



## INCORPORAÇÃO DA AVALIAÇÃO PROBABILÍSTICA DE RISCOS E DE MÉTODOS DE OPTIMIZAÇÃO NO PROJECTO DE EMISSÁRIOS SUBMARINOS

A. Mendonça\*, M. A. Losada\*\*, M. T. Reis\*, M. G. Neves\*, Pedro Figueira\*\*\* e Cristina Afonso\*\*\*

\* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Brasil 101, 1700-066, Lisbon, Portugal (amendonca@lnec.pt, treis@lnec.pt, gneves@lnec.pt)

\*\* Universidad de Granada. CEAMA, Avda. del Mediterráneo, 5, 18006. Granada, Espanha (mlosada@ugr.es)

\*\*\* WW - Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A., Portugal

### Resumo

O projecto convencional de emissários submarinos, que inclui concepção, dimensionamento, construção, exploração, manutenção e reparação, não se baseia numa avaliação de riscos explícita e sistemática e os métodos de dimensionamento destas estruturas são de natureza determinística. No entanto, o projecto destas obras é muito complexo, dispendioso e estão-lhe associadas inúmeras incertezas relacionadas, por exemplo, com o carácter aleatório das solicitações actuantes (e.g. ondas, correntes), os modelos utilizados para representar a realidade (e.g. modelos físicos/numéricos), etc.

Como tal, é necessário que se utilizem metodologias que permitam considerar a aleatoriedade e as incertezas existentes e incorporar o máximo de conhecimento e de dados disponíveis, e que possibilitem uma gestão dos riscos associados e permitam otimizar o custo do projecto.

Uma abordagem de gestão de riscos, baseada em métodos probabilísticos e de optimização (que entram em linha de conta com a probabilidade de falha das estruturas e suas consequências), dá resposta a estas necessidades, sendo o objecto do presente estudo. Pretende-se assim: (1) a realização de um inventário de riscos associado com o projecto de emissários e identificação do modo de falha destas estruturas; (2) estabelecimento de uma metodologia para aplicar técnicas probabilísticas e de optimização ao projecto; e (3) desenvolvimento de ferramentas computacionais para o dimensionamento probabilístico e optimizado das estruturas, que resultará num conjunto de recomendações a ser aplicado a estes projectos.

A metodologia utilizada no presente estudo baseia-se nas Recomendações da ROM 0.0 (2002), onde estão classificadas as estruturas marítimas em termos da sua natureza intrínseca geral e operacional, avaliando-se as consequências económicas, sociais e ambientais em caso de falha grave ou paragem operativa.

### Palavras-chave

Emissários submarinos, avaliação de riscos, estados limites, modos de falha.

## 1. INTRODUÇÃO

Os emissários submarinos são construídos como elementos essenciais para uma abordagem integrada de protecção costeira em termos ambientais facilitando ou criando possibilidades de desenvolvimento de actividades económicas na sua área de influência.

Para tal, é preciso definir os elementos do emissário submarino respeitando a legislação das zonas costeiras a proteger. Considerando o volume de efluente a descarregar e as condições geográficas e meteorológicas locais, é possível a utilização de diversos métodos de cálculo, com diferentes graus de precisão.

As boas condições de funcionamento dos emissários submarinos são de extrema importância para o ambiente, para o bem estar das populações e para a economia local. A estrutura deverá ser segura e fiável ao longo do seu período de vida útil.

Diversos factores, descritos na secção dos modos de falha e paragem operativa, contribuem para perda de resistência da estrutura (perda de segurança), perda da capacidade estrutural (perda de serviço), e/ou capacidade operacional (perda de exploração). Este processo pode ocorrer súbita ou gradualmente, de forma temporária ou permanentemente, parcial ou totalmente. Um dos principais objectivos do projecto é assegurar que a estrutura proposta seja fiável em termos de segurança, funcional em termos de serviço, e operacional relativamente ao uso e exploração. Assim, os critérios de projecto no que diz respeito à fiabilidade, funcionalidade e operacionalidade devem ser especificados previamente. A construção e manutenção dos custos da estrutura, assim como o seu uso e exploração, dependerão de todos estes elementos durante a sua vida útil.

No entanto, a especificação de critérios de projecto não é uma tarefa simples. Decisões referentes ao projecto de estruturas marítimas são realizadas com base em estudos prévios, que incluem, entre outros, uma análise dos impactos económico, social e ambiental da construção. No entanto, na falta de estudos específicos, o engenheiro necessita de linhas de orientação para a especificação destes critérios *à priori*, permitindo a comparação entre alternativas de projecto.

Recomendações para a elaboração de projectos de estruturas marítimas (e.g. [ROM 0.0, 2002]) incluem a aplicação de técnicas probabilísticas e de optimização. No entanto, a sua aplicação tem sido restrita essencialmente a estruturas portuárias e de protecção costeira (e.g. [Burcharth, 2000], [Oumeraci, 2001]), sendo o dimensionamento de emissários sobretudo determinístico. Neste contexto, uma metodologia de gestão de riscos para o projecto de emissários submarinos baseada nestas técnicas é de grande importância.

