendimento com formação de vórtices Honj (vórtices com forma de cogumelo e paralelos ao escoamento)	$1.1 < KC < 1.6$
	Desprendimento com formação de um par de vórtices simétricos	$1.6 < KC < 2.1$
	Desprendimento com formação de um par de vórtices simétricos. Ocorrência de turbulência sobre a superfície do cilindro (A).	$2.1 < KC < 4$
	Desprendimento com formação de um par de vórtices assimétricos.	$4 < KC < 7$
	Desprendimento de vórtices.	$7 < KC$

Figura 2.5 - Tipo de escoamento num escoamento oscilatório, em torno de um cilindro para $Re = 10^3$ (adaptado de Sumer e Fredsøe, 2006)

Tal como referido, o escoamento em torno do cilindro também é influenciado pela distância do cilindro ao fundo, e/D . Quanto mais pequena for essa distância, menos simétricos são os vórtices em torno do cilindro, e isso irá influenciar as forças que atuam no mesmo.

3 Ensaio em modelo físico para o cálculo das forças em emissários submarinos

3.1 Características do modelo físico

Para estudar a influência da agitação incidente e da distância da conduta ao fundo nas forças que atuam num emissário, foram realizados ensaios em modelo físico tridimensionais de 2 de junho a 12 de julho de 2013 (Neves et al., 2013). Os ensaios foram executados no *Shallow water basin* do *Danish Hydraulics Institute* num tanque de 35 m x 25 m com um fundo horizontal. O tanque tinha numa fronteira um batedor e na fronteira oposta uma praia de enrocamento para absorver a energia e reduzir a reflexão. Nesta dissertação analisa-se o caso da tubagem diretamente assente no fundo e com dada distância ao fundo, com e sem anéis de afundamento.

Os ensaios consistiam no estudo de forças devido à ação da agitação numa conduta com 10 m de comprimento e um diâmetro de 0.07 m, onde se fez variar o ângulo de incidência das ondas (90°, ou seja, perpendicular à conduta, 30° e 10°), a distância da conduta ao fundo (0 m, 0.02 m e 0.033m), a existência de anéis de estabilização, a altura (significativa) de onda (0.10 m, 0.15 m, 0.20 m e 0.25 m) e o tipo de onda (regular, irregular e bimodal).

Os anéis de estabilização foram colocados a 0.33 m de distância entre si, num total de 26 anéis. Foram feitos ensaios para dois tipos de anéis (A e B) que diferiam na altura da base, ou seja, na distância da conduta ao fundo, como é possível observar na Figura 3.1, de forma a ter a mesma distância que a ensaiada sem anéis (0.02 m e 0.033m).

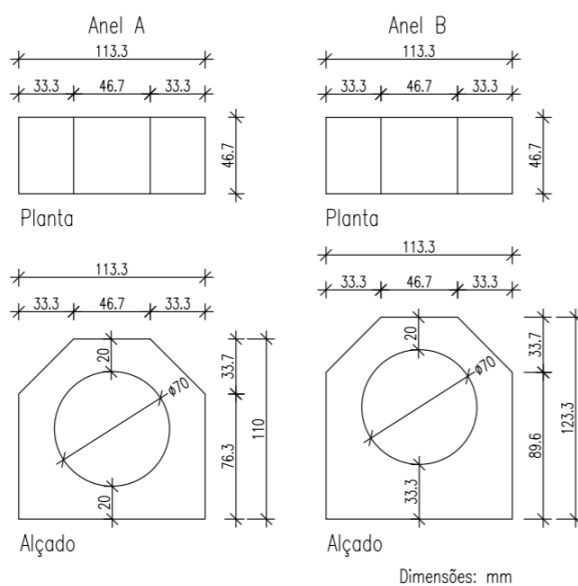


Figura 3.1- Geometria dos Anéis Tipo A e B (Neves et al., 2013)

Todos os ensaios foram executados para um período (de pico) de 2.07s (exceto para as ondas bimodais, que tem períodos de 2.07s+1.55s) e uma profundidade de 0.7 m. A conduta foi colocada a 8.715 m do batedor.

Em relação aos instrumentos utilizados para a medição dos parâmetros a estudar, estes consistem em sondas de nível, *Acoustic Doppler Velocity* (ADV), sensores de força e sensores de pressão, com a disposição apresentada na Figura 3.2 e na Figura A.0.1 (em anexo).

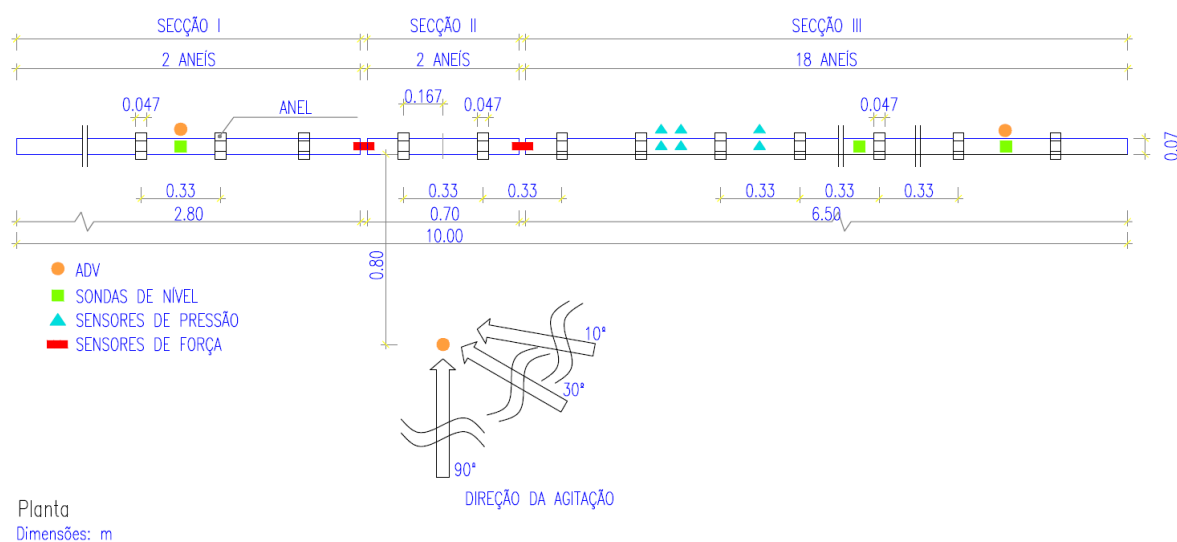


Figura 3.2 - Esquema da estrutura e do equipamento utilizado (Neves et al., 2013)

Foi colocado um total de 15 sondas de nível (WG1 a WG15) ao longo do tanque, com a posição (distância ao batedor) indicada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Posição das sondas de nível

Canal	Instrumento	Distância ao batedor (m)
1	WG1	5.665
2	WG2	6.065
3	WG3	6.415
4	WG4	6.665
5	WG5	6.765
6	WG6	15.765
7	WG7	16.165
8	WG8	16.515
9	WG9	16.765
10	WG10	16.865
11	WG11	8.715
12	WG12	8.715
13	WG13	8.715
14	WG14	5.665
15	WG15	5.665

Foram utilizados 3 ADVs, para medir a velocidade nas três direções, $U(x)$ na direção perpendicular ao cilindro, $V(y)$ na direção do cilindro e $W(z)$ na vertical, localizados na posição que está indicada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Posição dos ADVs

Canal	Instrumento	Medição	Unidades	Distância ao batedor (m)
16	1° ADV	$U(x)$	m/s	7.915
17	1° ADV	$V(y)$		
18	1° ADV	$W(z)$		
31	2° ADV	$U(x)$		8.795
32	2° ADV	$V(y)$		
33	2° ADV	$W(z)$		
34	3° ADV	$U(x)$		8.795
35	3° ADV	$V(y)$		
36	3° ADV	$W(z)$		

Os sensores de pressão (de CH23 a CH30) encontravam-se localizados em duas secções transversais da conduta, com uma distância ao batedor de 8.795 m. As Figura 3.3 a)

b) mostram a disposição do conjunto de sensores.

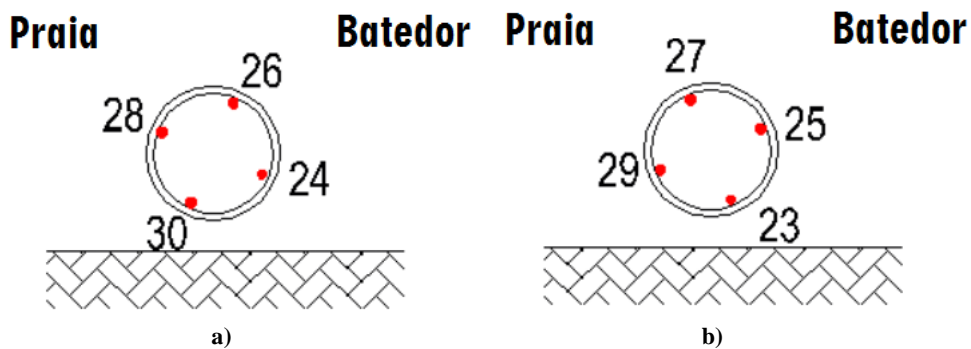


Figura 3.3.- Disposição do primeiro conjunto de sensores

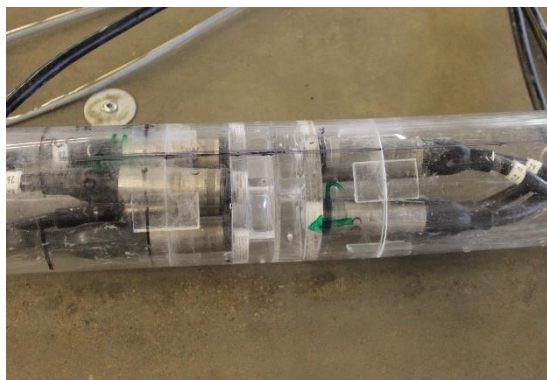


Figura 3.4 – Grupo de sensores de pressão

Os sensores de força foram colocados de cada lado da secção II (ver Figura 3.5), com 0.7 m de comprimento e mediam a força total desse troço de conduta.



Figura 3.5 – Sensores de força

Resumidamente, com estes instrumentos foi possível medir:

- A variação da superfície livre em diferentes pontos do tanque;
- A força num troço de 0.7 m de conduta;
- As pressões, em duas secções da conduta, cada uma com oito pontos de medição distanciados entre si de 45°;
- As velocidades em três pontos do tanque.

Os ensaios de ondas regulares tiveram duração de 210 s, que corresponde a aproximadamente 100 ondas.

Os testes analisados no âmbito desta dissertação são apresentados na Tabela 3.3. Na maioria destes ensaios apenas foram medidas pressões numa secção de conduta.

Tabela 3.3 – Testes analisados

T (s)	Direção de agitação	Geometria	e (m)	H (m)	Direção de agitação	Geometria	e (m)	H (m)	Direção de agitação	Geometria	e (m)	H (m)
2.07	90°	Conduta	0.000	0.10	30°	Conduta	0.000	0.10	10°	Conduta	0.000	0.10
				0.15				0.15				0.15
				0.20				0.20				0.20
				0.25				0.25				0.25
			0.10	0.020			0.10	0.10			0.10	
			0.15				0.15	0.15				
			0.20				0.20	0.20				
			0.25				0.25	0.25				
			0.10	0.033			0.10	0.10			0.10	
			0.15				0.15	0.15				
			0.20				0.20	0.20				
			0.25				0.25	0.25				
		0.10	0.020	0.10	0.10	0.10						
		0.15		0.15	0.15							
		0.20		0.20	0.20							
		0.25		0.25	0.25							
		0.10	0.033	0.10	0.10	0.10						
		0.15		0.15	0.15							
		0.20		0.20	0.20							
		0.25		0.25	0.25							

No decorrer dos ensaios aconteceram alguns erros na medição dos resultados. Em muitos casos, por exemplo, o sensor de pressão 24 (Figura 3.3) não funcionou. No entanto, com base na análise aos ensaios onde este sensor funcionou corretamente, verificou-se que os valores do sensor 25 e 24 estavam em fase e apresentavam valores que diferiam menos de 5%. Assim, no cálculo das forças com base nos dados medidos nos sensores de pressão, nos casos em que ocorreram erros no sensor 24 os seus valores foram substituídos pelos valores do sensor 25. Outro erro muito frequente foi um dos sensores de força não funcionar, sendo os seus valores substituídos pelos valores do segundo sensor de forças correspondente (em x ou em y). Em duas situações o sensor de força estava colocado ao contrário, pelo que, no cálculo das forças, os valores dos seus dados eram multiplicados por -1.

3.2 Condições de agitação

As condições de agitação previstas nos ensaios de agitação regular caracterizavam-se por alturas de onda de 0.10 m, 0.15 m, 0.20 m e 0.25m; período de 2.07 s e direções de propagação das ondas de 10°, 30° e 90°.

De modo a verificar as características das ondas realmente geradas, foi necessário, com base nas séries temporais de elevação de superfície livre em três sondas, separar a agitação incidente da agitação refletida utilizando-se o método de Mansard e Funke (Sousa et al., 2011). Este método, que ao utilizar 3 sondas colocadas próximo do batedor (sondas 1, 14 e 15 ver Figura A.0.1, em anexo) e ao aplicar a técnica dos mínimos quadrados, permite separar o espectro total de cada sonda nos espectros incidentes e refletidos. Com base nestes espectros é possível determinar a altura de onda e período da agitação incidente e a altura de onda e período da agitação refletida nas fronteiras (Figura 3.6). Na Tabela 3.4 apresentam-se os valores das alturas e períodos de onda incidente.

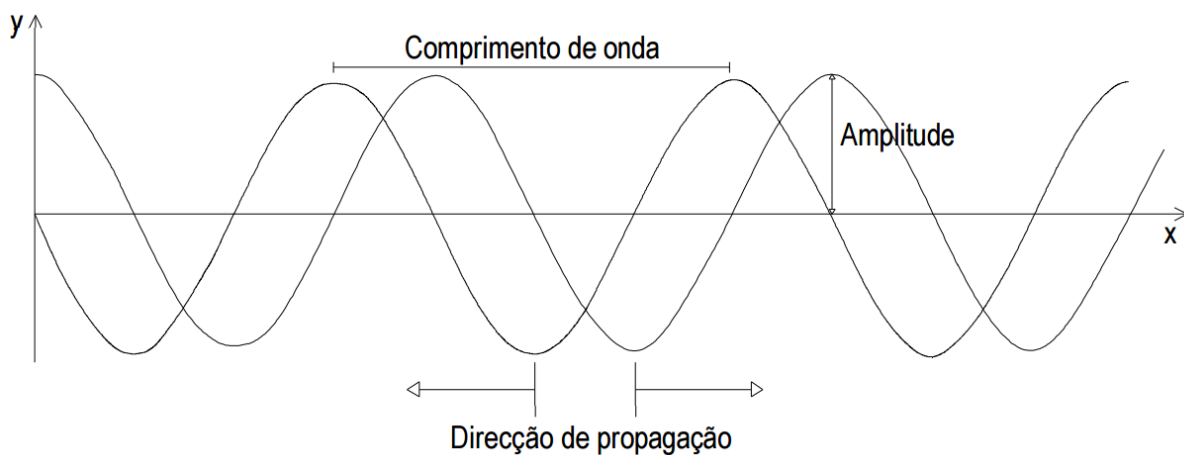


Figura 3.6 – Representação esquemática da propagação de uma onda incidente e outra refletida (Sousa et al., 2011)

Tabela 3.4 - Alturas e períodos da onda gerada no batedor e da onda incidente

	H (m)	T (s)	H incidente (m)	T incidente (s)
e/D=0.0	0.10	2.07	0.11	2.07
	0.15		0.16	
	0.20		0.21	
	0.25		0.24	
e/D=0.3	0.10		0.11	
	0.15		0.16	
	0.20		0.20	
	0.25		0.24	
e/D=0.5	0.10		0.11	
	0.15		0.15	
	0.20		0.20	
	0.25		0.24	
Anel A	0.10		0.11	
	0.15		0.16	
	0.20		0.21	
	0.25		0.25	
Anel B	0.10	0.11		
	0.15	0.16		
	0.20	0.21		
	0.25	0.24		

Como é possível observar na tabela, o período incidente é igual ao período inicial e a altura de onda incidente difere no máximo 9% da altura de onda inicial.

