

# PROJECTO DO EMISSÁRIO SUBMARINO DE TA'BARKAT (ILHA DE MALTA)

**Cristina Afonso, Pedro Figueira, Inês Pipa**

cafonso@wwsa.pt ; figueira@wwsa.pt ; inespipa@wwsa.pt

WW - Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A., Rotunda Nuno Rodrigues dos Santos, 1-B – 10º, 2685-223 Portela – LRS, Portugal

## Resumo

O emissário submarino de Ta'Barkat situa-se na ilha de Malta e destina-se a lançar no mar o efluente proveniente de uma ETAR construída junto da costa, no limite sueste da região administrativa de Xghajra a sueste de La Valleta, mantendo os parâmetros de qualidade da água do mar dentro de limites aceitáveis para utilização balnear. Os esgotos afluem à ETAR através de um sistema unitário, pelo que o sistema de rejeição foi concebido para poder simultaneamente lançar efluentes domésticos e efluentes pluviais.

Faz-se uma abordagem de alguns aspectos relacionados com o projecto do emissário submarino no que diz respeito às suas componentes ambiental, hidráulica e estrutural.

Justificam-se a localização e o traçado do emissário com base em estudos de dispersão do efluente, bem como o dimensionamento hidráulico e estrutural do mesmo. Analisam-se alguns pormenores relacionados com o comportamento da estrutura, a sua durabilidade e a sua operacionalidade, bem como aspectos construtivos que correspondem a situações críticas para a integridade da tubagem.

O projecto de detalhe do emissário submarino decorreu em paralelo com a sua construção, permitindo adequar as soluções e os procedimentos às condições locais.

## 1. Introdução

O emissário submarino de Ta'Barkat está localizado na costa leste da ilha de Malta, a cerca de 4 quilómetros para sueste do porto de La Valletta. Nesta zona, a costa é constituída principalmente por falésias nas quais estão implantadas algumas instalações balneares (Figura 1).



Figura 1 – Localização do emissário

Em 2008, a “Water Service Corporation of Malta” lançou um concurso internacional para a concepção e construção do emissário submarino de Ta’Barkat, trabalho que foi adjudicado ao consórcio formado pela **ETERMAR** - Engenharia e Construção, S.A. e pela empresa local **PolidanoGroup**, tendo os estudos e projectos ficado a cargo da empresa **WW** - Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A..

O objectivo principal do emissário é lançar o efluente suficientemente longe da linha de costa de modo a manter os parâmetros de qualidade das águas balneares de acordo com a directiva 2006/7/EC do Parlamento e do Conselho Europeu.

Os efluentes domésticos afluem à ETAR através de um sistema de esgotos unitário, pelo que o sistema de tratamento e rejeição desses efluentes foi preparado para poder escoar caudais elevados, correspondentes a descargas pluviais, sem que estes passem pela ETAR. O sistema de rejeição é constituído por uma tubagem com elevada capacidade de escoamento, complementada com uma tubagem de descarga próxima da costa, a qual permite escoar o caudal em excesso relativamente a essa capacidade. Esta última tem também funções de descarga de emergência do emissário.

Os estudos correspondentes à concepção e projecto do emissário submarino desenvolveram-se em 3 fases e integraram a contribuição das especialidades de Hidráulica e Engenharia Costeira, incluindo Modelação Matemática, e de Estruturas. Na primeira fase confirmou-se a localização da rejeição definida nos estudos preliminares fornecidos no processo do concurso, através de estudos de modelação matemática de diluição e dispersão do efluente. A segunda fase correspondeu ao dimensionamento hidráulico do sistema de rejeição. Na terceira fase estudou-se a estabilidade e a resistência estrutural do emissário e da câmara de carga, tendo em conta as condições locais, nomeadamente o regime de agitação e as características dos fundos.

A elaboração do projecto do emissário começou em 2009 e acompanhou a construção, a qual teve uma duração de cerca de 14 meses, tendo terminado em Julho de 2011.

## **2. Solução adoptada**

Do ponto de vista ambiental, e no que respeita à localização e características do difusor, utilizou-se o critério de aceitar que durante o Inverno possam ocorrer concentrações de efluente junto da costa que ultrapassem com pequena probabilidade os parâmetros estabelecidos na directiva comunitária para água balneares, nas zonas afastadas das utilizadas pelas instalações balneares.

O tipo de solução estrutural adoptada para o emissário vem sendo utilizada com sucesso há mais de duas décadas e consiste na construção de troços longos com anéis de betão armado com funções de peso auxiliar do afundamento e de estabilização após a construção do emissário. No troço próximo da costa, até profundidades em que pode ocorrer rebentação das ondas o emissário é colocado numa vala, a qual é cheia e protegida contra as erosões provocadas pela acção das ondas. O troço em maiores profundidades, incluindo o difusor é simplesmente assente sobre o fundo, sendo a estabilidade garantida pelos anéis de betão utilizados no afundamento. No difusor a estabilidade é reforçada por meio de anéis suplementares.