O elevado custo de construção dos emissários torna-os adequados a uma abordagem em que os riscos são sistemática e explicitamente minimizados ou evitados, e em que estão envolvidos todos os *stakeholders* para que se faça uma atribuição racional de responsabilidades para cada risco e em que se procede a uma optimização de custos.

O objectivo da investigação descrita neste artigo é reunir informação acerca do comportamento físico de emissários submarinos e de métodos para a sua gestão de riscos em projectos, criando uma metodologia consistente de gestão de riscos destas estruturas. Para tal é necessário: (1) preparar um inventário de riscos associados ao projecto de emissários e identificar os seus modos de falha; (2) estabelecer uma metodologia de aplicação de técnicas probabilísticas e de optimização adaptadas ao projecto de emissários; e (3) desenvolver ferramentas computacionais para o dimensionamento probabilístico e optimizado destas estruturas, que resultará num conjunto de recomendações a aplicar nestes projectos.

O objectivo principal deste artigo é apresentar os primeiros passos de um procedimento a usar ao longo da investigação e ilustrar a sua aplicação a quatro casos de estudo de emissários submarinos da costa portuguesa.

## 2. PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

O procedimento geral de cálculo utilizado neste artigo consiste numa sequência de passos, que ajuda a determinar se um projecto de um emissário submarino satisfaz os requisitos de segurança, serviço e uso e exploração de acordo com os critérios recomendados de fiabilidade,

funcionalidade e operacionalidade durante as várias fases de projecto.

Este procedimento deverá iniciar-se definindo e situando a estrutura no tempo e no espaço em termos de segurança, serviço e uso e exploração. Conceitos importantes a definir incluem a natureza intrínseca, permanência, fases de projecto e sua duração, métodos de verificação da estrutura marítima e dos seus elementos e probabilidade de ocorrência de um modo de falha, bem como de um conjunto de modos de falha e modos de paragem. Com base nestes conceitos, é possível estimar a vida útil da estrutura, a probabilidade conjunta de falha relativamente aos modos de falha principais associados a estados limites últimos e de serviço, a operacionalidade mínima e o número médio de falhas técnicas admissíveis do sistema [ROM 0.0, 2002].

## 2.1. Estados Limites e Modos de Falha

Estado limite é um estado de projecto em que a estrutura, ou algum dos seus elementos, fica fora de uso ou serviço por incumprimento dos requisitos de segurança, serviço ou de uso e exploração especificados no projecto. Os estados limite classificam-se como estados limites últimos (ELU), de serviço (ELS) e de utilização (ELO).

Modo de falha é uma forma ou mecanismo, geométrico, físico, mecânico, químico ou biológico, pelo qual a obra ou algum dos seus elementos fica fora de serviço por causas estruturais. Quando um modo de falha ocorre, é necessário proceder a reparações ou à sua reconstrução de modo a restabelecer o nível apropriado de segurança e operacionalidade da estrutura. Os modos de falha estão associados a estados limites últimos ou de serviço.

Estados limites últimos são estados que produzem o colapso da estrutura devido a ruptura ou danos estruturais. São estados que provocam a perda da capacidade estrutural ou resistência. Quando o modo de falha é uma patologia ou é produzida pela acção de um ou mais agentes durante um período de tempo muito inferior à vida útil da estrutura, o modo de falha deve ser considerado estado limite último.

Estados limites de serviço são estados que induzem uma perda de funcionalidade na estrutura e paragem operativa. São estados que produzem uma perda de serviço e funcionalidade reversível ou irreversível devido a uma falha estrutural, estética ou ambiental ou devido a uma limitação legal. O modo de falha pode reduzir a vida útil e a fiabilidade da estrutura e poderia ser prevenido ou adiado através de uma estratégia adequada de manutenção da estrutura e dos seus elementos [ROM 0.0, 2002].

Nos estados limites de utilização o uso e exploração da estrutura são reduzidos ou temporariamente interrompidos devido a causas externas à estrutura e seus elementos, sem dano estrutural. Ocorre perda de exploração mas sem falha estrutural ou funcional quando há:

- *Excedência dos valores limite* dos factores ambientais (agentes climáticos) levando à interrupção da exploração;
- *Efeitos ambientais ou sociais inaceitáveis*: modos de paragem realizados para evitar danos para as populações, habitats e ambiente;
- *Restrições legais*: modos de paragem realizados para respeitarem os requisitos legais impostos (e.g. Decreto-Lei n.º 152/97 que define as normas de qualidade a que as águas superficiais devem obedecer, em função dos respectivos usos).

O procedimento descrito na ROM 0.0 estabelece a probabilidade geral de falha na vida útil de uma estrutura marítima para todos os modos de falha principais associados a estados limites últimos de serviço.

Modos de falha principais e modos de paragem são aqueles cuja ocorrência tem consequências significativas para a fiabilidade, a funcionalidade e a operacionalidade da estrutura. A sua probabilidade de ocorrência não pode necessariamente ser significativamente diminuída com um aumento do custo de construção, isto é, melhorando o dimensionamento.