3.3 Cálculo das forças

As forças devidas à ação da agitação que atuam na conduta que simula o emissário submarino foram obtidas de duas maneiras: diretamente (através dos sensores de força) e indiretamente (através da integração das pressões medidas numa seção da conduta, com os sensores de pressão).

De modo a calcular as forças através dos dados medidos com os sensores de pressão, assumiu-se que o valor da pressão medido em cada sensor é constante em toda a sua área de influência. Assim sendo, as forças horizontais, F_{Hm} , e verticais, F_{Vm} , são calculadas através de (Aristodemo et al., 2010):

$$F_{Hm}(t) = A_x[p_1(t) + p_8(t) - p_4(t) - p_5(t)] + B_x[p_2(t) + p_7(t) - p_3(t) - \Delta p_6(t)] \quad (3)$$

$$F_{Vm}(t) = A_z[p_6(t) + p_7(t) - p_2(t) - \Delta p_3(t)] + B_z[p_5(t) + p_8(t) - p_1(t) - p_4(t)] \quad (4)$$

$$A_x = A_z = \int_0^{\frac{\pi}{4}} \frac{D}{2} \cos \theta d\theta \quad (5)$$

$$B_x = B_z = \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{D}{2} \cos \theta d\theta \quad (6)$$

onde A_x , B_x , A_z , B_z são as áreas de influência, calculadas em função da posição dos sensores, e p_i corresponde ao sensor de pressão i , com a posição que se apresenta na Figura 3.7.

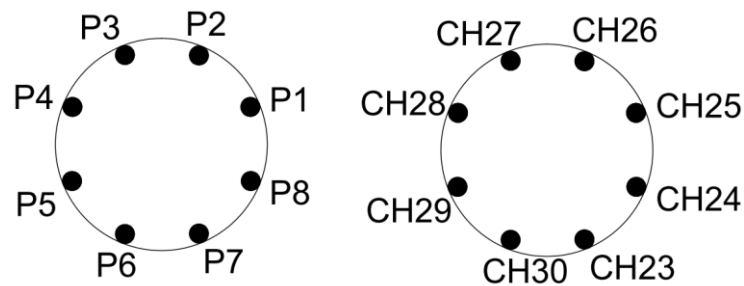


Figura 3.7 – Posições dos sensores de pressão e respetivo canal de gravação de dados

3.4 Resultados dos ensaios

Nesta secção apresentam-se os resultados dos ensaios no que se refere às forças na estrutura. Para cada ensaio obteve-se a força horizontal máxima, F_{X+} , e mínima, F_{X-} , e a força vertical máxima, F_{Y+} , e mínima, F_{Y-} . Para chegar a estes valores, obtiveram-se os máximos e mínimos das forças a cada uma das 75 ondas do registo (entre $t=73$ s e $t=228.25$ s) e calculou-se a média desses valores.

Para uma melhor análise dos resultados das forças, estas são apresentadas em dois grupos: um em que se apresentam as forças para as diferentes distâncias do emissário ao fundo, com e sem a presença dos anéis e para as diferentes alturas de onda ensaiadas a fim de analisar a influência da presença de anéis de afundamento e da distância da conduta ao fundo nas forças na conduta; e outro em que se apresentam as forças para os casos com e sem anéis e com diferentes distâncias da conduta ao fundo para diferentes direções de propagação das ondas a fim de analisar a influência da direção da agitação nas forças na conduta.

No caso dos valores das forças sem a presença dos anéis foram utilizados, para a sua análise, os sensores de pressão porque a ausência dos anéis causa uma certa instabilidade nos sensores de forças, logo os seus resultados não são muito exatos, já no caso da presença dos anéis, utilizaram-se os sensores de força.

3.4.1 Análise da influência da presença de anéis de afundamento e da distância da conduta ao fundo

Apresentam-se, neste ponto, os resultados das forças horizontais, $FX+$ e $FX-$, e verticais, $FY+$ e $FY-$, para cada uma das alturas de onda ensaiadas, com e sem a presença dos anéis de afundamento, para as direções de onda incidente de 10° , 30° e 90° .

Na Figura 3.8 apresenta-se a força horizontal máxima e mínima, $FX+$ e $FX-$, para todos os ensaios com a direção de onda incidente de 10° .

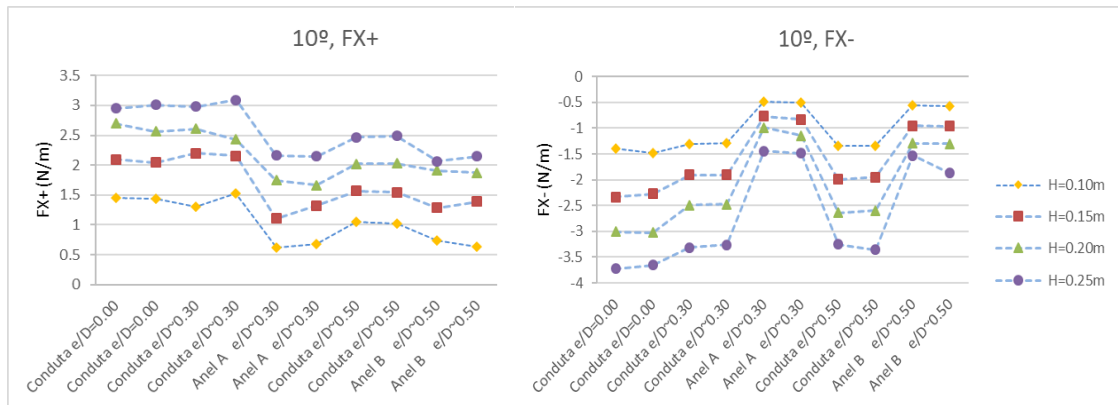


Figura 3.8 – $FX+$ e $FX-$ para a direção de onda incidente de 10°

Da análise deste gráfico é possível verificar que quanto maior a altura de onda, maior é a força horizontal máxima. A diferença entre as forças máximas obtidas para os diferentes valores de H crescente vai diminuindo à medida que cresce a altura de onda: de $H=0.10$ m para a $H=0.15$ m as forças aumentam, em média, 38%, de $H=0.15$ m a $H=0.20$ m as forças aumentam, em média, 23% e de $H=0.20$ m a $H=0.25$ m as forças aumentam, em média, 16%.

Quanto à influência da presença dos anéis nas forças horizontais máximas, verifica-se um decréscimo do seu valor, da ordem dos 40% (anel A) e 18% (Anel B), no caso do tubo sem anéis quando comparado com o caso com os anéis com a mesma distância ao fundo, e que esta variação não se altera significativamente com a altura de onda.

De modo a analisar o comportamento das forças no emissário para o caso de ter ou não anel de estabilização, a Figura 3.9 apresenta as forças horizontais no emissário, em função do tempo para o caso em que o emissário está a uma distância do fundo de 0.02 m e para o caso do anel A. O caso estudado tem uma altura de onda de 0.25 m e direção de propagação de 10° . A figura apresenta as forças no intervalo de tempo de 100 s a 120 s.

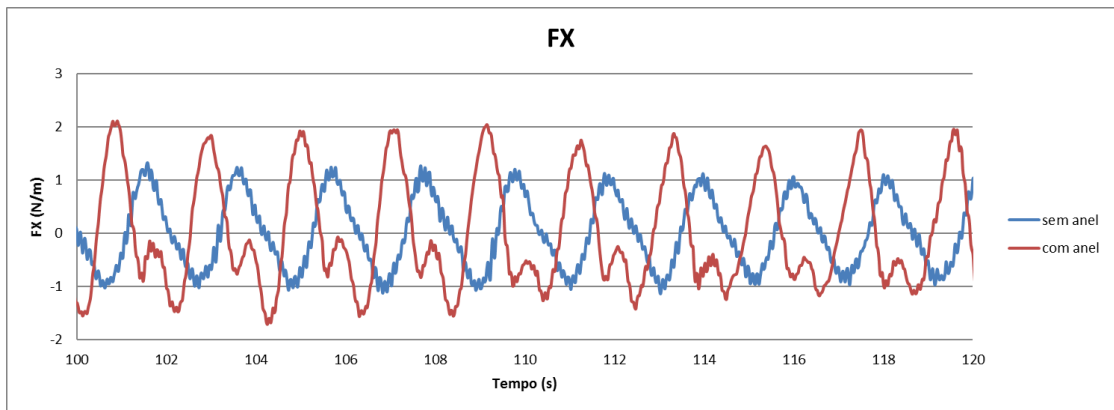


Figura 3.9 – Forças horizontais para $e=0.02$ m e anel A ($H=0.25$ m e 10°)

Na Figura 3.9 verifica-se que, nos casos com e sem anel, as forças horizontais apresentam apenas um período, correspondente ao período da onda incidente.

Quanto á influência da distância ao fundo, é possível verificar que as forças diminuem, em geral, com o aumento da distância do tubo ao fundo. No caso em que a distância ao fundo é 0.02 m, em algumas repetições, $FX+$ tem um valor superior do que no caso em que a distância ao fundo é 0 m.

Este gráfico permite verificar que quanto maior for a altura de onda, menor é o valor das forças horizontais mínimas. Tal como para a força horizontal máxima, a diferença entre as forças vai diminuindo à medida que cresce a altura de onda: de $H=0.10$ m a $H=0.15$ m as forças diminuem em média 39%, de $H=0.15$ m a $H=0.20$ m as forças diminuem em 25% e de $H=0.20$ m a $H=0.25$ m as forças diminuem em média 23%.

Para a força horizontal mínima, no entanto, já é possível observar uma maior influência da presença dos anéis de afundamento, observando-se um aumento de cerca de 55% da força das condutas sem anel quando comparada com as condutas com anel.

Na Figura 3.10 apresenta-se a força vertical máxima e mínima, $FY+$ e $FY-$, para todos os ensaios com a direção de onda incidente de 10° .

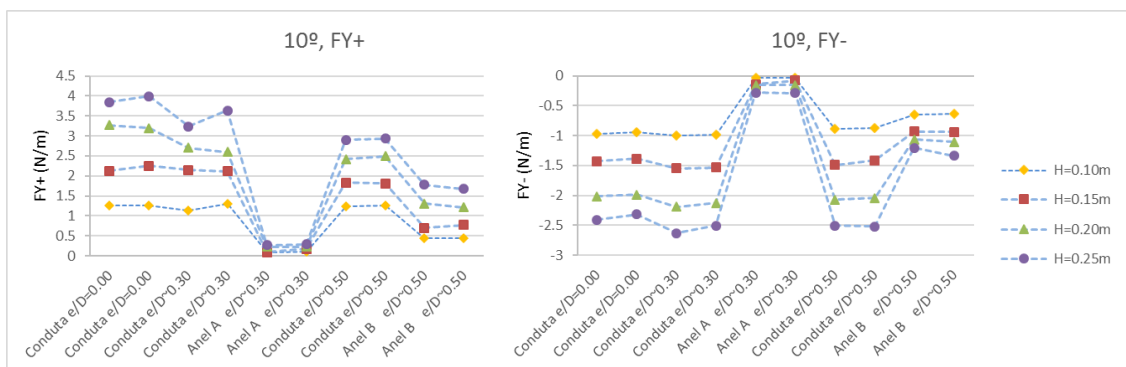


Figura 3.10 - $FY+$ e $FY-$ para a direção de onda incidente de 10°

Os gráficos das forças verticais máximas e mínimas para a direção de 10° , Figura 3.10, mostram o mesmo andamento que os gráficos da Figura 3.8, sendo que a diferença dos valores das forças para os casos com e sem anel aumentam (73% para a força vertical máxima e 66% para a força vertical mínima).

A Figura 3.11 apresenta as forças verticais, no emissário, em função do tempo para o caso em que o emissário está a uma distância do fundo de 0.02 m e para o caso do anel A. O caso estudado tem uma altura de onda de 0.25 m e direção de propagação de 10° . A figura apresenta as forças no intervalo de tempo de 100 s a 120 s.

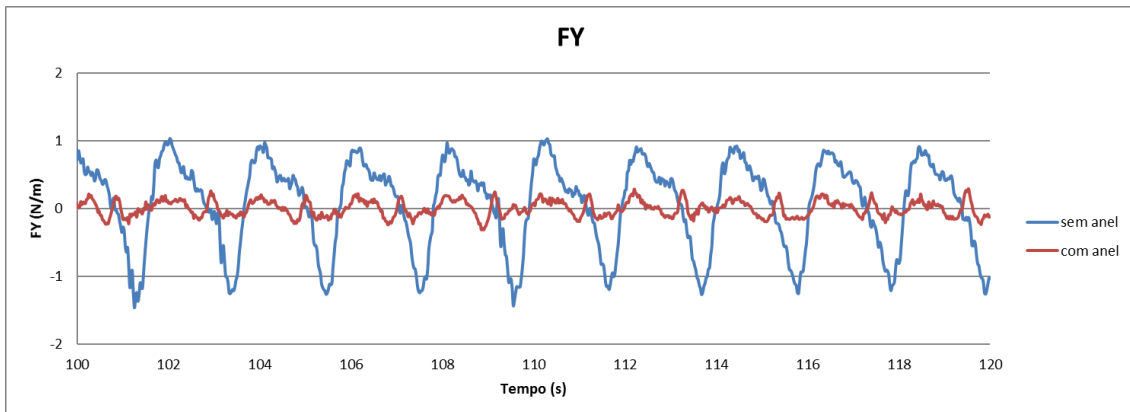


Figura 3.11 – Forças verticais para $e=0.02$ m e anel A ($H=0.25$ m e 10°)

Na Figura 3.11 observa-se que, quando o emissário tem anéis, as forças verticais têm valores muito menores (90%) do que quando não os têm. Também se verifica que, sem anéis, as forças têm o período da onda bem marcado, embora a forma da onda mostre também a presença de períodos menores, correspondentes ao período de libertação de vórtices, o que no caso com anéis já não é tão visível.

A Figura 3.12 apresenta a força horizontal máxima e mínima, $FX+$ e $FX-$, para todos os ensaios com a direção de onda incidente de 30° .