O emissário submarino parte de uma câmara de carga com estrutura de betão armado, incrustada na falésia, cuja geometria é adequada ao funcionamento hidráulico do sistema. Na sua concepção, para além dos condicionamentos de estabilidade e resistência estrutural consideraram-se os condicionamentos de durabilidades relacionados com o ambiente marítimo e a qualidade do efluente escoado. Esta câmara tem dois compartimentos adjacentes. No primeiro descarregam os tubos provenientes da ETAR e dele parte o emissário submarino. O segundo é ligado com o primeiro por meio de um descarregador de caudal e dele parte a tubagem de rejeição de emergência.

### 3. Bases do projecto

Os principais dados de base utilizados no projecto foram:

- Topo-hidrografia (levantamentos da zona de implantação do emissário submarino e terrestre e carta náutica das ilhas de Malta, editada pelo Almirantado Inglês).
- Caracterização geotécnica (levantamento sísmico de reflexão com sonar abrangendo a zona do emissário).
- O traçado em planta do emissário submarino definido nos estudos preliminares fornecidos no processo do concurso, com base na caracterização geotécnica efectuada.
- Agitação marítima:
  - Dados de ondas e correntes fornecidos nos estudos preliminares do processo do concurso;
  - Dados de ondas adquiridos para modelação matemática e estudo das correntes na zona costeira.
- Dados sobre as condições ambientais definidos em estudos realizados anteriormente na zona costeira da Ilha de Malta, tais como a estratificação do meio no campo próximo do difusor, os parâmetros hidrodinâmicos, a temperatura da água e a salinidade.
- Caudais de projecto

O caudal máximo a escoar é de 4,50 m<sup>3</sup>/s. As situações consideradas foram as seguintes:

  - Caudal até 3,50 m<sup>3</sup>/s, totalmente escoado pelo emissário submarino;
  - Caudal em excesso de 3,50 m<sup>3</sup>/s, escoado pela descarga de emergência;
  - Situação de avaria no emissário, caudal máximo de 4,50 m<sup>3</sup>/s escoado pela descarga de emergência.
- Consideraram-se os seguintes modos de operação do sistema de rejeição:
  - Modo 1: Operação normal, com o caudal de 1,19 m<sup>3</sup>/s de esgoto com tratamento secundário com concentração igual a 10<sup>5</sup> /100 ml;
  - Modo 2: Esgoto bruto, com o caudal de 1,19 m<sup>3</sup>/s com concentração igual a 10<sup>7</sup> /100 ml;
  - Modo 3: Esgoto bruto diluído com esgoto pluvial, com um caudal de 3,50 m<sup>3</sup>/s com concentração igual a 2,732\*10<sup>6</sup> /100 ml.

O limite de concentração do parâmetro “*Escherichia coli*” tomado como referência para a qualidade da água balnear foi 250 cfu/100 ml.

Admitiu-se que durante o Inverno, para situações extremas, possam ocorrer na linha de costa concentrações superiores às estabelecidas como referência, desde que tal aconteça em zonas não utilizadas para fins balneares.

### 4. Descrição geral da obra

O emissário terrestre transporta o efluente para uma câmara de carga implantada na linha de costa, na qual tem início o emissário submarino com um comprimento total de 971 m e a orientação N73°E no troço inicial e N34°E no troço “offshore”. A tubagem do emissário é de PE100 com diâmetro de 1600 mm.

O emissário submarino é constituído por 3 troços: O *Troço Enterrado* em vala, com 350 m de comprimento e profundidade máxima de 15 m; o *Troço Apoiado* situado entre o fim da vala e o difusor, com 480 m de comprimento; e o *Difusor* com 140 m de comprimento e com profundidade máxima de 40,5 m.

A câmara de carga tem uma área em planta de 8,0x7,4 m<sup>2</sup> e uma altura total de 16,4 m. Nas situações em que o caudal rejeitado ultrapassa a capacidade do emissário, o excesso de caudal é descarregado para um compartimento lateral da câmara de carga e, a partir daí, rejeitado por meio de uma tubagem com cerca de 46 m de comprimento e com um diâmetro de 1600 mm. Esta tubagem tem também as funções de descarga de emergência.

A tubagem do difusor tem um diâmetro de 1600 mm e é composto por 18 chaminés com válvulas “bico de pato” com 400 mm de diâmetro, afastadas 8 m entre si.

## 5. Localização e características do difusor

A localização da rejeição foi definida nos estudos preliminares fornecidos com o processo do concurso.

Na fase de projecto de execução, a verificação da localização do difusor e o dimensionamento hidráulico do emissário tiveram-se em conta os 3 modos de operação atrás referidos.

A verificação dos critérios de qualidade da água, foi confirmada por meio de estudos de modelação matemática de diluição/dispersão do efluente. Foram utilizados os modelos CORMIX e MIKE3 FM. Com o modelo CORMIX estudaram-se as condições de diluição no campo próximo, a partir das quais se estabeleceram as condições iniciais de distribuição da concentração do efluente. O modelo tridimensional MIKE3 FM permitiu definir a distribuição das concentrações de efluente a vários níveis para as condições de projecto.

Na Figura 2 está representada a camada superficial do domínio de cálculo bem como a malha de elementos finitos utilizada.