Por exemplo, um pequeno aumento do diâmetro do emissário não implica necessariamente uma diminuição significativa da sua probabilidade de falha, mas envolve um grande aumento do custo. Da mesma forma, um aumento no comprimento do emissário poderá envolver uma diminuição significativa na sua probabilidade de falha, mas sem um elevado custo associado. A comparação entre o aumento do custo e a redução esperada na probabilidade de falha é necessária para determinar se um modo de falha pode ser considerado principal ou não.

Os principais modos de falha e os estados limite correspondentes, considerados no presente estudo para cada secção do emissário submarino são:

#### ***Para a conduta submersa***

1 – Colapso progressivo (ELU): causado por a) variações de forças devido a: acção directa das ondas, vibrações no sistema, e.g. devido à formação de esteiras de vórtices (correntes, ondas, vento ou reboque); movimentos na estrutura de apoio da conduta; flutuações da pressão; e impulsão devido a liquefacção das areias, b) instabilidade vertical devido à variação das forças de sustentação resultantes da pequena distância entre o tubo e o fundo;

2 – Rotura (ELU/ELS): causada por impactos associados a actividades de terceiros: âncoras de barcos, operações de pesca, queda de objectos, redes de pesca;

3 - Fadiga (ELS): associada às acções naturais (ventos, ondas, correntes, sismos, etc);

4 - Obstrução (ELS): consequência de velocidades baixas do efluente, sedimentação, e bolsas de ar devidas a curvaturas na conduta;

5 – Corrosão interna (ELS/ELO): abrasão, acção de bactérias, velocidades insuficientes para auto-limpeza.

#### ***Para o difusor***

1 - Rotura (ELU): causada por impactos associados a actividades externas: âncoras de navios, operações relacionadas com a pesca, impacto de objectos em queda, redes de pesca;

2 - Obstrução (ELS): crescimento marinho, intrusão de água do mar, entrada de sólidos em ciclos de pouco caudal, objectos presos;

3 - Corrosão (ELS/ELO): por intrusão salina.

#### ***Para o cachimbo***

1 - Ruptura (ELU): impacto de objectos, acções naturais, deslocamento ou assentamento da conduta;

2 - Obstrução (ELS): crescimento marinho, intrusão de água do mar, entrada de sólidos durante ciclos com menor caudal, objectos presos;

3 - Corrosão (ELS/ELO): por intrusão salina.

#### ***Para os anéis de afundamento e juntas da conduta***

1 - Fractura (ELS): deslocamento da conduta, pressões em excesso, liquefacção do solo, instabilidade vertical, corrosão das partes metálicas.

## **2.2. Definição dos Critérios de Projecto**

Como mostrado na Figura 1, o procedimento usado para obter os critérios de projecto consiste em três passos [Losada e Benedicto, 2005]:

1. Avaliação dos índices de repercussão económica, social e ambiental que definem a natureza intrínseca geral e operacional da estrutura;

2. Classificação da estrutura de acordo com os índices obtidos no passo 1; e

3. Especificação dos critérios de projecto em função da classificação da estrutura.

### 2.3. Natureza Intrínseca Geral e Operacional

A importância de um elemento de uma obra marítima, assim como a repercussão económica, social e ambiental gerada em caso de destruição ou perda de funcionalidade, avalia-se através da determinação da natureza intrínseca geral do elemento (GIN). Esta natureza avalia-se através da natureza intrínseca do sistema (Figura 1) seleccionando o modo de falha que tem maiores repercussões em termos de falha crítica, destruição ou perda total de serviço e funcionalidade [ROM 0.0, 2002].