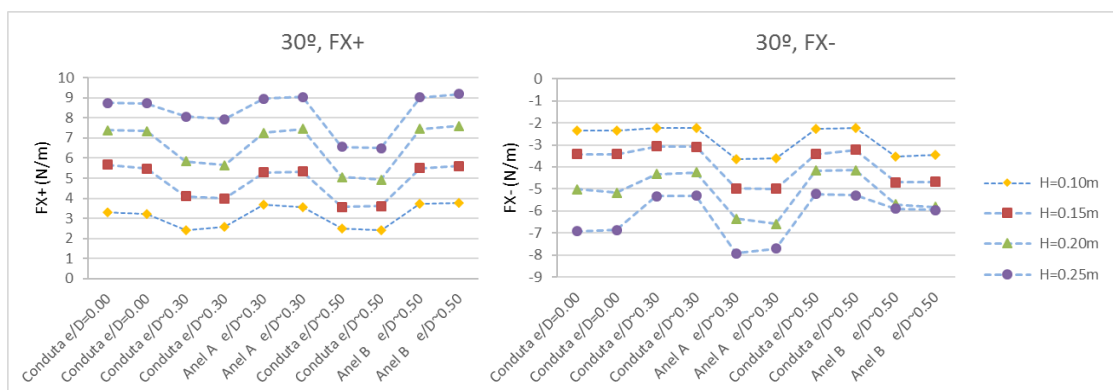


Figura 3.12 – $FX+$ e $FX-$ para a direção de onda incidente de 30°

Da análise deste gráfico verifica-se que quanto maior a altura de onda, maior é a força horizontal máxima. A diferença entre as forças máximas horizontais vai diminuindo à medida que cresce a altura de onda: de $H=0.10$ m para a $H=0.15$ m as forças aumentam em média 37%, de $H=0.15$ m a $H=0.20$ m as forças aumentam 27% e de $H=0.20$ m a $H=0.25$ m as forças aumentam em média 22%.

Quanto à influência da presença dos anéis de afundamento observa-se um aumento das forças na presença de anéis, ao contrário do que acontecia para a direção de incidência de 10° (Figura 3.8). Este aumento é de cerca de 33% da conduta com $e/D=0.5$ para a conduta com anel do Tipo B, isto é, com a mesma distância ao fundo. No anel do tipo A observa-se um aumento de 21% em relação à conduta com $e/D=0.3$.

Quanto à influência da distância ao fundo, é possível verificar que as forças diminuem ligeiramente com o aumento da distância do tubo ao fundo.

Analisando o gráfico das forças mínimas horizontais, observa-se que, tal como para o caso da direção de propagação de 10° , a intensidade relativa das forças diminui quanto maior for a altura de onda. Neste caso também a diferença entre as forças mínimas entre diferentes valores de H crescente vai diminuindo à medida que cresce a altura de onda: de $H=0.10$ m para a $H=0.15$ m as forças diminuem em média 31%, de $H=0.15$ m a $H=0.20$ m as forças diminuem em 27% e de $H=0.20$ m a $H=0.25$ m as forças diminuem em média 22%. No caso do anel B as forças têm uma descida menos acentuada: de $H=0.10$ m para a $H=0.15$ m as forças diminuem em média 26%, de $H=0.15$ m a $H=0.20$ m as forças diminuem em 18% e de $H=0.20$ m a $H=0.25$ m as forças diminuem em média 15%.

Para o anel A, observa-se uma descida das forças horizontais mínimas na ordem dos 35% em relação à conduta com $e/D=0.3$ e no anel B a descida é de cerca de 29% em relação à conduta com $e/D=0.5$.

Neste caso, a análise da influência da distância do tubo ao fundo é mais complexa, pois as forças diminuem quando a distância passa de 0.00 m para 0.02 m mas voltam a aumentar para a distância de 0.033 m.

Também comparando com o caso da Figura 3.8, percebe-se que as forças nos casos da presença dos anéis diminuem, ao contrário do que se passava para a direção de propagação de 10° , em que as forças aumentavam nos ensaios com anéis de afundamento.

Na Figura 3.13 apresenta-se a força vertical máxima e mínima, $FY+$ e $FY-$, para todos os ensaios com a direção de onda incidente de 30° .

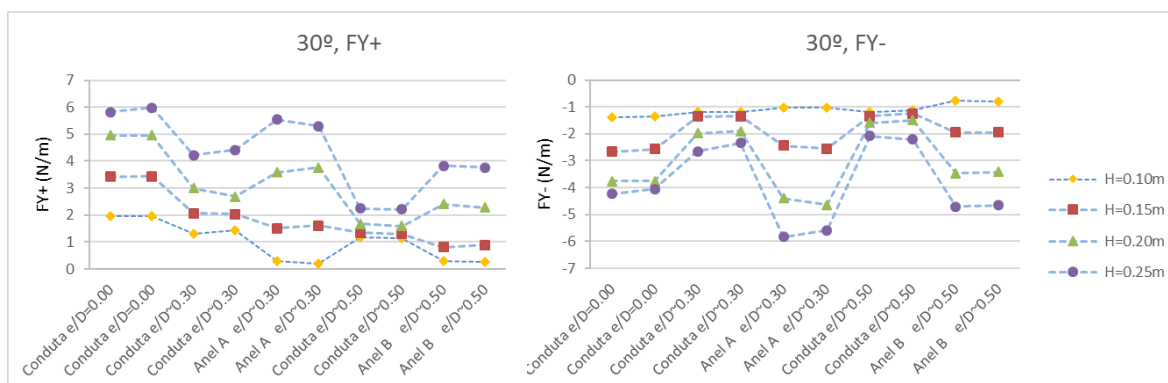


Figura 3.13 – $FY+$ e $FY-$ para a direção de onda incidente de 30°

No gráfico verifica-se que as forças verticais máximas têm um comportamento diferente com e sem a presença dos anéis, para diferentes alturas de onda: para $H=0.10$ m e $H=0.15$ m as forças decrescem em relação às condutas sem anéis, já para as alturas de onda de $H=0.20$ m e $H=0.25$ m as forças aumentam. Efetivamente, para $H=0.10$ m as forças na conduta com anéis decrescem cerca de 80% em relação à conduta sem anéis; para $H=0.15$ m o decréscimo é de 30%; para $H=0.20$ m o aumento é de cerca de 27% e para $H=0.25$ m o aumento é de cerca de 31%.

Em relação aos ensaios com a conduta sem anéis, o comportamento das forças é semelhante ao das forças horizontais: quanto maior a altura de onda, maior é a força vertical máxima. No entanto, a diferença entre as forças verticais máximas entre diferentes valores de H mantém-se constante. É possível verificar que as forças diminuem com o aumento da distância do tubo ao fundo.

O gráfico das forças verticais mínimas gráfico permite perceber que, para uma altura de onda de 0.10 m, a presença de anéis significa um pequeno aumento (cerca de 22%) das forças verticais mínimas em relação às condutas sem anéis, isto é, as forças se mantêm quase constantes para todos os ensaios, na ordem dos -1 N/m. Para as outras alturas de onda, observam-se ligeiros aumentos dos valores da força à medida que o tubo se afasta do fundo.

No que toca às outras alturas de onda com e sem a presença de anéis de afundamento, as forças verticais mínimas decrescem no caso com anéis: para $H=0.15$ m as forças decrescem cerca de 40%; para $H=0.20$ m as forças decrescem cerca de 56% e para $H=0.25$ m decrescem 55%.

Quanto à influência da altura de onda, as forças verticais mínimas diminuem com o aumento a altura de onda. Neste caso a diferença entre as forças mínimas para diferentes valores de H crescente não tem um comportamento regular: de $H=0.10$ m para a $H=0.15$ m as forças diminuem em média 24%, de $H=0.15$ m a $H=0.20$ m as forças diminuem em 25% e de $H=0.20$ m a $H=0.25$ m as forças diminuem em média 20%.

Na Figura 3.14 apresenta-se a força horizontal máxima e mínima, $FX+$ e $FX-$, para todos os ensaios com a direção de onda incidente de 90° .

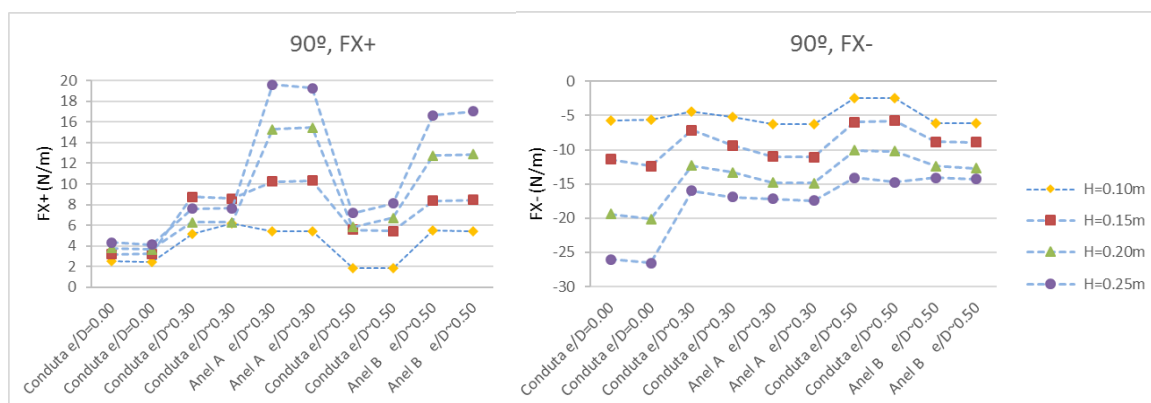


Figura 3.14– $FX+$ e $FX-$ para a direção de onda incidente de 90°

O gráfico permite observar que as forças horizontais máximas aumentam com o aumento da altura de onda, exceto no ensaio da conduta sem anéis a uma distância ao fundo de 0.02 m, em que, para $H=0.15$ m a força é maior do que para $H=0.20$ m e $H=0.25$ m.

A presença de anéis significa, em geral, um forte aumento de forças horizontais máximas quando comparada com as condutas sem anéis, exceto no caso do anel A para $H=0.10$ m, em que as forças diminuem cerca de 4%.

Para $H=0.10$ m o aumento das forças horizontais na presença de anéis de afundamento do tipo B em relação às condutas sem anéis é de cerca de 66%; para $H=0.15$ m o aumento é de cerca de 25%, para $H=0.20$ m o aumento é de cerca de 55% e para $H=0.25$ m as forças aumentam 58%.

No que respeita à influência da distância da conduta ao fundo, verifica-se que as forças aumentam quando esta passa de 0.00 m para 0.02 m mas diminuem quando passa para 0.033 m.

Na Figura 3.14 apresenta-se a força horizontal mínima, $FX-$, para todos os ensaios com a direção de onda incidente de 90° .

As forças horizontais mínimas diminuem com o aumento da altura de onda. Neste caso também o valor das forças mínimas vai diminuindo à medida que cresce a altura de onda: de $H=0.10$ m para a $H=0.15$ m as forças diminuem em média 46%, de $H=0.15$ m a $H=0.20$ m as forças diminuem em 35% e de $H=0.20$ m a $H=0.25$ m as forças diminuem em média 20%.

Nestes ensaios, muitas das repetições que foram feitas para cada caso deram origem a forças ligeiramente mais pequenas, mas as diferenças eram inferiores a 11%.

Em relação à influência da distância da conduta ao fundo, é possível observar um aumento das forças para uma maior distância ao fundo.

A presença de anéis significa, em geral, um decréscimo de forças comparado com as condutas sem anéis, exceto no caso do anel B para $H=0.25$ m, em que as forças praticamente não se alteram, ou seja, aumentam em média cerca de 1%.

Para $H=0.10$ m, na presença de anéis de afundamento em relação as condutas sem anéis, as forças horizontais mínimas decrescem cerca de 42%, para $H=0.15$ m decrescem cerca de 30%, para $H=0.20$ m decrescem cerca de 16% e para $H=0.25$ m (anel A) as forças horizontais decrescem cerca de 5%.

Na Figura 3.15 apresenta-se a força vertical máxima e mínima, $FY+$ e $FY-$, para todos os ensaios com a direção de onda incidente de 90° .

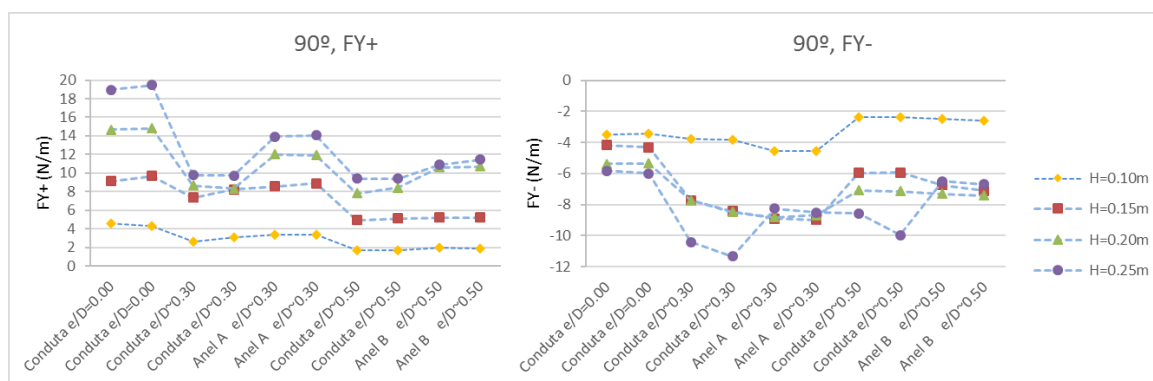


Figura 3.15 – $FY+$ e $FY-$ para a direção de onda incidente de 90°

O gráfico das forças verticais máximas revela uma disparidade nos resultados entre os ensaios para $H=0.10$ m e $H=0.15$ m e os ensaios para $H=0.20$ m e $H=0.25$ m. Nos primeiros a influência dos anéis nas forças é praticamente nula, enquanto que nos segundos existe um aumento das forças na presença dos Anéis em relação os ensaios nas condutas sem anéis. Esse aumento é de cerca de 27% para $H=0.20$ m e de 23% para $H=0.25$ m.

Da análise deste gráfico verifica-se que quanto maior a altura de onda, maior é a força vertical máxima. A diferença entre as forças máximas entre diferentes valores de H crescente vai diminuindo à medida que cresce a altura de onda: de $H=0.10$ m para a $H=0.15$ m as forças aumentam em média 65%, de $H=0.15$ m a $H=0.20$ m as forças aumentam em 28% e de $H=0.20$ m a $H=0.25$ m as forças aumentam em média 17%.

Com o aumento da distância da conduta ao fundo verifica-se um decréscimo no valor das forças. Um maior decréscimo é visível para $H=0.20$ m (49%) e $H=0.25$ m (35%) quando se passa de $e/D=0$ para $e/D=0.3$.

Ao analisar o gráfico das forças verticais mínimas verifica-se que os resultados não parecem ter um padrão determinado: seria de esperar, com base nos resultados para outras direções, que as forças diminuíssem com o aumento da altura de onda, mas para o caso da presença dos anéis e altura de onda de 0.25 m, isso não acontece. Para os ensaios com $e/D=0.3$ e com anel A, para $H=0.15$ m e 0.20 m, as forças têm valores praticamente iguais.

A presença dos anéis provoca um decréscimo das forças em relação às condutas sem anéis, exceto no caso em que $H=0.25$ m, em que há um aumento das forças de cerca de 26%.

Os decréscimos das forças para os outros casos são: para $H=0.10$ m cerca de 11%, para $H=0.15$ m de 12% e para $H=0.20$ m de cerca de 5%.