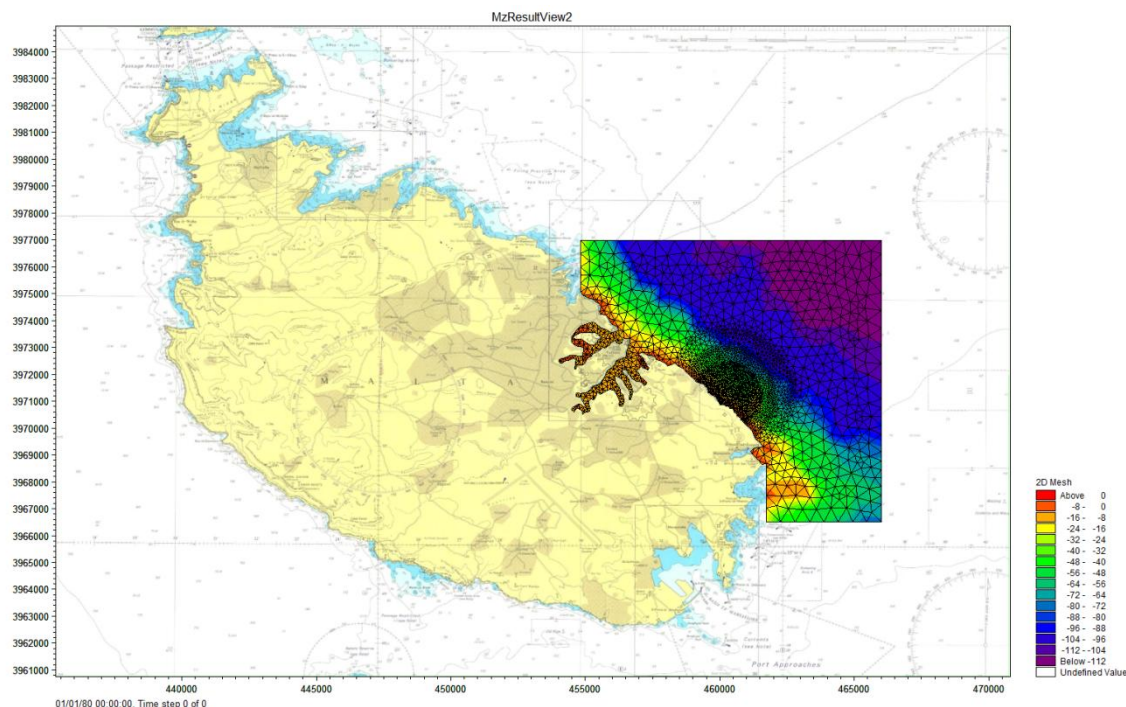


Figura 2 – Malha de elementos finitos utilizada no modelo 3D de diluição/dispersão

Na Figura 3 apresenta-se um exemplo dos cálculos de dispersão do efluente, realizado com o módulo HD do sistema MIKE21.

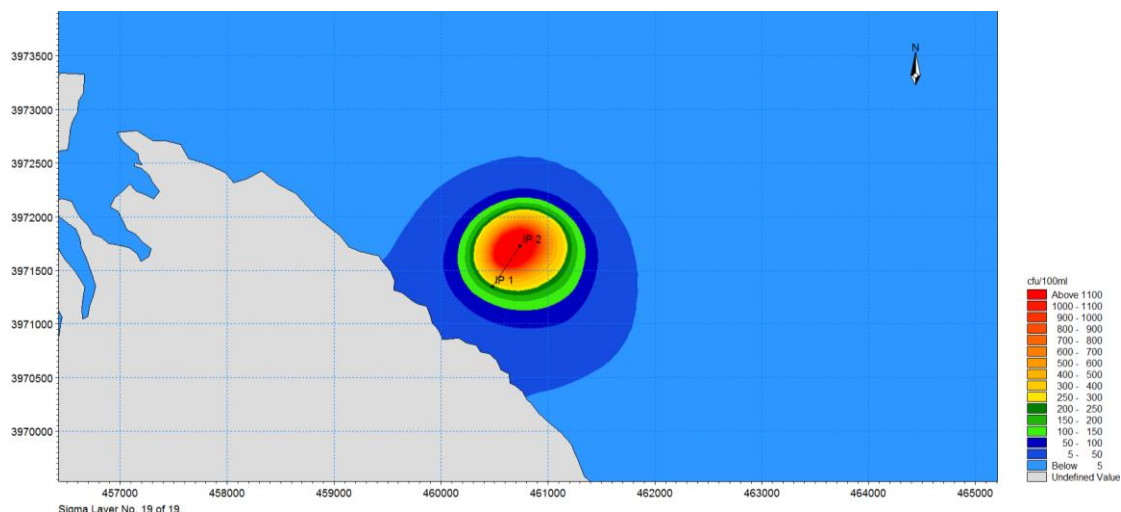


Figura 3 – Resultado do cálculo da distribuição das concentrações do efluente no modo de operação 3, no inverno e na camada superficial

Após a confirmação do local de rejeição do efluente definido nos estudos preliminares e a definição do local da câmara de carga, procedeu-se ao dimensionamento hidráulico dos órgãos do emissário submarino (câmara de carga, tubo e difusor).