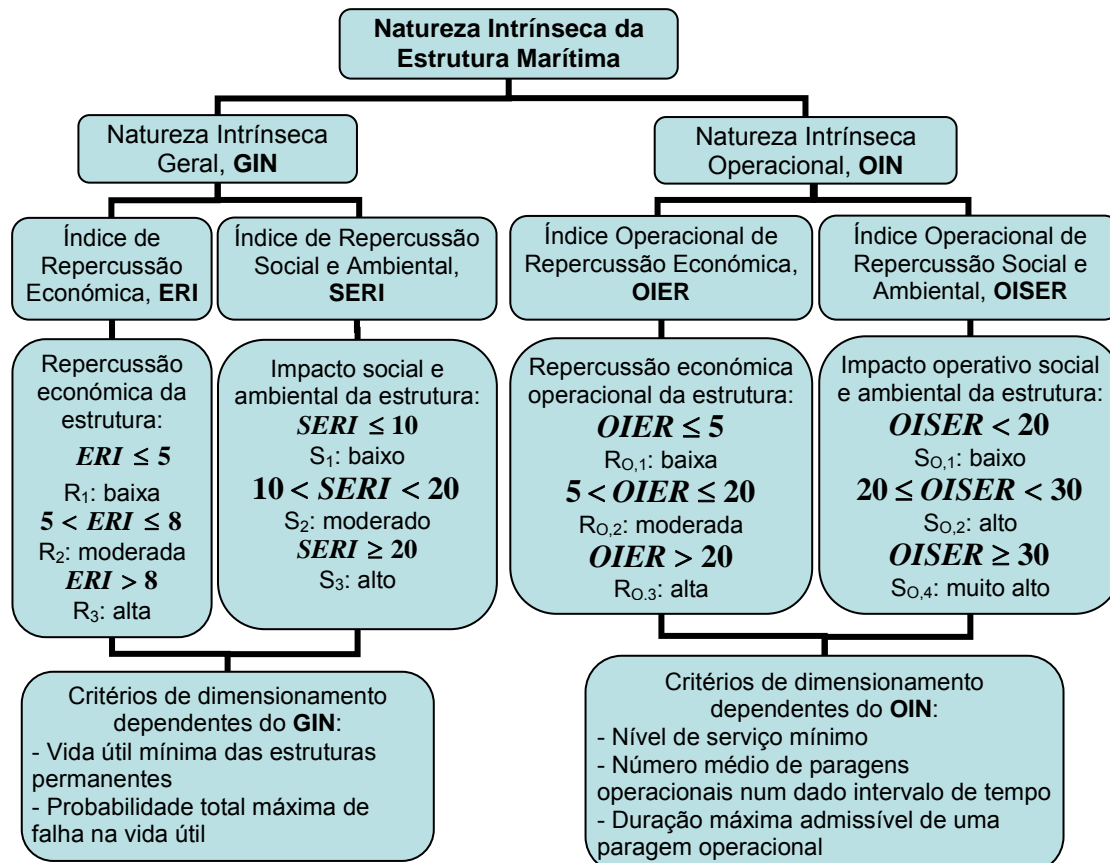


Figura 1. Natureza intrínseca do emissário submarino [adaptado da ROM 0.0 (2002) e Losada e Benedicto (2005)].

A natureza intrínseca da estrutura é estabelecida (na ausência de especificações do dono de obra) como função do índice de repercussão económica (ERI) e do índice de repercussão social e ambiental (SERI), resultando na classificação da estrutura em termos de dois valores ( $R_i$ ,  $S_i$ ).

As repercussões económicas, sociais e ambientais devidas à paragem da estrutura ou à redução do seu nível de operacionalidade são especificadas através da sua natureza intrínseca operacional (OIN). Será avaliada seleccionando, entre os modos principais de paragem operacional, aquela que dá o nível operacional mínimo e é estabelecida em termos de índice operativo de repercussão económica (OIER) e do índice operativo de repercussão social e ambiental (OISER), resultando na classificação da estrutura em termos de dois valores ( $R_{O,i}$ ,  $S_{O,i}$ ).

As definições destes índices descritas na ROM 0.0 para estruturas marítimas foram, no âmbito da presente investigação, adaptadas a emissários submarinos, incluindo aspectos considerados relevantes neste tipo de estruturas e suas consequências.

### 2.3.1. Índice de Repercussão Económica (ERI)

Este índice avalia as eventuais repercussões económicas causadas pela reconstrução da estrutura ( $C_{RD}$ ) e as consequências para as actividades económicas directamente relacionadas com a estrutura ( $C_{RI}$ ) em caso da sua destruição ou perda total da sua capacidade de exploração. O ERI é definido por (Figura 2):

$$ERI = \frac{C_{RD} + C_{RI}}{C_0} \quad (1)$$

onde  $C_0$  é um parâmetro económico de dimensionalização, que depende da estrutura económica e do nível económico de desenvolvimento do país onde a estrutura será construída, sendo variável no tempo. Em Espanha, por exemplo, o valor de  $C_0$  aplicado é  $C_0 = 3$  milhões de euros para o ano de projecto. Para Portugal assume-se, numa primeira aproximação, o valor de 300 mil euros.

$C_{RD}$  é o custo correspondente às repercussões económicas que tem a reconstrução da estrutura.

Na ausência de estudos detalhados, este custo pode ser considerado igual ao investimento inicial, actualizado para o ano em questão [ROM 0.0, 2002].