3.4.2 Análise da influência da direção de propagação forças na tubagem de emissários submarinos

Para estudar a influência direção de incidência das ondas nas forças na conduta, $FX+$, $FX-$, $FY+$ e $FY-$, compararam-se os resultados obtidos para cada uma das direções estudadas separadamente para cada um dos casos simulados, isto é, com e sem anéis e com diferentes distâncias da conduta ao fundo.

Na Figura 3.16 apresenta-se a força horizontal máxima e mínima, $FX+$ e $FX-$, para a conduta com $e/D=0$.

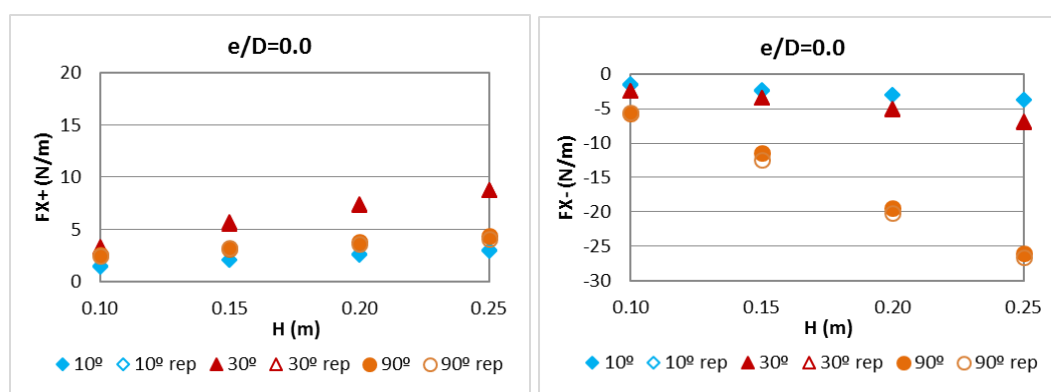


Figura 3.16 - $FX+$ e $FX-$ para a conduta com $e/D=0$

A força horizontal máxima aumenta com o aumento da altura de onda. Neste caso as forças provocadas pelas ondas incidentes a 90° têm um comportamento inesperado, pois têm valores menores que as de 30° . Quando o ângulo de incidência varia de 10° para 30° o valor das forças aumenta, em média, 62% e quando varia de 30° para 90° decrescem, em média, de 42%.

Já a força horizontal mínima diminui com o aumento da altura de onda. Também se comprova que quanto maior for o ângulo de incidência das ondas, maior é o decréscimo das forças para cada altura de onda. Quando o ângulo de incidência varia de 10° para 30° o valor das forças diminui, em média, 40% e quando varia de 30° para 90° decrescem, em média, de 70%.

Na Figura 3.17 apresenta-se a força vertical máxima e mínima, $FY+$ e $FY-$, para a conduta com $e/D=0$.

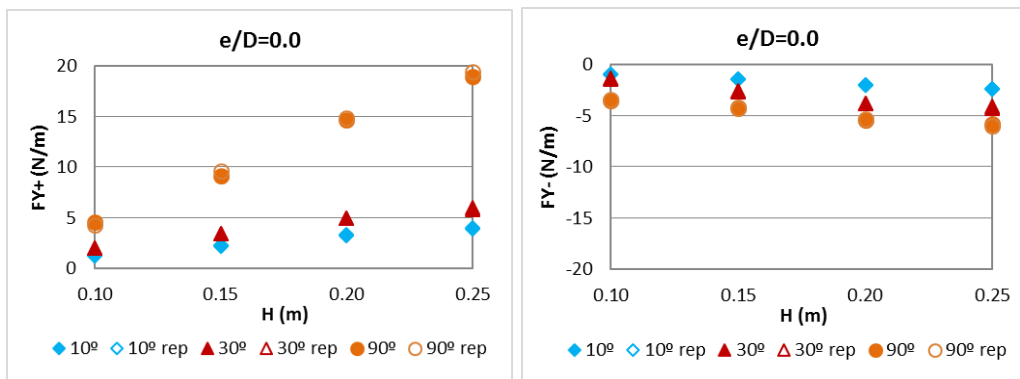


Figura 3.17 - $FY-$ para a conduta com $e/D=0$

As forças verticais máximas, $FY+$, para a conduta com $e/D=0$ que tem um comportamento semelhante à Figura 3.16 no entanto com o valor das forças a aumenta em vez de diminuir.

A força vertical mínima diminui com o aumento da altura de onda. Os valores das forças verticais mínimas quando o ângulo de incidência é 90° apresentam alguma discrepância com os valores da Figura 3.16, esperando-se valores menores.

Quando o ângulo de incidência varia de 10° para 30° o valor das forças diminui, em média, 41% e quando varia de 30° para 90° decrescem, em média, de 40%.

A Figura 3.18 apresenta a força horizontal máxima, $FX+$, e mínima, $FX-$, para a conduta com $e/D=0.3$.

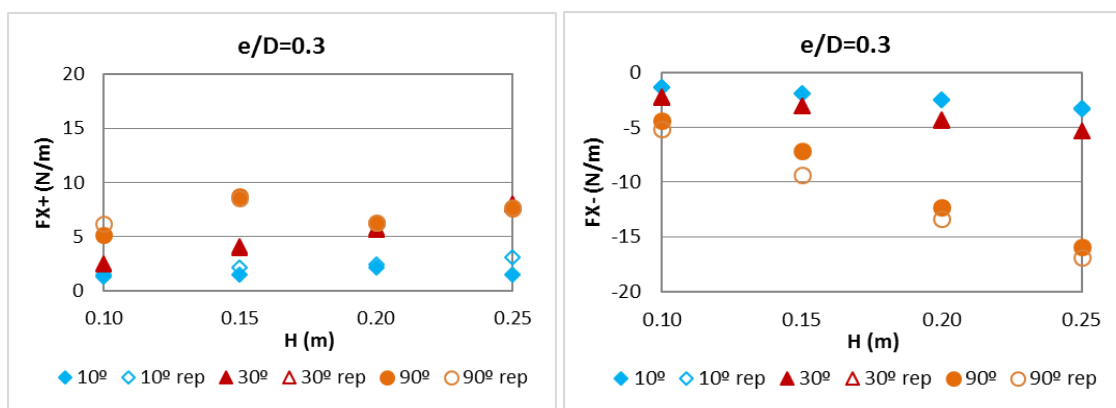


Figura 3.18 - $FX+$ e $FX-$ para a conduta com $e/D=0.3$

Neste gráfico é possível verificar que as forças horizontais máximas, em geral, aumentam com o aumento da altura de onda, exceto para 90° e para as maiores alturas de onda. Esse aumento é mais significativo quanto maior a altura de onda. Para os 90° e para $H=0.20$ m e $H=0.25$ m os valores reduzem relativamente a $H=0.15$ m, o que não é expectável, podendo dever-se a erros de medição.

Quando o ângulo de incidência varia de 10° para 30° o valor das forças aumenta, em média, 52% e quando varia de 30° para 90° o aumento é, em média, de 54% para H=0.10m e 0.15 m. Ou seja, para o caso de e/D=0.3 a variação de FX+ é semelhante entre 10° e 30° e entre 30° e 90°.

Quanto às forças horizontais mínimas, estas têm comportamentos semelhantes às da conduta com e/D=0 (Figura 3.16), tendo valores maiores, como já se tinha verificado quando se analisou a influência da distância da conduta ao fundo.

Quando o ângulo de incidência varia de 10° para 30° o valor das forças diminui, em média, 40% e quando varia de 30° para 90° o decréscimo é, em média, de 62%.

A Figura 3.19 apresenta a força vertical máxima, FY+, e mínima, FY-, para a conduta com e/D=0.3.

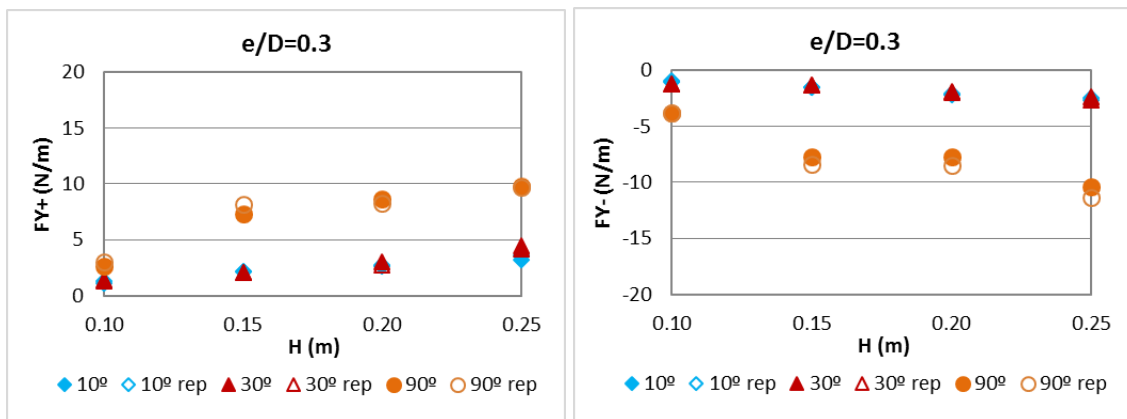


Figura 3.19 - FY+ e FY- para a conduta com e/D=0.3

O gráfico permite verificar que, para e/D=0.3, a força vertical máxima aumenta com o aumento da altura de onda.

Para incidências de ondas 10° e 30°, as forças são muito semelhantes, sendo a diferença entre eles, em média, de 10%. No entanto, quando o ângulo de incidência varia de 30° para 90° o valor das forças aumenta consideravelmente, de um valor médio de 62%.

Um comportamento semelhante ocorre para FY-, com a força vertical mínima a diminuir, em geral, com o aumento da altura de onda. No caso do ângulo de incidência de 90°, o valor de FY- para H=0.15 m é maior do que para H=0.20 m, tal como já se tinha verificado na análise da influência da altura de onda.

Tal como para FY+, os valores de forças para incidências de ondas 10° e 30° são muito semelhantes, sendo a diferença entre eles, em média, de 10%. Quando o ângulo de incidência varia de 30° para 90° o valor de FY- decresce, em média, 62%.

A Figura 3.20 apresenta a força horizontal máxima e mínima, F_{X+} e F_{X-} , para a conduta com o anel A.

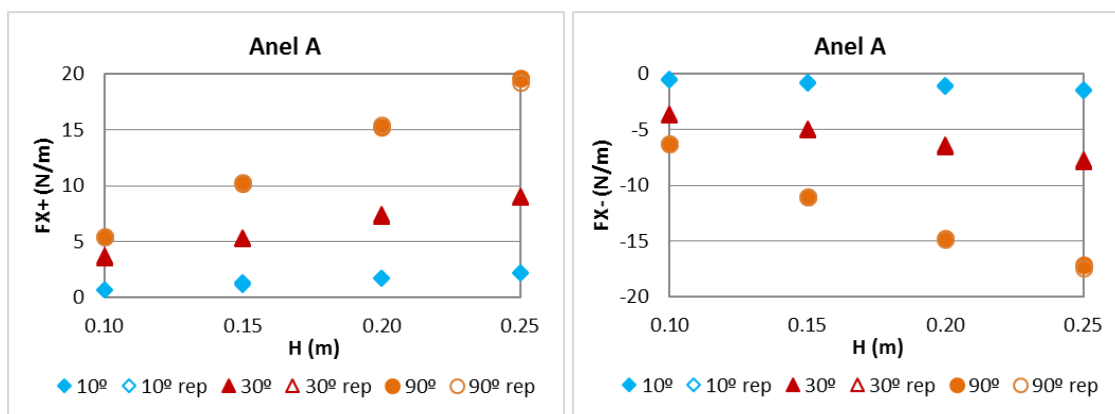


Figura 3.20 - F_{X+} e F_{X-} para a conduta com o anel A

A força horizontal máxima aumenta com o aumento da altura de onda e quanto maior for o ângulo de incidência das ondas: de 10° para 30° o valor das forças aumenta, em média, 78% e de 30° para 90° aumenta, em média, de 47%.

As forças horizontais mínimas, F_{X-} têm um comportamento semelhante ao F_{X+} mas com o valor das forças a decrescer com o ângulo em vez de aumentar.

A Figura 3.21 apresenta a força vertical máxima e mínima, F_{Y+} e F_{Y-} , para a conduta com o anel A.

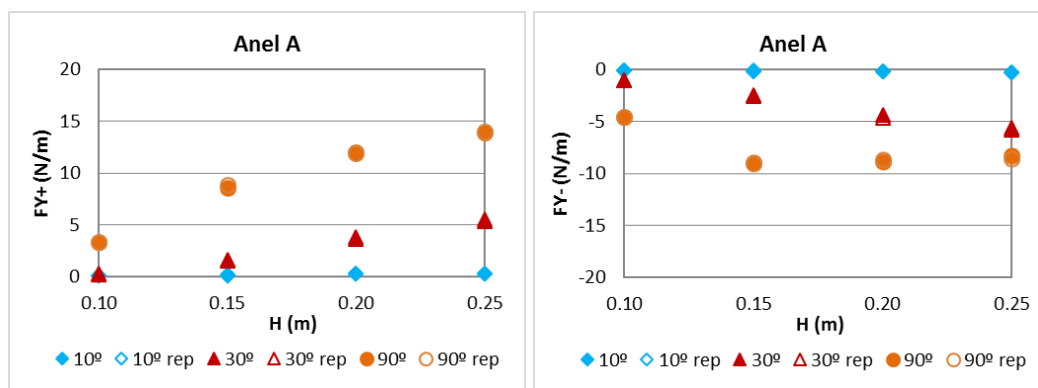


Figura 3.21 - F_{Y+} e F_{Y-} para a conduta com o anel A

Para F_{Y+} os gráficos são semelhantes ao das forças horizontais máximas, F_{X+} , mas com as forças a aumentar 86% de 10° para 30° e a aumentar 76% de 30° para 90° .

Já a força vertical mínima, F_{Y-} , diminui, em geral, com o aumento da altura de onda. No caso de 90° , no entanto, o valor de F_{Y-} para $H=0.15$ m é menor do que para $H=0.20$ m, tal como já se tinha verificado na análise da influência da altura de onda. Quando o ângulo de incidência varia de 10° para 30° o valor de F_{Y-} diminui, em média, 96% e quando varia de 30° para 90° decrescem, em média, de 58%.

O Figura 3.22 apresenta a força horizontal máxima, $FX+$, e mínima, $FX-$, para a conduta com $e/D=0.5$.