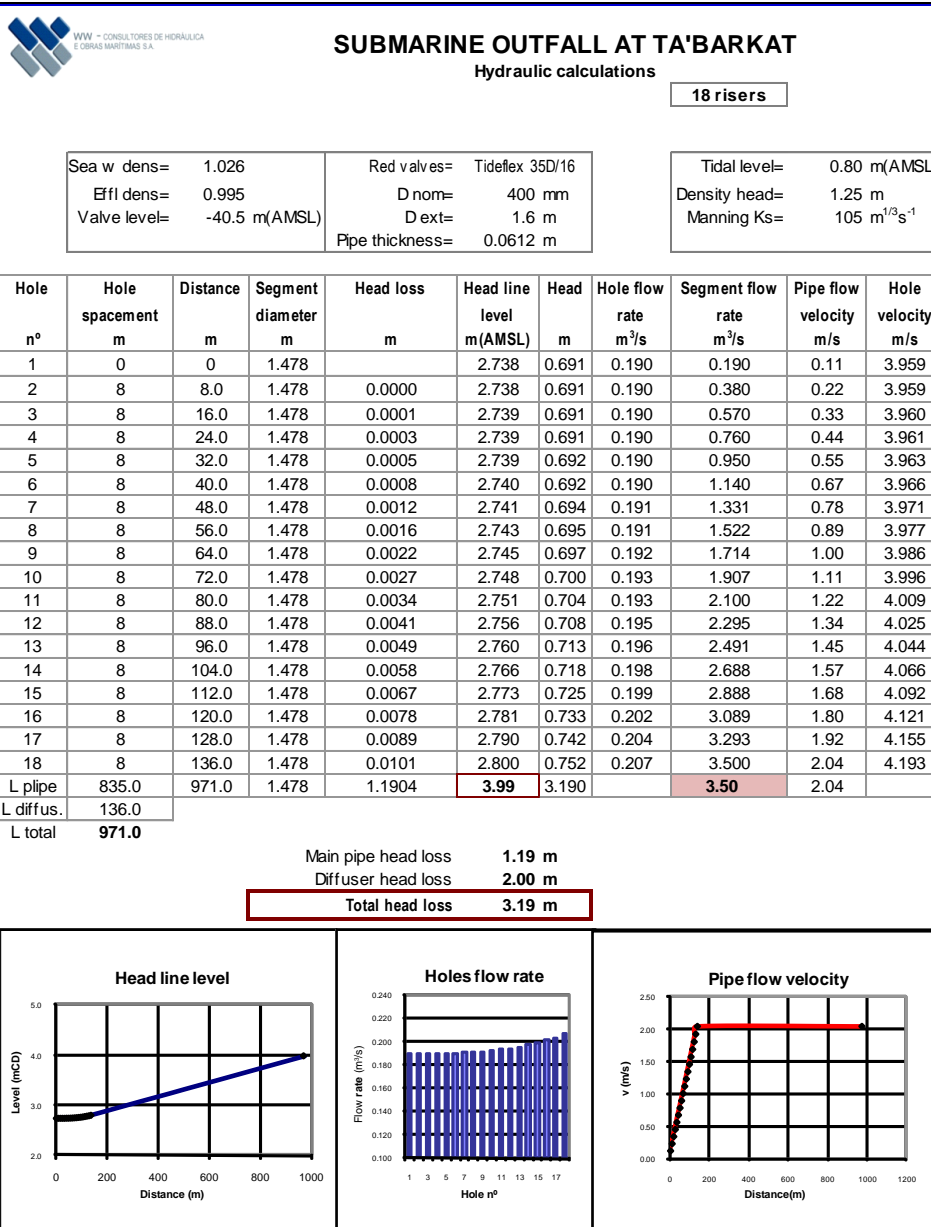
O estudo de propagação da agitação marítima para o local da obra foi efectuado com os modelos NSW e HD do programa MIKE21.

## 6. Dimensionamento hidráulico

A interface entre o emissário terrestre e o emissário submarino é a câmara de carga localizada na falésia. O dimensionamento hidráulico do emissário foi efectuado para os caudais de  $1,19 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $3,50 \text{ m}^3/\text{s}$  correspondentes aos modos de operação referidos anteriormente.

Utilizou-se uma folha de cálculo na qual se determinam as características do escoamento entre a câmara de carga e o último orifício do difusor. No Quadro 1 apresenta-se um exemplo de cálculo.

No dimensionamento hidráulico foram considerados os problemas de ocorrência de ar dentro da tubagem bem como da auto-limpeza da tubagem.



Quadro 1 – Resultados do modelo de dimensionamento hidráulico do emissário

## 7. Estabilidade e resistência estrutural

### 7.1 Generalidades

Os troços do emissários a afundar foram montados em estaleiro, rebocados em flutuação para a sua posição final e afundados por meio de enchimento controlado com água do mar. Os dois troços foram fabricados com comprimentos longos (560 e 380 m) evitando a necessidade de realizar soldaduras.

As principais acções sobre a tubagem devem-se às velocidades da água associadas à agitação marítima e às correntes.