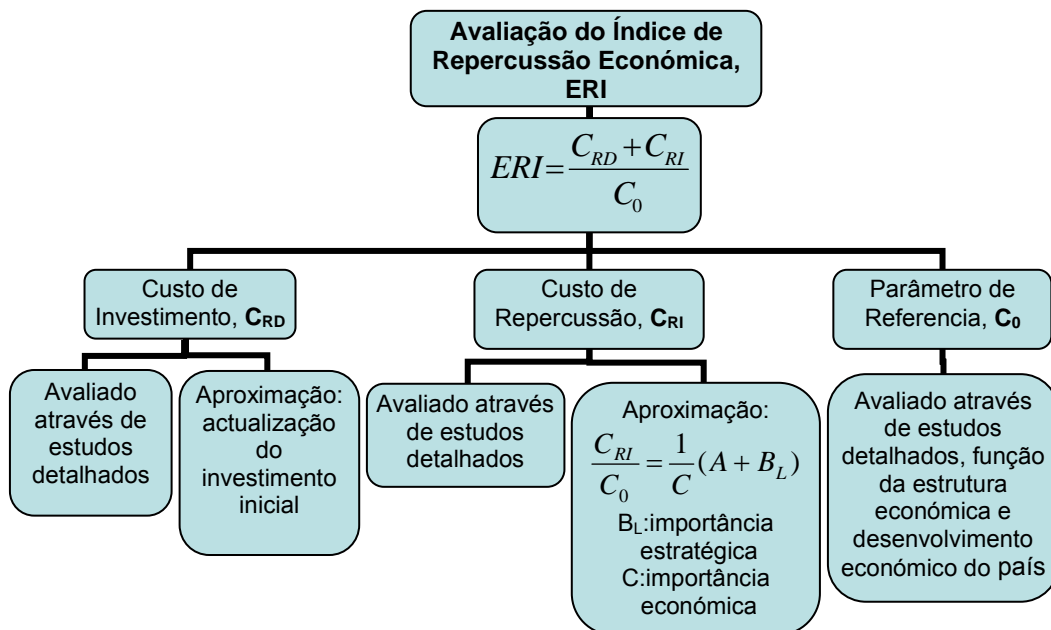


Figura 2. Avaliação do índice de repercussão económica [adaptado da ROM 0.0 (2002) e Losada e Benedicto (2005)].

$C_{RI}$  é o custo utilizado para avaliar as repercussões económicas causadas pelas consequências nas actividades económicas da destruição ou perda de operacionalidade da estrutura. Estas actividades referem-se a serviços que a estrutura proporciona depois de ter iniciado o seu funcionamento, assim como serviços necessários devido a danos ocorridos por défice de funcionamento da estrutura. Este custo é avaliado em termos de perda de Valor Bruto Acrescentado (GAV), a preços de mercado durante o período de tempo esperado para a reconstrução da estrutura depois da sua destruição ou perda de operacionalidade, considerando que ocorre quando as actividades económicas directamente relacionadas com a estrutura estão consolidadas [ROM 0.0, 2002].



De acordo com o índice de repercussão económica (ERI), os emissários submarinos podem ser classificados em 3 grupos ( $R_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ):

- $R_1$ , estruturas com repercussão económica baixa:  $ERI \leq 5$
- $R_2$ , estruturas com repercussão económica moderada:  $5 < ERI \leq 8$
- $R_3$ , estruturas com repercussão económica alta:  $ERI > 8$

### Avaliação Preliminar de $C_{RI}/C_0$

Nos casos em que a determinação detalhada de  $C_{RI}$  não é realizada, ou por razões de excesso de complexidade devido ao tamanho da estrutura ou porque não há estudos prévios de base, o valor do ERI pode ser estimado qualitativamente pela relação  $C_{RI} / C_0 = 1 / C(A + B)$ , onde A representa o valor do contexto do sistema económico e produtivo onde a estrutura se insere; B avalia a importância estratégica do sistema económico e produtivo; e C representa a importância da estrutura para o mesmo sistema [ROM 0.0, 2002].

O papel de C no valor de ERI é maior que o do A ou B. Os valores de C para os emissários submarinos podem ser: 3 (relevante) ou 2 (essencial).

Se a estrutura é irrelevante para o sistema económico e produtivo em que se insere, falhas estruturais, dano/destruição ou perda total da sua funcionalidade não afectarão o sistema.

Os emissários submarinos actuam sobretudo a um nível local, logo o coeficiente A é considerado constante e unitário ( $A=1$ ) para todos os casos.

A metodologia anterior foi desenvolvida para estruturas marítimas; no entanto, no caso de emissários submarinos será mais adequada uma relação que considere a importância estratégica local do emissário. Assim, o coeficiente B é substituído por  $B_L$ , considerando a relevância do emissário submarino para:

- a<sub>1</sub>) Economia: pesca e moluscos (Essencial (5), relevante (2), irrelevante (0));
- a<sub>2</sub>) Ambiente: habitats sensíveis, flora e fauna (Essencial (5), relevante (2), irrelevante (0));
- a<sub>3</sub>) Turismo: e.g. praias e desportos náuticos (Essencial (5), relevante (2), irrelevante (0)).

Assim, para os emissários submarinos, a relação  $C_{RI} / C_0$  pode ser avaliada através da seguinte fórmula (Figura 2):

$$\frac{C_{RI}}{C_0} = \frac{1}{C} (1 + B_L) \quad (2)$$

### 2.3.2. Índice de Repercussão Social e Ambiental (SERI)

De acordo com as Recomendações da ROM 0.0, este índice contribui para a avaliação qualitativa das repercussões sociais e ambientais produzidas no caso de destruição ou perda total de operacionalidade da estrutura.

Os factores avaliados são: ( $SERI_1$ ) perda de vida humana; ( $SERI_2$ ) dano para o ambiente e para o património histórico e cultural; ( $SERI_3$ ) nível de consequências sociais, considerando que a falha ocorre depois das actividades económicas directamente relacionadas com a estrutura estarem consolidadas.