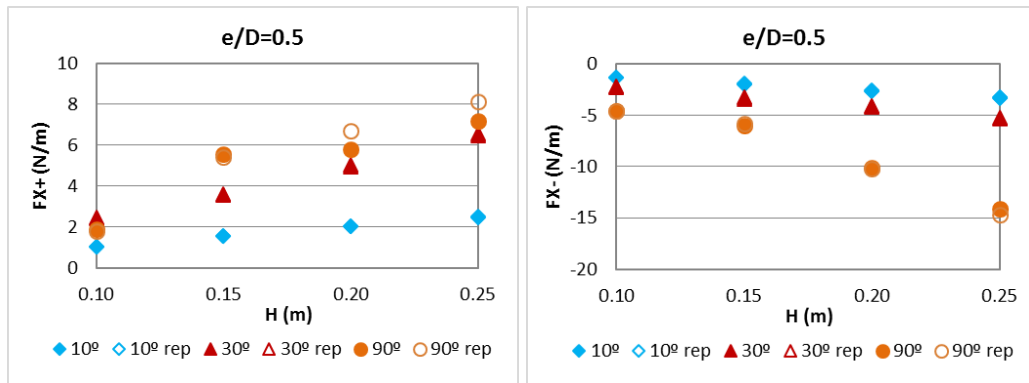


Figura 3.22 - $FX+$ e $FX-$ para a conduta com $e/D=0.5$

A força horizontal máxima aumenta, em geral, com o aumento da altura de onda, exceto no primeiro ensaio com direção de incidência da onda 90° e $H=0.20$ m e $H=0.25$ m, onde possivelmente ocorrem erros de medição. Para $H=0.10$ m e direção 90° a força tem um valor que não corresponde ao esperado (inferior ao da direção 30°). Quando o ângulo de incidência varia de 10° para 30° o valor de $FX+$ aumenta, em média, 59% e quando varia de 30° para 90° aumentam, em média, de 23%, exceto para $H=0.10$ m, onde decrescem cerca de 25%.

Quanto à força horizontal mínima, esta diminui com o aumento da altura de onda e com o aumento do ângulo de incidência. Quando o ângulo de incidência varia de 10° para 30° o valor das forças diminui, em média, 40% e quando varia de 30° para 90° decresce, em média, de 44%. Ou seja, para o caso de $e/D=0.5$, a variação de $FX-$ é semelhante entre 10° e 30° e entre 30° e 90° .

A Figura 3.23 apresenta a força vertical máxima, $FY+$, e mínima, $FY-$, para a conduta com $e/D=0.5$.

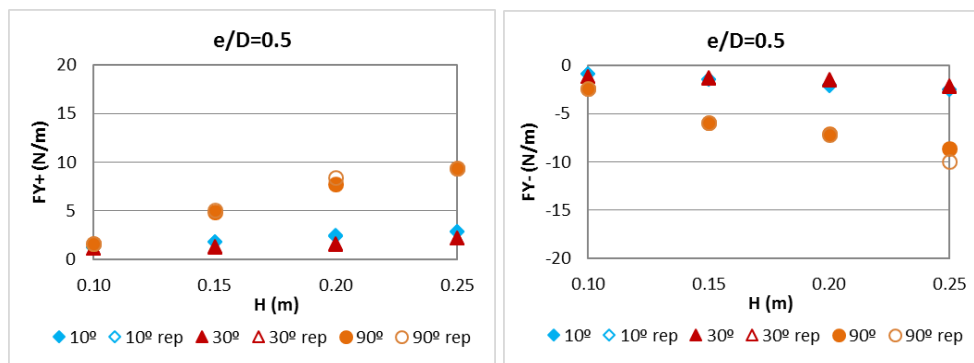


Figura 3.23 - $FY+$ e $FY-$ para a conduta com $e/D=0.5$

Para este caso, a força vertical máxima aumenta com o aumento da altura de onda e as forças provocadas pelas ondas incidentes a 30° têm valores menores que as de 10° . Quando o ângulo de incidência varia de 10° para 30° o valor das forças decresce, em média, 23% e quando varia de 30° para 90° aumenta, em média, de 65%.

A força vertical mínima, $FY-$, para a conduta com $e/D=0.5$ tem um comportamento semelhante ao de $FY+$. No entanto, o valor de $FY-$ decresce com o aumento da altura de onda.

A Figura 3.24 apresenta a força horizontal máxima, $FX+$, e mínima, $FX-$, para a conduta com o anel B.

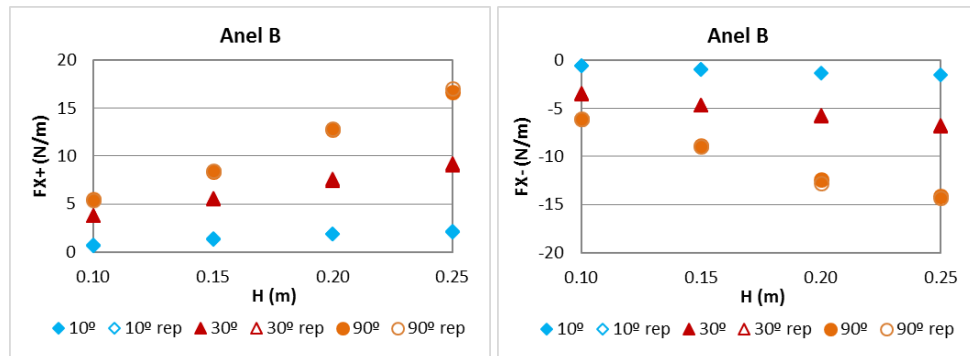


Figura 3.24 - $FX+$ e $FX-$ para a conduta com o anel B

Neste gráfico é possível verificar que a força horizontal máxima é maior quanto maior for a altura de onda. Quando o ângulo de incidência varia de 10° para 30° o valor das forças aumenta, em média, 77% e quando varia de 30° para 90° aumenta, em média, de 40%.

Já a força horizontal mínima, $FX-$, tem um comportamento semelhante ao do caso $FX+$, mas com o valor das forças a decrescer.

A Figura 3.25 apresenta a força vertical máxima, $FY+$, e mínima, $FY-$, para a conduta com o anel B.

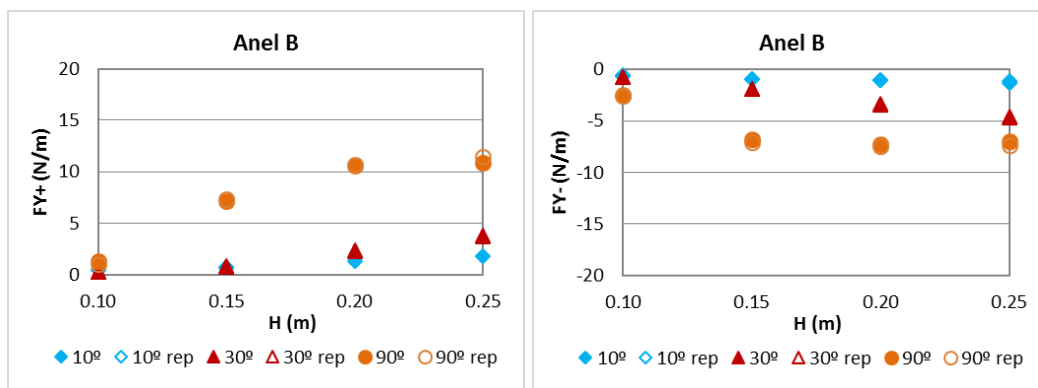


Figura 3.25 - $FY+$ e $FY-$ para a conduta com o anel B

Neste gráfico é possível verificar que a força vertical máxima aumenta, em geral, quanto maior for a altura de onda, exceto no primeiro ensaio com direção 90° e $H=0.25$ m, onde possivelmente ocorreu um erro de medição.

Neste caso as forças provocadas pelas ondas incidentes a 30° com $H=0.15$ m têm um comportamento diferente dos outros casos, pois têm valores ligeiramente menores que as de 10° . Quando

o ângulo de incidência varia de 10° para 30° o valor das forças aumenta, em média, 38%, exceto para $H=0.15$ m, onde decrescem cerca de 13% e quando varia de 30° para 90° aumentam, em média, de 76%.

Já a força vertical mínima diminui, em geral, quanto maior for a altura de onda. No caso em que o ângulo de incidência é de 90° , o valor da força para $H=0.25$ m é menor do que para $H=0.20$ m, tal como já se tinha verificado na análise da influência da altura de onda.

Quando o ângulo de incidência varia de 10° para 30° o valor das forças diminui, em média, 53% e quando varia de 30° para 90° decrescem, em média, de 56%. Ou seja, para o caso do anel B a variação de F_Y é semelhante entre 10° e 30° e entre 30° e 90° .

De modo a compreender o comportamento das forças no emissário para cada direção de propagação de onda, as Figura 3.26 Figura 3.28 apresentam as forças horizontais e verticais, respetivamente, no emissário, em função do tempo para 10° , 30° e 90° , para uma distância ao fundo de 0.02 m e uma altura de onda de 0.25 m. Nas Figura 3.27 Figura 3.29 apresentam-se os respetivos espectros.

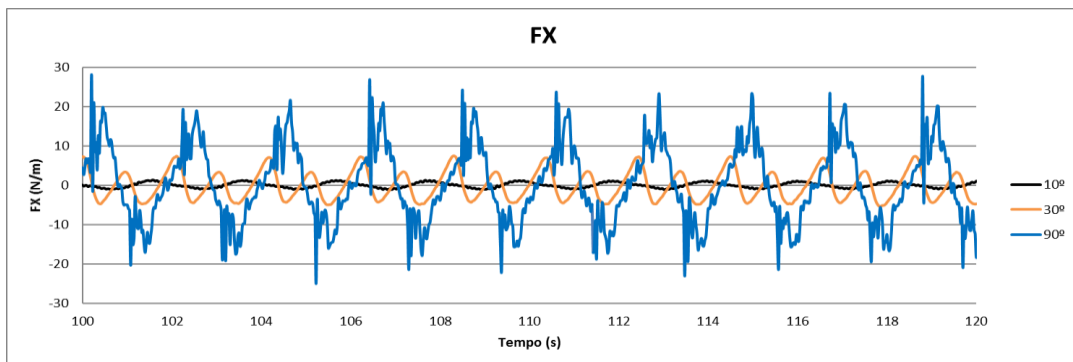


Figura 3.26 – Forças horizontais para 10° , 30° e 90° ($H=0.25$ m e $e=0.02$ m)

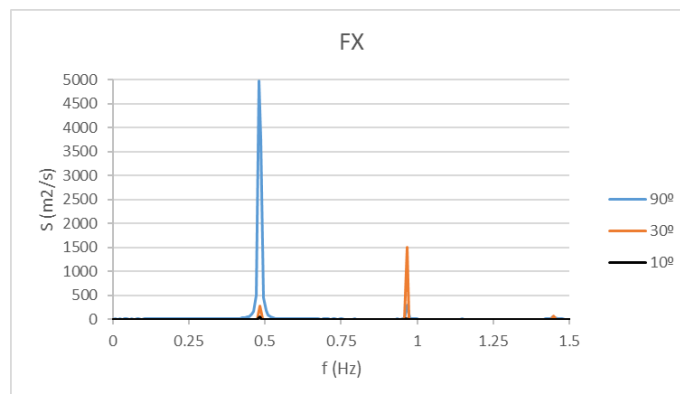


Figura 3.27 - Espectro correspondente às forças horizontais FX

Nas Figura 3.26 e 3.27 observa-se que, para 10° e 30° , as forças horizontais apresentam a sua energia num período principal, igual ao período da onda incidente ($T=2.07s$, $f=0.48$ Hz), como já se tinha verificado na Figura 3.9. Para 90° é possível verificar que as forças apresentam dois períodos, sendo mais energético o período igual a metade do período da onda, que corresponde ao período de desprendimento de vórtices (2 vórtices). Para 90° a série temporal apresenta algum ruído. Como já se tinha referido no capítulo 2.2, com esta análise é possível confirmar que a intensidade das forças atinge um máximo quando a direção de propagação da onda é 90° e é quase nula para 10° .

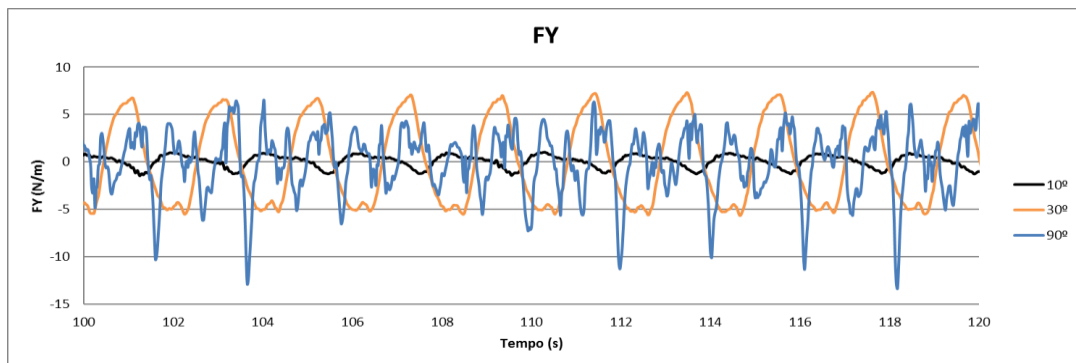


Figura 3.28 – Forças verticais para 10° , 30° e 90° ($H=0.25$ m e $e=0.02$ m)

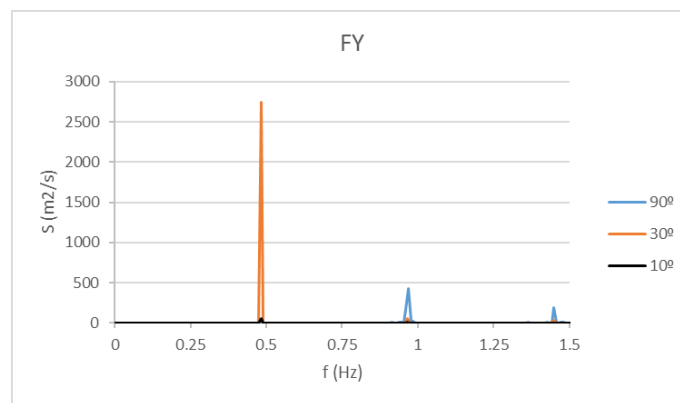


Figura 3.29 - Espectro correspondente às forças verticais FY

No caso das forças verticais, para 10° , estas continuam a apresentar um período principal igual ao período da onda incidente, enquanto para 30° se verifica uma alteração da forma da onda devido à presença de energia menor em períodos mais pequenos, correspondentes aos períodos de desprendimento de vórtices. Para 90° aparecem dois períodos visíveis no espectro, inferiores ao período da onda. De modo a entender o comportamento das forças verticais para o caso dos 90° serão necessários mais estudos.

Na Figura 3.30 estão apresentadas imagens do escoamento obtidas com uma câmara de vídeo submersa nos ensaios com anéis do tipo A para 10° , 30° e 90° . É possível observar que, para 10° e 30° , devido à obliquidade da incidência e à presença dos anéis, o escoamento fica preso entre anéis e não é tão visível o desprendimento de vórtices como no caso dos 90° , onde há um claro desprendimento dos vórtices.