## 7.2 Agitação e correntes

A definição do clima de agitação marítima ao largo da obra foi feita por hindcast, em colaboração com a GlobOcean, a partir de uma série longa de dados meteorológicos obtidos do ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecast. Reading. United Kingdom).

As alturas significativas extremas ao largo para o período de retorno de 100 anos, determinadas para os rumos NE, E e SE, foram de 7,6 m, 6,9 m e 6,8 m, para o período médio de 10 s.

O estudo da propagação da agitação desde o largo até ao local da obra foi realizado com o modelo matemático MIKE21NSW. Para além das características das ondas este modelo permitiu calcular as tensões de radiação, a partir das quais se calcularam as velocidades das correntes geradas pelas ondas utilizando o modelo MIKE21HD.

Na Figura 4 apresenta-se o domínio de cálculo utilizado no modelo de propagação das ondas.

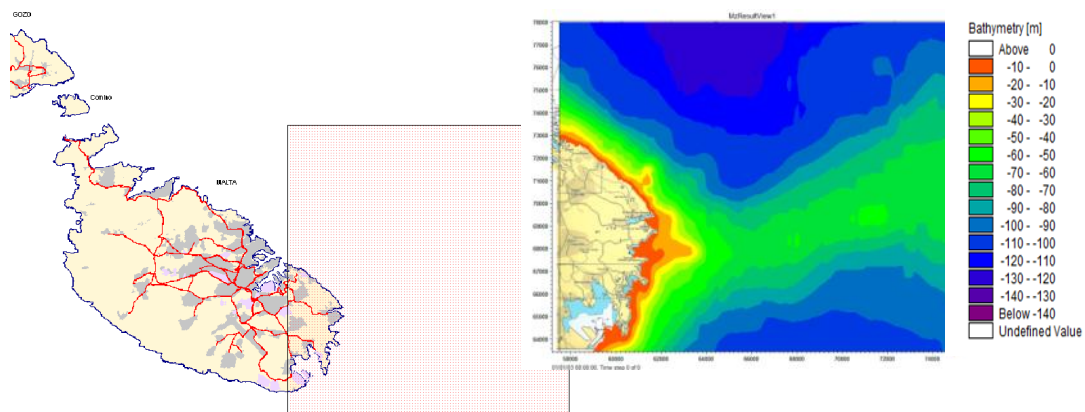


Figura 4 – Domínio de cálculo utilizado no modelo de propagação das ondas

Na Figura 5 apresenta-se um exemplo da propagação da agitação ao largo para a zona do emissário.

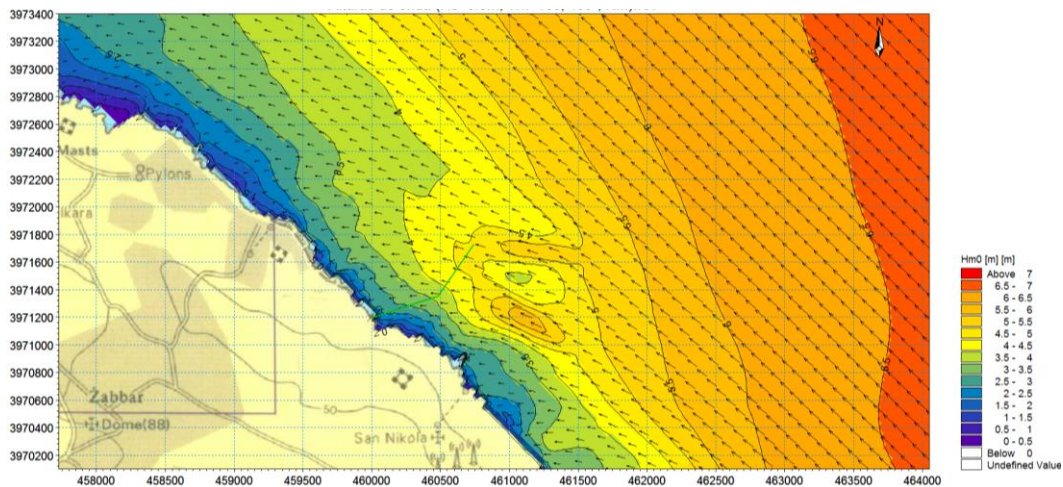


Figura 5 – Alturas e direcções da onda calculadas para valores ao largo de  $H_{so}=6,8$  m,  $T_m=10$  s e rumo SE

Na Figura 6 apresenta-se um exemplo de cálculo das velocidades das correntes geradas pela agitação na zona do emissário.