De acordo com o índice de repercussão social e ambiental (SERI), os emissários podem ser classificados em 3 grupos ( $S_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ):

- S<sub>1</sub>, estruturas com impacto social e ambiental baixo, SERI ≤ 10
- S<sub>2</sub>, estruturas com impacto social e ambiental moderado, 10 < SERI < 20
- S<sub>3</sub>, estruturas com impacto social e ambiental alto, SERI ≥ 20

### Cálculo do Valor Aproximado do Índice de Repercussão Social e Ambiental

Para as estruturas marítimas, o SERI é definido como a soma dos três subíndices [ROM 0.0, 2002]:

$$SERI = \sum_{i=1}^3 SERI_i \quad (3)$$

Os emissários submarinos deverão contribuir para assegurar a protecção e melhorar os ecossistemas aquáticos, minimizando o risco de doenças para as populações, protegendo o ambiente em termos de uso/valores das águas e considerando o seu potencial impacto, directo ou indirecto, na cadeia alimentar.

Assim, assume-se para o caso dos emissários que o subíndice SERI<sub>1</sub> é alterado para 'impacto na saúde publica' e pode ser representado por:

$$SERI_1 = \left[ \sum_{i=1}^3 a_i + B \right] C \quad (4)$$

onde:

- a<sub>i</sub> – Impacto directo: através de banhos em águas contaminadas e contacto com areia contaminada;
  - a<sub>1</sub>: irritações de pele (irrelevante (0), relevante (1));
  - a<sub>2</sub>: problemas digestivos (irrelevante (0), relevante (2));
  - a<sub>3</sub>: doenças crónicas (irrelevante (0), relevante (5)).
- B - Impacto indirecto: através da ingestão de peixe e moluscos (irrelevante (0), relevante (2));
- C – Sensibilidade da zona costeira (sensível (2), *standard* ou menos sensível (1)).

A legislação Portuguesa, através do Decreto-Lei n.º 152/97, define as zonas costeiras portuguesas como 'sensíveis' e 'menos sensíveis', estando o Algarve incluído na primeira categoria e a restante costa na última.

O subíndice SERI<sub>2</sub> é substituído por 'danos para o ambiente e habitats' já que os emissários submarinos não têm efeito no património histórico e cultural.

O subíndice SERI<sub>3</sub> avalia as consequências sociais. É classificado para os emissários submarinos seguindo a metodologia da ROM 0.0 para estruturas marítimas:

- Baixo (0), quando não há sinais de consequências sociais significativas associadas à falha do emissário;
- Moderado (5), se existe um nível mínimo de consequências sociais associado com níveis de SERI<sub>1</sub> e de SERI<sub>2</sub> altos;
- Alto (10), se existe um nível mínimo de consequências sociais associado com um nível de SERI<sub>1</sub> catastrófico e de SERI<sub>2</sub> muito alto;
- Muito alto (15), quando as consequências sociais são máximas.



### 2.3.3. Vida Útil Mínima

A duração da vida útil da estrutura deverá ser, pelo menos, o valor descrito na Tabela 1 de acordo com o ERI do emissário submarino. A tabela foi desenvolvida com base nos resultados obtidos para os quatro casos de estudo analisados no presente artigo. Como primeira aproximação, a vida útil foi definida para três classes do ERI.

**Tabela 1. Vida útil mínima**

Índice de Repercussão Económica	Vida Útil (anos)
< 5	15 - 25
5 - 8	26 - 50
> 9	> 50

### 2.3.4. Índice Operacional de Repercussão Económica (OIER)

O índice operacional de repercussão económica (OIER) avalia quantitativamente os custos resultantes de paragem operacional da estrutura. O valor do OIER pode ser qualitativamente estimado como se mostra na secção seguinte:

De acordo com o valor do OIER, os emissários podem ser classificados em três grupos ( $R_{O,i}$ ,  $i = 1, 2, 3$ ):

- $R_{O,1}$ , estruturas com repercussão económica baixa:  $OIER \leq 5$
- $R_{O,2}$ , estruturas com repercussão económica moderada:  $5 < OIER \leq 20$
- $R_{O,3}$ , estruturas com repercussão económica alta:  $OIER > 20$

### Cálculo do Valor Aproximado do Índice Operacional de Repercussão Económica

O OIER é determinado através da seguinte relação [ROM 0.0, 2002]:

$$OIER = F \cdot [D + E] \quad (5)$$

onde  $D$  avalia a simultaneidade do período de demanda afectado pela estrutura e o período de intensidade do agente que define o nível de serviço;  $E$  caracteriza a intensidade de demanda no período considerado; e  $F$  caracteriza a adaptabilidade à demanda e o contexto económico para a paragem operacional. Assim, se a demanda se adapta sem problemas à paragem da estrutura, as repercussões económicas da paragem são negligenciáveis.