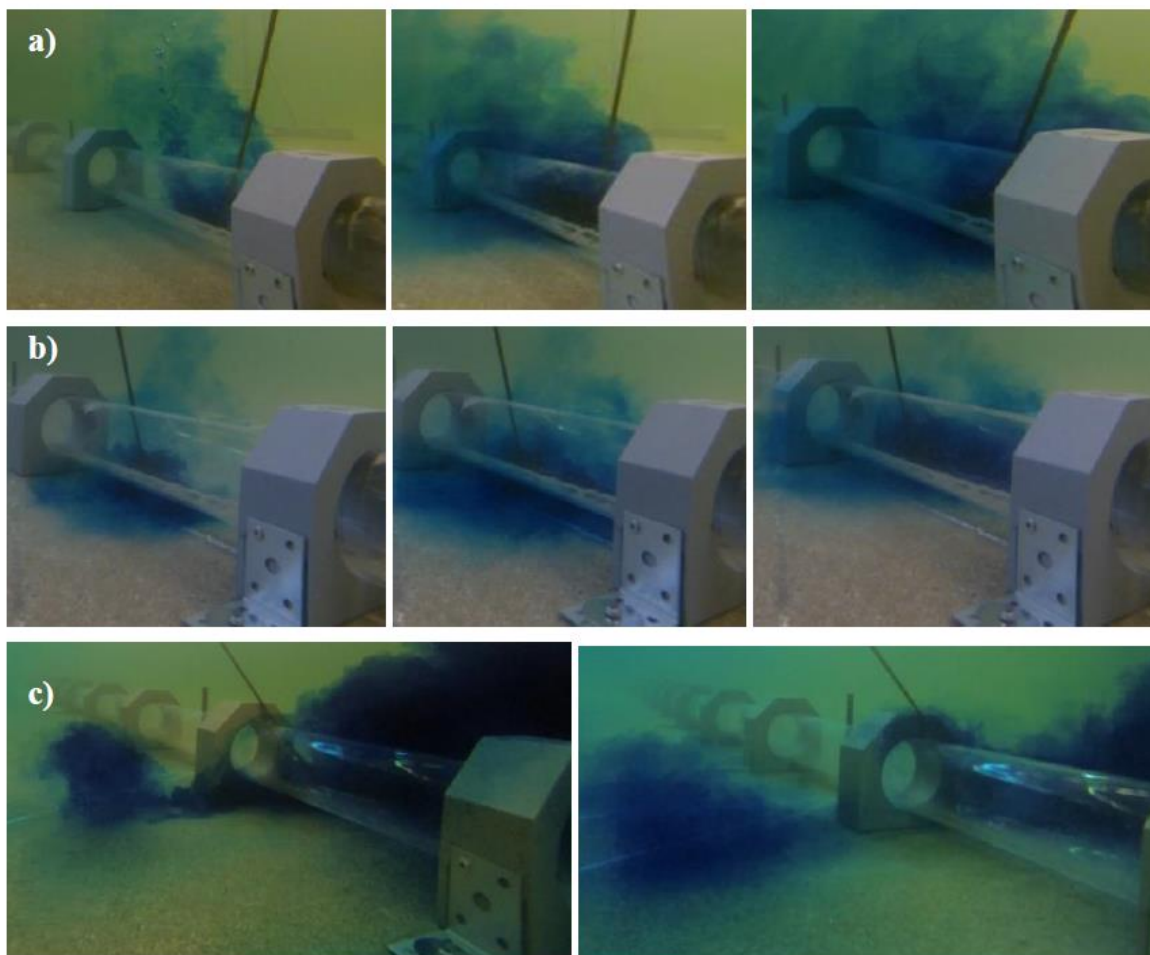


Figura 3.30 - Imagens do escoamento nos ensaios com anéis do tipo A para a) 10° , b) 30° e c) 90° (Neves et al., 2013)

4 Modelação numérica das forças em cilindros, utilizando o modelo IH2VOF

4.1 Considerações gerais

Neste capítulo descrevem-se as simulações realizadas com o modelo IH2VOF.

De modo a ser possível analisar as forças para as mesmas condições dos ensaios num modelo numérico, foram realizadas 8 simulações utilizando modelo IH2VOF. Todas as simulações foram feitas para uma conduta de 0,07m de diâmetro, um período de 2.07s e a direção de propagação da onda de 90°, por se tratar de um modelo bidimensional.

Inicialmente foram feitas simulações para 3 malhas de dimensões diferentes, de modo a fazer uma análise de sensibilidade dos resultados à dimensão das malhas. Começou-se por se considerar uma malha de 50 células por diâmetro, mas o número de células era superior ao máximo definido na versão do modelo disponível.

Optou-se então por malhas de 35, 28 e 20 células por diâmetro, sendo que a malha com mais células tem 575609, que é um valor menor do que o limite do modelo (600000).

Para a análise de sensibilidade das malhas, as simulações foram feitas para uma altura de onda de 0,15m e para uma distância da conduta ao fundo de 0,02m.

De seguida foram simuladas malhas de 35 células por diâmetro e para uma distância da conduta ao fundo de 0,02m com alturas de onda de 0,10m, 0,20m e 0,25m (sendo que a altura de onda 0,15m já tinha sido simulada para a análise de sensibilidade).

Por ultimo foram simuladas malhas de 35 células por diâmetro e com altura de onda de 0,10m, para distâncias da conduta ao fundo de 0,0m e 0,033m.

A Tabela 4.1 resume os casos simulados.

Tabela 4.1 – Casos simulados

Malha	D (m)	e (m)	e/D	H (m)	T (s)	Direção da propagação da onda
D/20	0.07	0.02	≈0.3	0.15	2.07	90°
D/28		0.02	≈0.3	0.15		
D/35		0.02	≈0.3	0.15		
D/35		0.02	≈0.3	0.20		
D/35		0.02	≈0.3	0.25		
D/35		0.02	≈0.3	0.10		
D/35		0.00	≈0.0	0.10		
D/35		0.033	≈0.5	0.10		

4.2 Descrição do modelo

O IH2VOF é um modelo numérico desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica da Universidade de Cantábria a partir do modelo COBRAS (*Cornell Breaking Waves and Structure*), desenvolvido pela Universidade de Cornell (IH-2VOF, 2013)

Este modelo é usado para simular a interação onda-estrutura, modelando escoamentos bidimensionais em domínios variados, nomeadamente, fluidos, zonas permeáveis e zonas impermeáveis.

Para a obtenção da superfície livre, o modelo recorre ao método VOF (*Volume of fluid*).

O IH-2VOF utiliza uma decomposição de Reynolds (equações RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) para domínios completamente fluidos e equações VARANS (*Volume Averaged Reynolds Navier-Stokes*) para escoamentos em meios porosos) para os campos de velocidades e pressões e um modelo de turbulência k- ϵ .

O modelo permite modelar a propagação e transformação das ondas, a interação destas com a estrutura (simulando o espraiamento, a reflexão, o galgamento, a transmissão e a pressão hidrodinâmica que atuam na sua superfície), o estudo da turbulência e vorticidade e escoamentos em superfície livre em meios porosos e em torno de obstáculos impermeáveis (Inverno et al., 2013).

4.3 Condições de agitação, domínio de cálculo e malhas

De modo a gerar uma malha que possa ser simulada no modelo IH2VOF o Instituto de Hidráulica da Universidade de Cantábria criou a interface CORAL, que gera malhas de diferenças finitas, com interface gráfica (*graphic user interface* - GUI). A malha é definida por condições de fronteira, pela geometria dos obstáculos e porosidade dos materiais.

Ao definir a malha bidimensional, o domínio é dividido por subzonas em x, direção de propagação das ondas, e em y, direção perpendicular a x, como é possível observar na Figura 4.1.

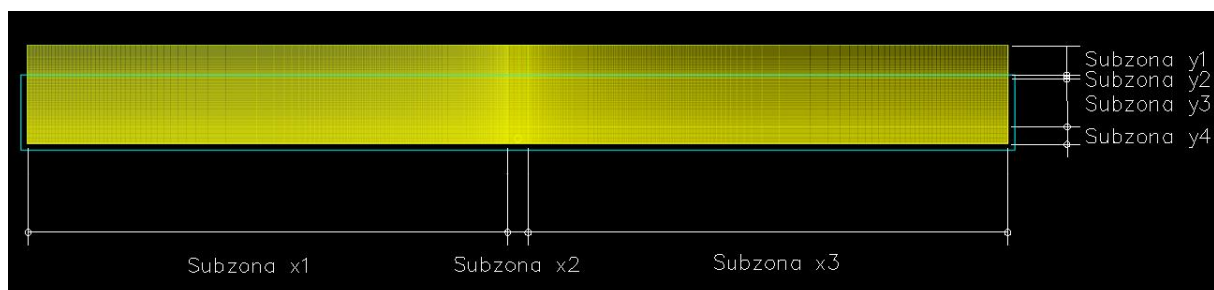


Figura 4.1 – Malha dividida em subzonas

O primeiro passo para definir a malha é a delimitação do domínio em x e em y, tendo em conta que o comprimento do canal deve ser, no mínimo, 1.5 do comprimento de onda para incluir a estrutura e a simulação dos principais fenómenos.

De seguida é preciso definir as posições das subzonas das malhas. Em x as malhas têm 3 subzonas, duas irregulares (sx1 e sx3) e uma, na zona onde se encontra a conduta, regular (sx2). Em y as malhas têm 4 subzonas: uma irregular (sy1) até a nível da água, uma regular (sy2) durante alguns centímetros (de modo a ter 10 células regulares), uma outra irregular (sy3) e por fim uma regular (sy4) na zona onde se encontra a conduta.

Para criar as subzonas é preciso indicar a coordenada do centro da subzona (que para as subzonas regulares é o valor ao centro das mesmas, mas para as irregulares é o comprimento da subzona menos a última célula), a divisão (posição onde começa a subzona), o número de células à direita e à esquerda do centro e por último a dimensão da célula mais pequena).

Por último é preciso definir as fronteiras do líquido (água) e a geometria da conduta.

Para definir as fronteiras do líquido consideraram-se 4 pontos: dois com y onde se encontra o nível da água (0.3 m, eixo do y desenvolve-se de cima para baixo e o de x da esquerda para a direita) e x fora do domínio da malha; e os outros dois com y superior a 1 m e com x também fora do domínio da malha.

Para a obtenção geometria da conduta, desenhada em AUTOCAD, retiraram-se as coordenadas de pontos do cilindro distanciados entre si de 5°. O centro do cilindro foi colocado em x=5 m e em y variou entre y=0.035 m, 0.055 m e 0.088 m, de acordo com a distância do cilindro ao fundo que se pretendia simular.

Na Figura 4.2 observa-se a malha com as subzonas, a fronteira da água e a geometria da conduta definidas. A Tabela 4.2 disponibiliza uma discretização das malhas D/20, D/28 e D/35.

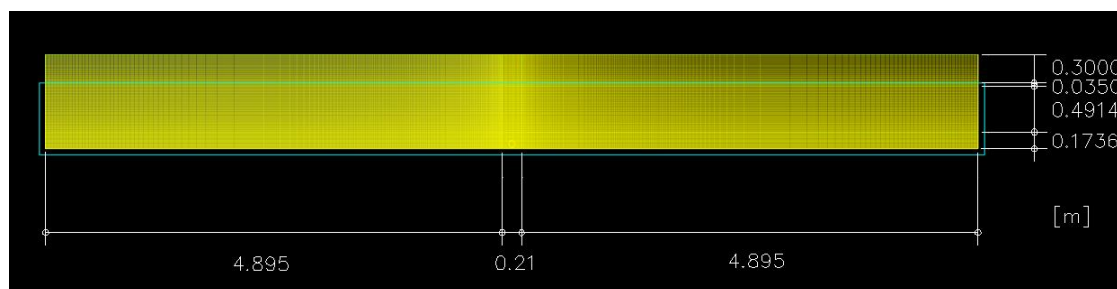


Figura 4.2 – Malha com as subzonas utilizadas

Tabela 4.2 – Discretização das malhas

Malha	nº de linhas	nº de colunas	nº de células	dx [m] Sx1 e Sx3 (fronteira)	dy [m] Sy1 (fronteira)	dy [m] Sy2	dx e dy [m] Sx2 e Sy4
D/20	207	995	205965	0.0175	0.014	0.005	0.0035
D/28	290	1391	403390	0.0125	0.01	0.0035	0.0025
D/35	331	1739	575609	0.01	0.008	0.0035	0.002

No modelo IH2VOF foram posicionadas 27 sondas (Figura 4.3 e Tabela 4.3) de modo a se poder fazer uma boa leitura dos resultados, incluindo 15 posicionadas nas mesmas coordenadas das dos ensaios físicos.

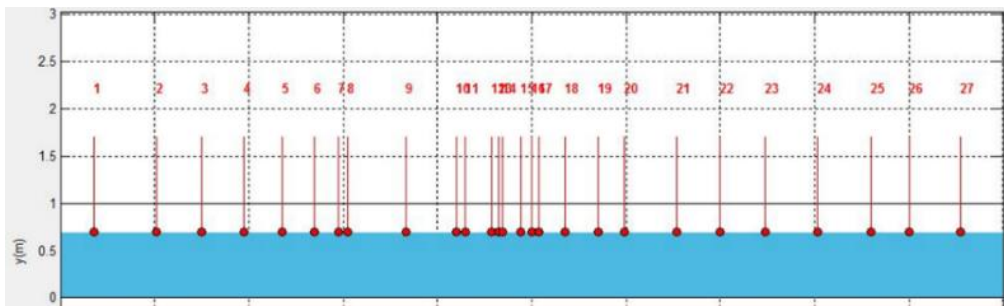


Figura 4.3 – Posição das sondas no modelo IH2VOF

Tabela 4.3 – Coordenadas das sondas no modelo IH2VOF

Sondas	X (m)	Sondas	X (m)
1	0.36	15	4.88
2	1.02	16	5.00
3	1.50	17	5.08
4	1.95	18	5.35
5	2.35	19	5.700
6	2.70	20	5.98
7	2.95	21	6.54
8	3.05	22	6.99
9	3.67	23	7.48
10	4.20	24	8.03
11	4.300	25	8.60
12	4.57	26	9.00
13	4.65	27	9.55
14	4.69		

Para o cálculo das forças foi utilizado o método descrito no capítulo 3.3 e para a sua execução usou-se um programa em MATLAB (Inverno, 2013) e adaptado para os dados destas simulações.

4.4 Dimensão da camada limite

O escoamento de um líquido numa zona onde existe um sólido em repouso, como seja o fundo ou o cilindro no caso de estudo desta dissertação, tem velocidades nulas junto à parede, o que implica a existência de uma região de forte gradiente de velocidade segundo a normal à parede, e, portanto, o aparecimento de tensões tangenciais. A camada limite é essa camada fina que se forma junto ao sólido em repouso e onde existe uma alteração do perfil de velocidades. Exteriormente à camada limite, os gradientes da velocidade são em geral pequenos (Quintela et al., 2000).

Num canal com fundo fixo, em regime permanente, a camada limite desenvolve-se a partir da fronteira de entrada do canal e cresce para jusante, como se vê na Figura 4.4. A determinada distância

da entrada ela encontra-se completamente desenvolvida, mantendo a sua espessura constante e fora dela a velocidade constante na coluna de água.

O crescimento da espessura da camada limite é menor quando as pressões no exterior à mesma decrescem no sentido do escoamento.

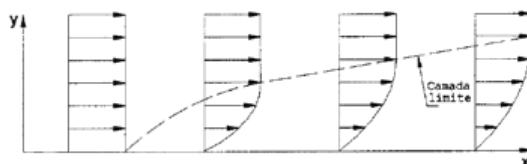


Figura 4.4 - Camada Limite (Lacerda et al, 2001)

De modo a definir a zona a partir da qual a camada limite se encontra completamente desenvolvida e calcular a sua espessura, analisou-se a simulação do modelo com a malha (de 20 pontos por diâmetro) para um período de 2.07 s, uma altura de onda de 0,15m, a conduta a uma distância de 0,02 m do fundo e considerou-se absorção de reflexão nas duas fronteiras.