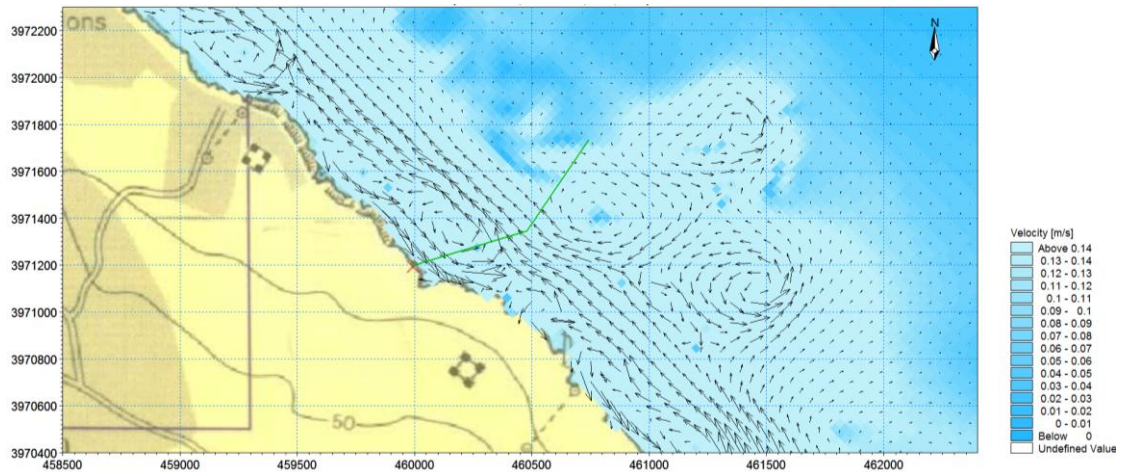


Figura 6 – Velocidade das correntes geradas pelas ondas para os valores ao largo de  $H_{s0}=6,9$  m,  $T_m=10$  s e rumo E

Para as condições de cálculo utilizadas verificou-se que junto do fundo, na zona da vala, os valores máximos das velocidades orbitais das ondas e das correntes geradas pelas ondas são da ordem de 3,0 m/s e 2,0 m/s, respectivamente.

### 7.3 Vala

O troço inicial do emissário tem 350 m de comprimento e desenvolve-se até à profundidade de 15,0 m em fundos rochosos com bolsas de areia. Neste troço garantiu-se a estabilidade da tubagem colocando-a numa vala cheia com enrocamentos. Para evitar a ocorrência de erosões na vala que possam desproteger a tubagem, previu-se a colocação de blocos de betão sobre o seu enchimento. A secção tipo da vala é apresentada na Figura 7.

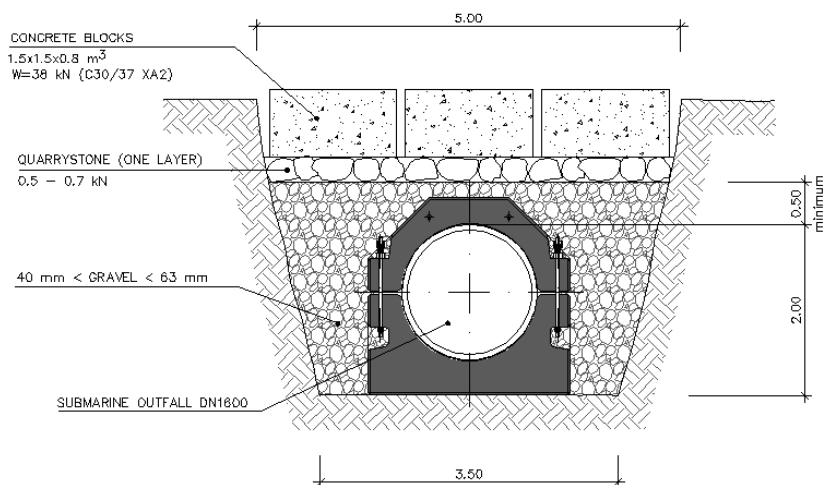


Figura 7 – Troço em vala. Perfil transversal tipo

#### 7.4 Troço apoiado e difusor

O troço apoiado, situado entre o fim da vala e a extremidade do emissário, tem 520 m de comprimento, sendo os últimos 140 m correspondentes ao difusor, com uma profundidade máxima de 40,5 m.

A estabilidade do troço apoiado do emissário é garantida pelo peso dos anéis de betão, distanciados de 4 m (Figura 8). Estes anéis foram montados no tubo antes do transporte para o local de afundamento e serviram como pesos de afundamento durante a instalação e na fase de operação servem como estabilizadores.

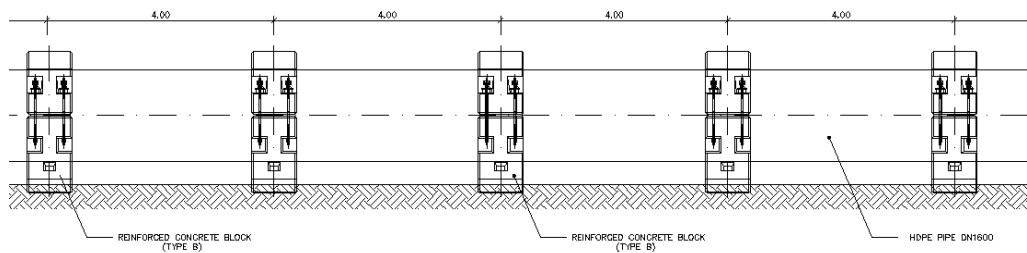


Figura 8 – Troço apoiado. Perfil longitudinal tipo

No cálculo das forças sobre a tubagem utilizaram-se as equações de Morison, sendo as velocidades das partículas calculadas segundo a teoria linear. Os coeficientes de forma das equações de Morison (arrastamento, sustentação e inércia) foram escolhidos de acordo com a literatura técnica sobre este assunto e a experiência adquirida na realização de projectos anteriores.