De acordo com esta descrição, foram determinados os coeficientes para avaliar as repercussões económicas devidas a paragem operacional, apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2. Parâmetros para avaliar o índice operacional de repercussão económica.**

D	Valor	E	Valor	F	Valor
Classificação		Classificação		Classificação	
Períodos não-simultâneos	0	Não intensivo	0	Alto	0
Períodos simultâneos	5	Intensivo	3	Moderado	1
		Muito intensivo	5	Baixo	3

### 2.3.5. Índice Operacional de Repercussão Social e Ambiental (OISER)

O índice operacional de repercussão social e ambiental (OISER) avalia qualitativamente as repercussões sociais e ambientais produzidas no caso de paragem operacional da estrutura.

Na maioria das estruturas marítimas o OISER é zero, já que quando ocorre paragem operacional, as possibilidades de impacto ambiental desaparecem. A paragem de estruturas como os emissários terá repercussões significativas ou graves em termos sociais e ambientais.

De acordo com o valor do índice operacional de repercussão social e ambiental (OISER), os emissários submarinos podem ser classificados em três grupos ( $S_{O,i}$ ,  $i = 1, 2, 3$ ):

- $S_{O,1}$ , estruturas com impacto social e ambiental baixo,  $OISER < 20$
- $S_{O,2}$ , estruturas com impacto social e ambiental alto,  $20 \leq OISER < 30$
- $S_{O,3}$ , estruturas com impacto social e ambiental muito alto,  $OISER \geq 30$

#### Cálculo do Valor Aproximado do Índice Operacional de Repercussão Social e Ambiental

Para os emissários submarinos, e de acordo com as Recomendações da ROM 0.0 (2002) para estruturas marítimas, o OISER é definido como a soma dos três subíndices:

$$OISER = \sum_{i=1}^3 OISER_i \quad (6)$$

O subíndice  $OISER_1$  avalia o impacto da paragem operacional do emissário na saúde humana, e são considerados os seguintes valores:

- Relevante (3), quando o impacto na saúde humana é importante mas afecta um número reduzido de pessoas e o efluente é do tipo urbano;
- Alto (10), quando o impacto na saúde humana é importante e afecta: a) um número elevado de pessoas e o tipo de efluente é urbano, b) um número reduzido de pessoas e o tipo de efluente é industrial;
- Muito alto (15), quando o impacto na saúde humana é muito importante, afecta um número reduzido de pessoas e o efluente é do tipo industrial;
- Catastrófico (20), quando o impacto na saúde humana é muito importante e afecta um elevado número de pessoas e o efluente é do tipo industrial;

O subíndice  $OISER_2$  avalia a possibilidade de danos para o ambiente e habitats quando ocorre paragem operacional do emissário:

- Baixo (2), quando a possibilidade de dano para o ambiente e habitats é pouco provável e o efluente é do tipo urbano;
- Moderado (4), quando a possibilidade de dano para o ambiente e habitats é moderada devido à existência de património ambiental e habitats e o efluente é do tipo urbano;
- Alto (8), quando a possibilidade de dano para o ambiente e habitats é alta devido: a) à existência de importante património ambiental e habitats e o efluente é do tipo urbano e/ou industrial, b) existência de património ambiental e habitats e o efluente é do tipo industrial;
- Muito alto (15), quando a possibilidade de dano para o ambiente e habitats é muito alta e o tipo de efluente é proveniente de indústria pesada.

O subíndice  $OISER_3$  avalia o nível de alarme social gerado associado à paragem operacional do emissário submarino. Os seguintes valores são utilizados:

- Baixo (0), o alarme social gerado não é significativo;

- Moderado (5), o alarme social gerado é mínimo e está associado a valores do OISER<sub>1</sub> e do OISER<sub>2</sub> altos;
- Alto (10), o alarme social gerado é mínimo e está associado a valores do OISER<sub>1</sub> catastróficos e do OISER<sub>2</sub> muito altos;
- Muito alto (15), Grau máximo de alarme social.

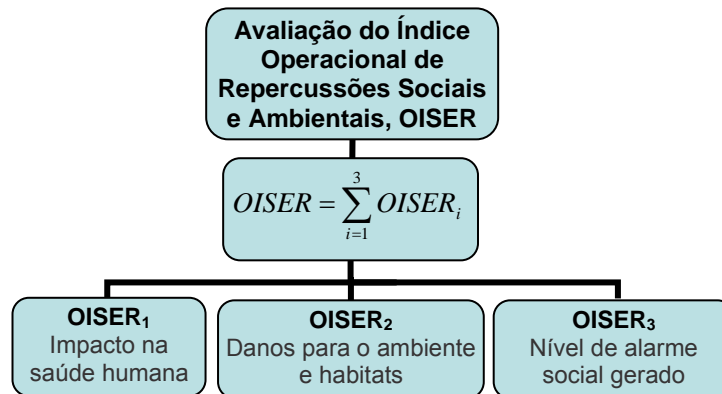


Figura 3. Avaliação do índice operacional de repercussões sociais e ambientais [adaptado da ROM 0.0 (2002) e Losada e Benedicto (2005)].