Foram analisados os perfis de velocidades em diversos pontos ao longo do canal, correspondente à posição das sondas 4 ($x=1.95\text{m}$), 5 ($x=2.2.35\text{m}$), 6 ($x=2.7\text{m}$), 7 ($x=2.95\text{m}$), e 8 ($x=3.05\text{m}$).

De forma a analisar os valores máximos e mínimos da velocidade horizontal nas secções de análise, estes perfis foram analisados para os instantes em que a cava e a crista da onda se encontram sobre a respetiva sonda. Foram considerados os valores médios das velocidades para 15 ondas, que corresponde ao intervalo temporal entre 39,2764 s e 71,3007 s.

A Figura 4.5 e a Figura 4.6 apresentam os valores do perfil de velocidades máximas obtidos aquando da passagem da crista e da cava em diferentes pontos do canal.

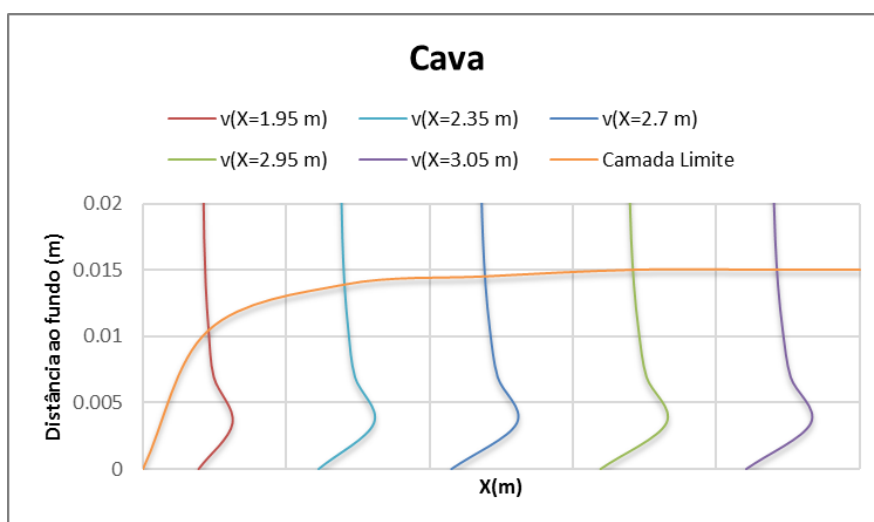


Figura 4.5 - Perfis de velocidade aquando da passagem da cava, para a altura de onda 0.15m

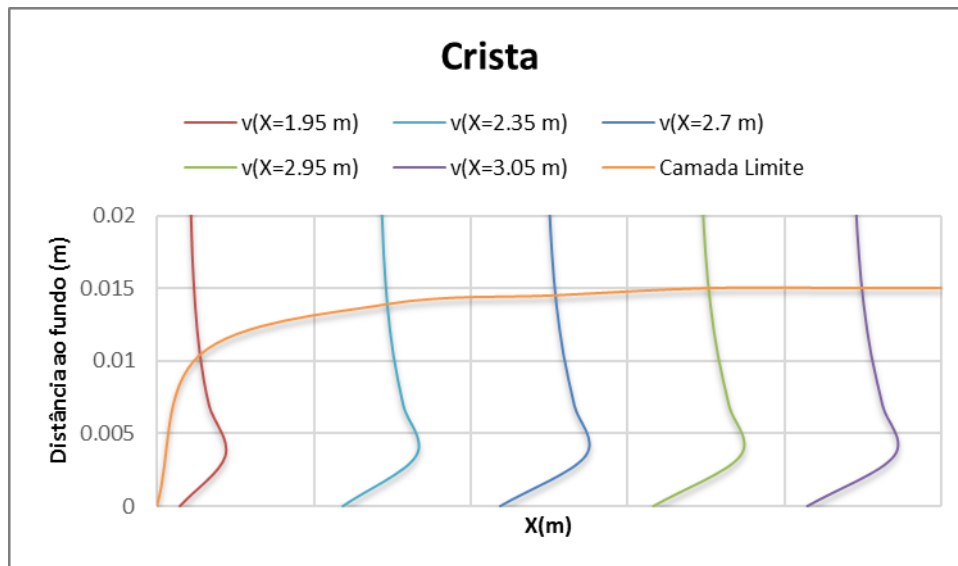


Figura 4.6 - Perfis de velocidade aquando da passagem da crista, para a altura de onda 0.15m

Analisando a Figura 4.5 e a Figura 4.6 é possível concluir que, junto ao fundo, devido à rugosidade do fundo e às forças de atrito, a velocidade tende para zero e à medida que se vai afastando do fundo, a velocidade aumenta até um determinado ponto e depois decresce até ficar praticamente constante a partir de uma certa distância ao fundo. Considerando como espessura da camada limite a distância entre o fundo e o nível onde o valor da velocidade na coluna de água se mantém constante, verifica-se que essa distância é de 15mm nesta simulação.

No que se refere à distância a partir da qual a camada limite se encontra totalmente desenvolvida, como se pode observar nas figuras, a partir de uma distância da fronteira de entrada de 2.35 metros (sonda 5) a velocidade é constante na coluna de água fora da camada limite, logo é a partir de aí que esta se encontra completamente desenvolvida.

Nas Figura 4.7 e Figura 4.8 é possível observar em detalhe o perfil de velocidades na direção de propagação das ondas, U, medidas na sonda 5 (X=2.35m) na cava e na crista.

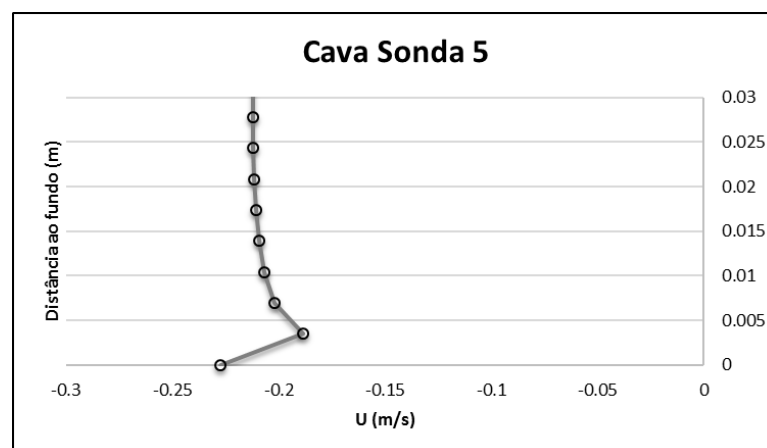


Figura 4.7 - Perfil de velocidades aquando da passagem da cava, para a altura de onda 0.15m em X=2.35m

Na Figura 4.7 é possível verificar que, na sonda 5, a velocidade é -0.23 m/s junto a fundo, atinge um máximo de -0.19 m/s a 0.004 m do fundo e acaba por estabilizar a uma velocidade de -0.22 m/s.

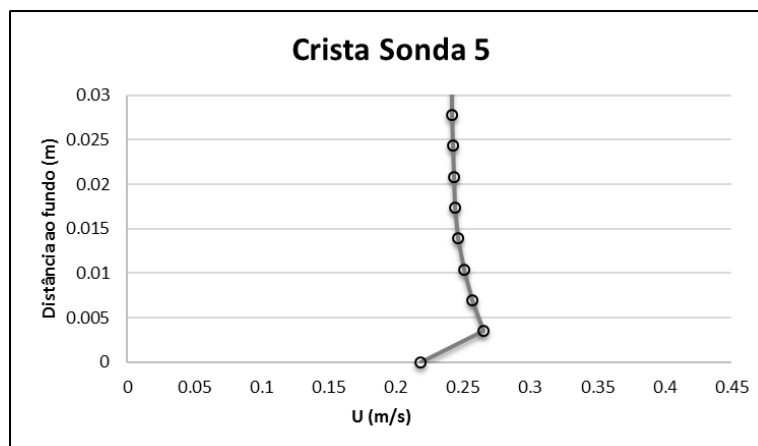


Figura 4.8 - Perfil de velocidade aquando da passagem da crista, para a altura de onda 0.15m em X=2.35m

A Figura 4.8 demonstra que, na sonda 5, a velocidade é 0.22 m/s junto ao fundo, atinge um máximo de 0.27 m/s a 0.004 m do fundo e acaba por estabilizar a uma velocidade de 0.24 m/s.

4.5 *Análise de sensibilidade*

Neste capítulo apresenta-se uma análise de sensibilidade dos resultados do modelo, de modo a definir o refinamento de malha mais otimizado.

Inicialmente pretendiam-se analisar 4 malhas com diferentes refinamentos: 20 células por diâmetro, 28 células por diâmetro, 35 células por diâmetro e 50 células por diâmetro. Porém esta última não foi possível simular pois o modelo não teve capacidade para o fazer (tinha mais de 600000 células).

Nesta análise comparam-se os valores das forças horizontais e verticais máximas e mínimas de cada refinamento, para um emissário localizado a 0.02 m de distância ao fundo, altura de onda de 0.15 m e um período de onda de 2.07 s. Estes valores referem-se à média de 65 ondas no intervalo de tempo entre 72.45 s e 207 s.

As Figura 4.9 e Figura 4.10 apresentam as forças horizontais e verticais respetivamente, máximas e mínimas, para as três simulações efetuadas.

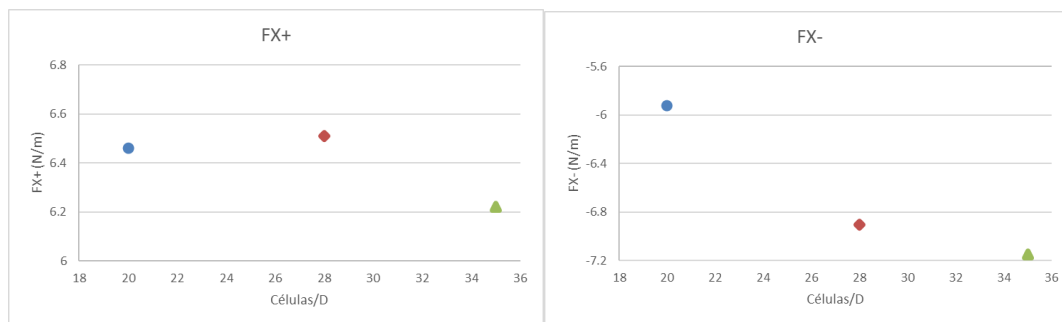


Figura 4.9 - Análise de sensibilidade – valores das forças horizontais

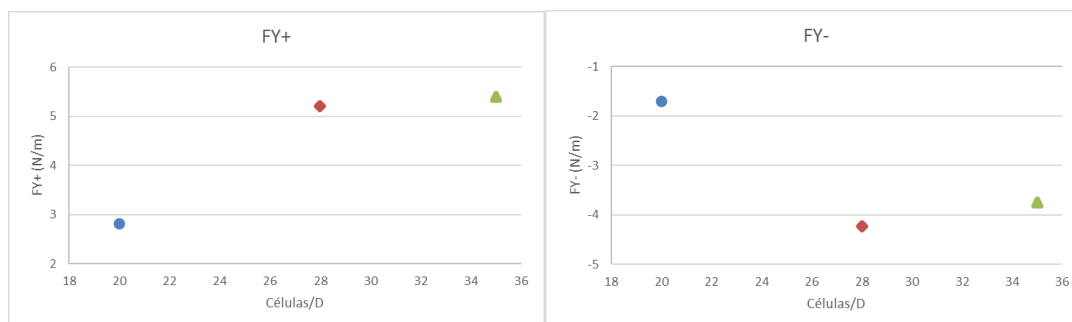


Figura 4.10 - Análise de sensibilidade – valores das forças verticais

Nas Figura 4.9 e Figura 4.10 observa-se, de um modo geral, que aumentando o refinamento da malha as forças tendem a convergir para o mesmo valor e a sua variação diminui quanto mais refinada for a malha. As forças horizontais máximas (Figura 4.9) não seguem esta tendência, no entanto a variação do valor das forças horizontais máximas com o refinamento é também menor. Os valores de variação das forças com o refinamento são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Análise de sensibilidade

Forças (N/m)	20 Células/D	Varição com a malha mais refinada	28 Células/D	Varição com a malha mais refinada	35 Células/D
FX+	6.46	4%	6.51	5%	6.22
FX-	-5.92	17%	-6.90	3%	-7.15
FY+	2.81	48%	5.21	3%	5.39
FY-	-1.71	54%	-4.23	13%	-3.75

Considerando estes resultados, optou-se por se utilizar a malha de 35 células por diâmetro para fazer as restantes simulações de modo a obter os resultados mais precisos possíveis.

4.6 Comparação dos resultados do modelo físico com o modelo numérico

Neste capítulo vão ser comparados os valores das forças obtidos nos ensaios e no modelo numérico. Em primeiro lugar serão comparados os ensaios, em que, para a mesma distância do emissário ao fundo (0.02 m) se fez variar a altura de onda (0.10 m, 0.15 m, 0.20 m e 0.25 m). De seguida serão comparados os ensaios em que se manteve a altura de onda (0.10 m) e se fez variar a distância do

emissário ao fundo (0.0 m, 0.02 m e 0.033 m). Estes valores são uma média de 65 ondas no intervalo de tempo entre 72.45 s e 207 s.

Nas Figura 4.11 e Figura 4.12 são apresentadas as forças horizontais e verticais, máximas e mínimas, obtidas nos ensaios físicos e no modelo IH2VOF para um período de onda de 2.07 s, direção de propagação da onda de 90°, distância do emissário ao fundo de 0.02 m e a altura de onda a variar de 0.10 m a 0.25 m.