No Quadro 2 apresenta-se um exemplo de cálculo dos coeficientes de segurança do emissário ao derrubamento e ao escorregamento, para uma secção da tubagem situada à profundidade de 14,6 m.



STABILITY VERIFICATION OF BOTTOM LAID OUTFALL PIPE

Calculation nº 1

WAVES AND CURRENTS	
Depth	d= 14.6 m
Wave height	H <sub>1/10</sub> = 8.5 m
Period	T= 10 s
Wave length	L= 113.5 m
Wave obliquity	obl= 27.2 °
Sin (Obl)	0.46
Current velocity	uc= 0.50 m/s

PIPE	
External diameter	d_ext 1.6000 m
Internal diameter	d_int 1.4776 m
Thickness	esp 0.0612 m
Material volume/m	v_par_m 0.296 m <sup>3</sup> /m
Internal volume/m	v_int_m 1.715 m <sup>3</sup> /m
Weight/m (emerged)	p_pipe_m 3.00 kN/m
Axis depth	z= -13.23 m
Dist. axis-bottom	ea= 1.37 m
PIPE SEGMENT	
Segment length	l_tr 4.0 m
Segment weight (emerged)	P_pipe_sec 12.0 kN
Pipe buoyancy/m	Imp_pipe_m 20.2 kN/m
Segment buoyancy	l_pipe_sec 80.9 kN
Exposed area	7.12 m <sup>2</sup>
Segment weight (submerged)	weight 29.5 kN

SAFETY COEFFICIENTS		
	Minimum	Average (*)
Sliding	2.78	38.57
Overturning	3.47	>50
Note: Average coefficient for a half wave length		

COEFFICIENTS	
Acceleration (g)	9.81 m/s <sup>2</sup>
Water density (ρ <sub>w</sub> )	1,026 kg/m <sup>3</sup>
water unit weight (γ <sub>w</sub> )	10 kN/m <sup>3</sup>
water viscosity (ν)	1.20E+06 m <sup>2</sup> /s
Pipe material density (ρ <sub>pipe</sub> )	1,033 kg/m <sup>3</sup>
Pipe material unit weight (γ <sub>pipe</sub> )	10.1 kN/m <sup>3</sup>
Concrete unit weight (γ <sub>reinforced concrete</sub> )	21.9 kN/m <sup>3</sup>
Friction coefficient	0.70
CONCRETE BLOCKS TYPE B	
Spacing	4.00 m
Length	0.80 m
Height	2.50 m
Exposed area	2.00 m <sup>2</sup>
Volume	2.492 m <sup>3</sup>
Emerged weight	54.5 kN
Submerged weight	29.4 kN
PARAMETERS FOR CALCULATION	
Drag coefficient	C <sub>D</sub> = 0.70
Lift coefficient	C <sub>L</sub> = 0.90
Mass coefficient	C <sub>M</sub> = 1.00
DELTA	1 s
2PI/L	K= 0.06
Base width	2.385 m

Velocities, acceleration and forces

t	V_horiz	A_horiz	F_drag	F_lift	F_mass	Result_horiz	Safety coeff.	
							sliding	overturning
0	3.24	0.00	5.60	7.21	0.00	5.60	2.78	3.47
1	2.72	-1.01	3.94	5.07	-1.18	2.76	6.20	7.73
2	1.35	-1.64	0.97	1.24	-1.91	0.95	20.91	26.07
3	-0.35	-1.64	-0.06	0.08	-1.91	1.98	10.40	12.98
4	-1.72	-1.01	-1.57	2.02	-1.18	2.76	6.97	8.70
5	-2.24	0.00	-2.68	3.44	0.00	2.68	6.80	8.48
6	-1.72	1.01	-1.57	2.02	1.18	0.39	49.20	> 50
7	-0.35	1.64	-0.06	0.08	1.91	1.85	11.13	13.88
8	1.35	1.64	0.97	1.24	1.91	2.88	6.86	8.55
9	2.72	1.01	3.94	5.07	1.18	5.12	3.34	4.16
10	3.24	0.00	5.60	7.21	0.00	5.60	2.78	3.47
Maximum	3.24	1.64	5.60	7.21	1.91	5.60		

Quadro 2 – Verificação da estabilidade do emissário

Como se pode ver na Figura 9, no troço final, correspondente ao difusor, para além dos anéis de afundamento, previu-se a colocação de um anel suplementar de estabilização em cada troço entre válvulas, de modo a aumentar a estabilidade do troço da extremidade e evitar a eventual ocorrência de deslocamentos.