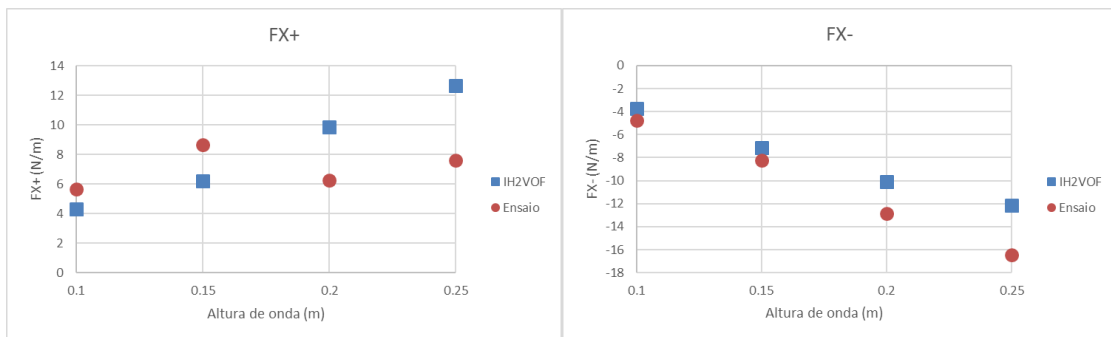


Figura 4.11 – Comparação de forças horizontais máximas e mínimas dos ensaios com o modelo numérico com variação da altura de onda

No gráfico que apresenta as forças horizontais máximas observa-se uma diferença de andamento entre ensaio e modelo numérico, principalmente para as alturas de onda $H=0.20$ m e $H=0.25$ m. Essas diferenças não são inesperadas pois, como já se tinha referido nos comentários à Figura 3.18, os valores das forças nos ensaios reduzem-se quando aumentamos H de 0.15 m para 0.20 m, o que não seria expectável e que não ocorre no modelo numérico. Quanto às forças horizontais mínimas, a variação entre os valores dos ensaios e do modelo numérico é inferior a 26%, como é possível confirmar no **Erro!** **A origem da referência não foi encontrada.**

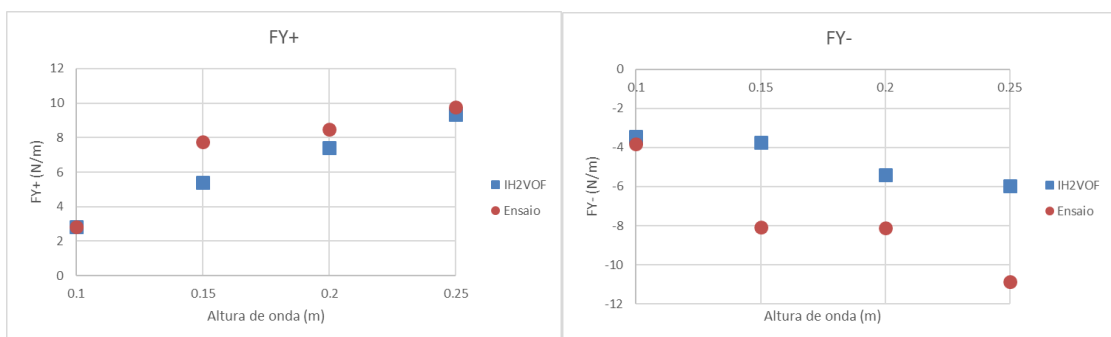


Figura 4.12 – Comparação de forças verticais máximas e mínimas dos ensaios com o modelo numérico com variação da altura de onda

Quanto às forças verticais máximas é possível verificar que os resultados obtidos nos ensaios e com o modelo numérico têm variações, em geral pequenas (inferiores a 13%), exceto para quando

H=0.15 m em que essa variação é 31%. As forças verticais mínimas apresentam diferenças maiores, variando entre 10% para H=0.10 m a 54%, para H=0.15 m.

Na tabela 4.5 apresentam-se as diferenças entre forças calculadas a partir dos dados dos ensaios e dos resultados do modelo numérico.

Tabela 4.5 – Comparação das forças horizontais e verticais dos ensaios e do modelo IH2VOF com variação da altura de onda

e/D	H (m)	FX+ (N/m)			FX- (N/m)			FY+ (N/m)			FY- (N/m)		
		IH2VOF	Ensaio	Erro	IH2VOF	Ensaio	Erro	IH2VOF	Ensaio	Erro	IH2VOF	Ensaio	Erro
0.3	0.10	4.30	5.68	24%	-3.73	-4.76	22%	2.83	2.85	1%	-3.43	-3.80	10%
	0.15	6.22	8.66	28%	-7.15	-8.25	13%	5.39	7.77	31%	-3.75	-8.08	54%
	0.20	9.85	6.27	36%	-10.12	-12.84	21%	7.39	8.47	13%	-5.40	-8.12	33%
	0.25	12.68	7.63	40%	-12.12	-16.45	26%	9.32	9.75	4%	-5.95	-10.89	45%

Nas Figura 4.13 Figura 4.14 são apresentadas as forças horizontais e verticais, máximas e mínimas, obtidas nos ensaios em modelo físico e com o modelo IH2VOF para um período de onda de 2.07 s, direção de propagação da onda de 90°, altura de onda 0.10 m. e distância do emissário ao fundo a variar (0.0 m, 0.02 m e 0.033 m). É importante referir que a simulação em que o emissário estava no fundo não correu na sua totalidade, tendo sido, por isso, analisadas menos ondas para esse caso.

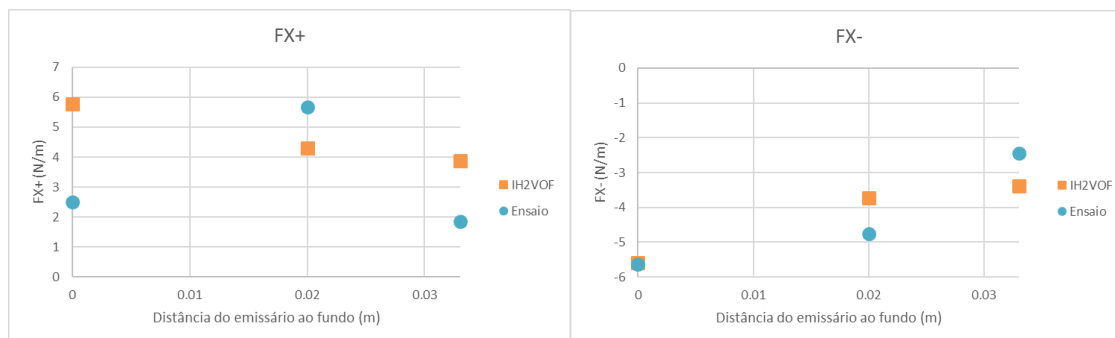


Figura 4.13 – Comparação de forças horizontais máximas e mínimas dos ensaios com o modelo numérico com variação da distância do emissário ao fundo

Na Figura 4.13 verifica-se uma grande disparidade de resultados entre os ensaios e o modelo numérico, com diferenças máximas de 57% no caso do emissário colocado no fundo. Também é possível observar um andamento diferente com o aumento da distância ao fundo: no caso dos ensaios, as forças aumentam quando o emissário passa de estar no fundo a estar a 0.02 m do fundo e voltam a diminuir quando passa a estar a 0.033 m do fundo; no caso do modelo numérico as forças aumentam com a distância do emissário.

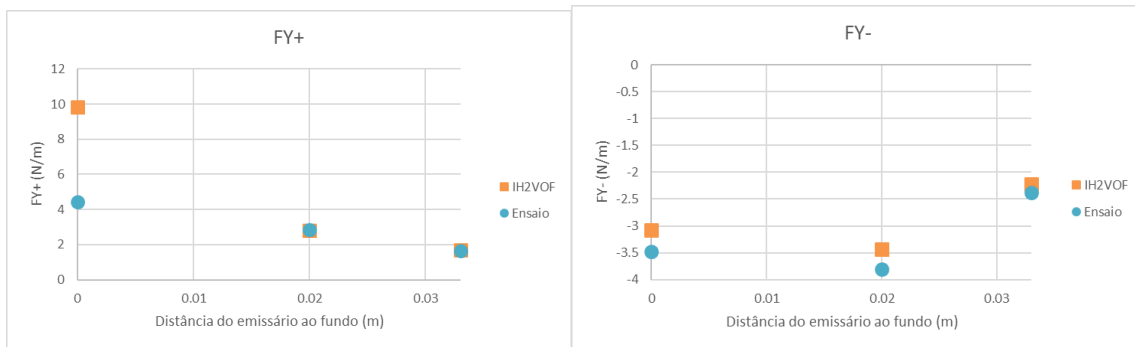


Figura 4.14 – Comparação de forças verticais máximas e mínimas dos ensaios com o modelo numérico com variação da distância do emissário ao fundo

Já os valores das forças verticais máximas são muito semelhantes nos ensaios e nas simulações em modelo numérico, nos casos em que o emissário não está no fundo (1%). Para o caso em que o emissário está no fundo, no entanto, a diferença de forças verticais entre o ensaio e modelo é de 55%. Essa variação tão elevada pode dever-se ao facto dessa simulação no modelo numérico não ter corrido na totalidade, apresentando erros cuja causa teria de ser analisada em futuros trabalhos.

Quanto aos valores das forças verticais mínimas, são as que apresentam melhores resultados, com diferenças relativas máximas de 12% para o caso em que o emissário está no fundo.

Tabela 4.6 – Comparação das forças horizontais e verticais dos ensaios e do modelo IH2VOF com variação da distância do emissário ao fundo

H (m)	e (m)	FX+ (N/m)			FX- (N/m)			FY+ (N/m)			FY- (N/m)		
		IH2VOF	Ensaio	Erro	IH2VOF	Ensaio	Erro	IH2VOF	Ensaio	Erro	IH2VOF	Ensaio	Erro
0.10	0.000	5.77	2.49	57%	-5.60	-5.64	1%	9.82	4.43	55%	-3.07	-3.47	12%
	0.020	4.30	5.68	24%	-3.73	-4.76	22%	2.83	2.85	1%	-3.43	-3.80	10%
	0.033	3.87	1.84	52%	-3.38	-2.45	28%	1.68	1.66	1%	-2.22	-2.38	7%

O facto das diferenças entre as forças obtidas nos ensaios e no modelo numérico serem elevadas nalguns casos, pode dever-se aos efeitos tridimensionais que estão presentes nos ensaios e a simplificações de domínio simuladas em modelo numérico, tais como o facto de, nos ensaios, existir uma praia dissipadora na fronteira em frente ao batedor que não foi simulada em modelo numérico que refletia, em média, 30% da energia das ondas.

5 Conclusões e Trabalho Futuro

Nesta dissertação foi estudada a influência da direção de incidência da onda, da presença de anéis de estabilização, da distância ao fundo e da altura de onda nas forças na tubagem de um emissário submarino.

Para se estudar esta influência foram analisados dados de ensaios em modelo físico e alguns dos ensaios foram modelados numericamente.

O modelo físico consistiu em ensaios experimentais, onde se posicionou um tubo cilíndrico de 7 cm de diâmetro (D) a 0.7 m de profundidade, com a distância ao fundo a variar entre 0 m, 0.02 m e 0.033 m. Os ensaios foram feitos para três direções de onda incidente (10° , 30° e 90°), para quatro alturas de onda (0.10 m, 0.15 m, 0.20 m e 0.25 m), um período de onda (2.07 s) e sem e com a presença de anéis de duas geometrias, que diferiam na distância do emissário ao fundo (e): o anel A ($e/D=0.3$), e o anel B ($e/D=0.5$). Cada ensaio foi repetido uma vez.

Quanto ao modelo numérico, como se trata de um modelo bidimensional IH2VOF, analisou-se a direção de incidência de 90° . Foi simulada uma condição de agitação em 3 malhas de diferentes dimensões mínimas (20, 28 e 35 células por diâmetro, D) de modo a fazer uma análise de sensibilidade da influência da dimensão da malha nas forças no emissário, de forma a otimizar o tempo de ensaio sem diminuir a precisão do modelo. Estas simulações foram feitas com $e/D=0.3$ e $H=0.15$ m.

Para validar o modelo, utilizando a malha mais fina, com 35 células por diâmetro, fizeram-se 3 simulações para $e/D=0.3$, variando a altura de onda (0.10 m, 0.20 m e 0.25 m). Para a mesma malha e para uma altura de onda de 0.10 m, fizeram-se ainda 2 simulações variando a distância do emissário ao fundo (0.0 m e 0.033 m).

Com base nos resultados do modelo físico e numérico, obtiveram-se as forças horizontais e verticais máximas (crista) e mínimas (cava) que atuam no cilindro.

Foi possível observar que, em geral, a intensidade das forças, tanto horizontais como verticais, aumentam com o aumento da altura de onda, a presença dos anéis e o ângulo de incidência (como já tinha sido referido em Neves & Reis et al., 2003) e decrescem com o aumento da distância do tubo ao fundo.

Relativamente à influência da direção, as forças horizontais e verticais obtidas para uma direção de incidência de 10° variam entre -4 N/m e 4 N/m, para 30° variam entre -8 N/m e 10 N/m, ou seja, aproximadamente o dobro e quando passa para 90° variam entre -27 N/m e 20 N/m, aproximadamente 5 a 6 vezes o valor obtido para 10° .

Relativamente à influência da presença dos anéis, observou-se, no caso da incidência de 10° , um decréscimo das forças que pode atingir cerca de 90%, no caso dos 30° pode conduzir a um aumento da intensidade das forças até 40% e para o caso dos 90° até 25%.

Com o modelo numérico foi possível tirar as mesmas conclusões que nos ensaios físicos, relativamente à influência da direção, da distância ao fundo e da altura de onda, mas apenas para o caso

sem anéis. No entanto, os valores obtidos não permitiram validar o modelo numérico, já que se obtiveram diferenças de resultados das forças de 50% em alguns casos.

Um dos trabalhos futuros que se segue ao trabalho desenvolvido nesta dissertação é o cálculo dos coeficientes adimensionais (coeficiente de inércia, C_M , coeficiente de arrasto, C_D e coeficiente de sustentação, C_L) e a análise da influência do ângulo de incidência, presença dos anéis e distância ao fundo no seu valor, além da análise dos ensaios com ondas irregulares e bimodais. Uma análise mais detalhada das causas das diferenças obtidas entre modelo físico e numérico seria necessário para validar este modelo.

Referências Bibliográficas

ARISTODEMO, Francesco; TOMASICCHIO, Giuseppe; VELTRI, Paolo – New Model to determine forces at on-bottom slender pipelines. Coastal Engineering (2010)

CORREIA, Rubén - Modelação Numérica da Interacção de Ondas com uma Estrutura de Aproveitamento de Energia das Ondas do Tipo Coluna de Água Oscilante. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 2015. de mestrado.

IH-2VOF, INSTITUTO DE HIDRAÚLICA: UNIVERSIDADE DE CANTÁBRIA - **Model**. Cantábria: Universidade de Cantábria. [Consult. 09 Fev. 2013]. Disponível na internet: <URL:<http://ihcantabria.com/IH2VOF/model>>.

INVERNO, João - Modelação Numérica da Interacção de Ondas em Emissários Submarinos. Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 2013. de mestrado.

LACERDA, Kátia Barros; AMORIM, A. E. A. - Perfil de velocidade para o escoamento de fluido em uma placa plana. São Paulo: Faculdade de Tecnologia de Jahu, 2001.

NEVES, Maria da Graça; REIS, Maria Teresa - Comportamento Estrutural de Emissários Submarinos - Emissários Submarinos em Portugal. Lisboa: LNEC, Departamento de Hidráulica e Ambiente - Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, 2003.

NEVES, M.G.; FIGUEIRA, P.; AFONSO, M.C.; MENDONÇA, A.; SOLIS, M.V.; DIDIER, E.; REIS, M.T.; CLAVERO, M.; ORTEGA-SÁNCHEZ, M.; LOSADA, M.A. – Estudo Experimental de Forças Sobre um Emissário Submarino: Influência da Direção da Agitação Incidente, da Presença de Anéis de Estabilização e da Distância da Conduta ao Fundo. Lisboa: LNEC, 2013.

PLASTICS PIPE INSTITUTE - Chapter 10: Marine Installations. 2nd ed. In **Handbook of Polyethylene Pipe**. Texas: Plastic Pipe Institute, 2007.

SOUSA, G.A. C. F.; ENDREZ, L. A. M.; NEVES, M.G.; CAPITÃO, R. (2011). Separação de ondas incidentes e reflectidas: Comparação de métodos e recomendações para a sua aplicação em canais de ondas. Relatório 261/2011. DHA/NPE, LNEC, Lisboa, Julho de 2011

SUMMER, B.; FREDSOE, J. - **Advanced Series on Ocean Engineering - Hydrodynamics Around Cylindrical Structures**. Rev. ed. Vol. 26. Denmark: World Scientific, 2006.

QUINTELA, António Carvalho – **Hidráulica**. Lisboa: Gulbenkian, 2000.