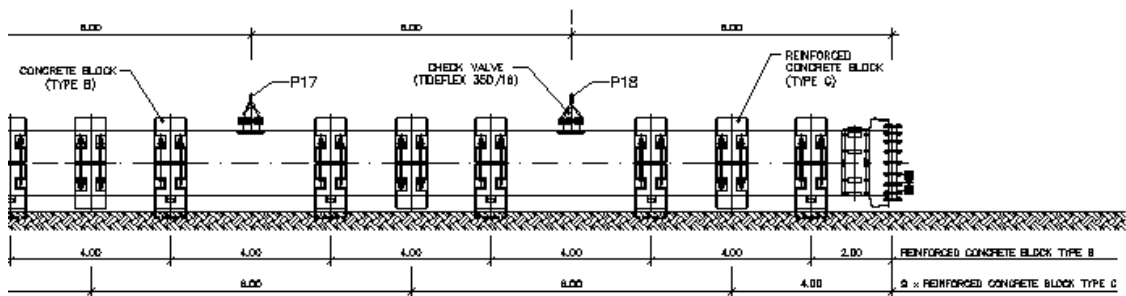


Figura 9 – Troço apoiado. Perfil no difusor

### 7.5 Resistência e durabilidade

No projecto de execução foi estudada a resistência das diversas componentes do emissário, nomeadamente do tubo, dos anéis de betão armado e das ligações metálicas utilizadas.

Em relação às ligações metálicas foram estudados os aspectos da corrosão, importantes para se atingirem os objectivos de durabilidade da estrutura correspondentes a uma vida útil de 50 anos. Com o fim de minimizar a necessidade de substituição de peças metálicas previu-se um sistema de protecção catódica dessas peças, baseada em ânodos de sacrifício fixados nessas peças.

### 8. Aspectos construtivos e operacionais

Como acontece geralmente, o transporte e o afundamento da tubagem constituem a fase mais crítica da resistência estrutural do emissário submarino e das suas ligações.

Nas Fotografias 1 e 2 pode observar-se o transporte e o afundamento da tubagem.



Fotografia 1 – Transporte dos tubos



Fotografia 2 – Afundamento do tubo

O transporte é feito em geral com o tubo vazio e os anéis colocados de forma a garantir um adequado grau de flutuabilidade. No Quadro 3 apresenta-se um exemplo do cálculo dos esforços induzidos na tubagem durante o afundamento.



## SUBMARINE OUTFALL

### SINKING BENDING STRESSES

Concrete Block Type B // 4 m

Characteristics of structures	
<b>PIPE</b>	
Poisson coefficient	0.5
External diameter	1.6 m
Thickness	0.0612 m
Internal diameter	1.4776 m
SDR	26.1
Weight /m (emerged)	3.0 kN/m
<b>BLOCKS</b>	
Spacing	4.0 m
Free space between blocks	3.2 m
Volume	2.49 m <sup>3</sup>
Emerged weight	54.47 kN
Submerged weight	29.41 kN
<b>PIPE + BLOCKS</b>	
Emerged weight /m	16.618 kN/m

Loading conditions	
Loading percentage	36.3 %
Air percentage (equilibrium before sinking)	42.7 %
Net weight of water filled section	7.38 kN/m
Net buoyancy in air filled section	-9.86 kN/m

Curvature/buckling	
Minimal admissible curvature (without blocks) (R/D)	22.4
Correction factor (block spacing)	2.73
Minimal admissible curvature after correction	8.2
Admissible bending radius during sinking	13.1 m
Upper bending radius (air filled section)	19.6 m
Bottom bending radius (water filled section)	26.3 m

Forces/stresses	
Minimal pulling force (Safety factor=1,5)	194 kN
Admissible stress	6.3 Mpa

Depth m	pa Mpa	h m	Stress kN	Alfa °	$\sigma_0$ Mpa	$\sigma_1$ Mpa	$\sigma_{tot}$ Mpa	Safety_fac
41	17.5	23.5	367.0	58.1	1.24	2.16	3.40	1.9
36	15.4	20.6	345.9	55.9	1.17	1.89	3.06	2.1
31	13.2	17.8	324.7	53.4	1.10	1.63	2.73	2.3
26	11.1	14.9	303.6	50.3	1.03	1.37	2.39	2.6
21	9.0	12.0	282.5	46.7	0.95	1.10	2.06	3.1

<b>pa</b>	Internal air pressure
<b>h</b>	Water height inside the pipe
<b>Traction</b>	Longitudinal force in bending inversion section
<b>Alfa</b>	Pipe angle to the horizontal in the bending inversion section
<b><math>\sigma_0</math></b>	Stress from pipe pulling
<b><math>\sigma_1</math></b>	Stress from internal pressure
<b><math>\sigma_{tot}</math></b>	Total stress
<b>Coeff_sec</b>	$\sigma_{adm}/\sigma_{t}$

### Quadro 3 – Cálculo das condições de afundamento do emissário

Na fase final do projecto, estabeleceu-se um programa de inspecção e monitorização do funcionamento do emissário e do seu comportamento estrutural. A realização deste plano irá permitir a imediata correcção dos problemas que eventualmente possam ocorrer.

## 9. Conclusões

O emissário submarino de Ta'Barkat constitui a estrutura final de um sistema de drenagem de esgotos de uma importante zona residencial próxima da capital da Ilha de Malta. É uma solução clássica para o destino final dos efluentes gerados numa zona urbana e sujeitos a tratamento, e garante a manutenção de uma boa qualidade das águas junto da costa, nomeadamente perto das zonas de importância turística e balnear.