### 2.3.6. Uso e Exploração do Sistema no Período de Vida Útil

A exploração da estrutura pode ser especificada em termos de níveis operacionais mínimos (atingidos no período de tempo especificado em estudos económicos prévios), o número médio de paragens (num intervalo de tempo normalmente associado a factores sociais e ambientais) e a duração de paragem máxima permitida (analisada num intervalo de tempo que depende do resultado económico e do ciclo de demanda).

### 2.3.7. Número Médio de Paragens

No intervalo de tempo especificado (normalmente um ano) e para os casos em que não é especificado *à priori* o número médio de ocorrências de todos os modos identificados como estados limite de paragens,  $N_{stop}$ , deverão considerar-se, no máximo, os valores estabelecidos na Tabela 3.

Tabela 3. Número médio de paragens operacionais por intervalo de tempo.

SERI	≤ 10	11 - 19	≥ 20
Number	12	7	4

Se a paragem operacional tem repercussões sociais e ambientais,  $S_{0,4}$ , não deverão ocorrer paragens. O emissário submarino deve permanecer operacional excepto no caso de condições extraordinárias imprevistas.

As causas principais de perda de operacionalidade são obstrução (da conduta e do difusor), excedência dos valores limite recomendados para a descarga do efluente e para o uso do *bypass*. Os *bypass* podem provocar riscos para a saúde pública directamente através do contacto com águas contaminadas ou através de ingestão de peixe e moluscos. O uso de *bypass* ocorre sobretudo em tempo húmido (chuvas repentinas) quando o efluente excede a

capacidade do emissário. Informações sobre o uso de *bypass* são úteis na determinação da necessidade de melhoria da operação e manutenção da estrutura ou de uma melhoria do emissário. O número de paragens será então (Tabela 4):

$$N_{stop} = \sum_{i=1}^3 L_i \quad (6)$$

onde,

L<sub>1</sub>: Limites ambientais de descarga excedidos;

L<sub>2</sub>: Obstrução da conduta ou do difusor;

L<sub>3</sub>: Uso do *bypass* devido a caudal em excesso.

**Tabela 4. Parâmetros para definir o número médio de paragens por intervalo de tempo.**

	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	$N_{stop} = \sum_{i=1}^3 L_i$
SERI ≤ 10	8	1	3	12
10 < SERI < 20	4	1	2	7
SERI ≥ 20	2	1	1	4

### 2.3.8. Duração Máxima de Paragem

Na vida útil e para os casos em que não foi especificado *à priori*, a duração provável máxima de paragem expressa em horas, uma vez que a paragem ocorra não pode exceder os valores da Tabela 5, de acordo com o OIER e o OISER da estrutura.

**Tabela 5. Duração máxima provável do modo de paragem (horas).**

OIER	OISER		
	< 20	20-29	≥ 30
≤ 5	24	12	6
6-20	12	6	3
> 20	8	4	2

## 3. CASOS DE ESTUDO

No presente estudo, quatro emissários submarinos da costa portuguesa foram seleccionados para representar características típicas destas estruturas, com base no tipo de efluente (industrial e urbano) e na importância para a região em termos de turismo e área servida (Figura 4). Estes emissários são: o emissário submarino da Guia, Cascais, que serve quatro municípios da zona de Lisboa; o emissário de Sines, onde se situa uma importante indústria petroquímica; o emissário de Viana do Castelo, que recebe efluentes urbanos e efluentes de uma fábrica de papel; e o emissário de Vale de Faro, localizado numa zona de grande afluência turística.

O emissário submarino da Guia tem 2.8 km de comprimento, 1 200 mm de diâmetro, descarregando a 40 m de profundidade desde 1994, em meio receptor classificado como “zona menos sensível”. A sua descarga é de aproximadamente 170 000 m<sup>3</sup> por dia de efluente urbano. A estrutura tem uma geometria em ‘V’ com 80 orifícios em cada difusor. O sistema serve cerca de 720 000 habitantes equivalentes de quatro municípios da região de Lisboa, esperando-se atingir os 920 000 habitantes equivalentes em 2020. O efluente tem tratamento preliminar com remoção de sólidos (<3 mm) e desinfecção no Verão.

O emissário submarino de Sines, que está operativo desde 1978, descarrega cerca de 11 535 m<sup>3</sup> por dia de efluente industrial (indústria química e refinaria) e efluente urbano. O sistema serve aproximadamente 38 000 habitantes equivalentes (urbano) e passa por tratamento secundário. O emissário tem um comprimento de 2 432 m, um diâmetro de 1 100 mm e descarrega a uma profundidade de 38 m. A estrutura tem 60 orifícios no difusor.

O emissário localizado na Praia do Cabedelo, em Viana do Castelo recebe um efluente de uma importante indústria de papel e o efluente urbano com tratamento secundário. O sistema serve uma população de 20 000 habitantes equivalentes e está operativo desde 1973. O caudal de exploração é de 3 000 m<sup>3</sup> por dia e o emissário tem um comprimento de 2 250 m, com um diâmetro de 900 mm e descarrega a uma profundidade de 17.5 m. O difusor tem 15 orifícios.

O emissário submarino de Vale de Faro está situado na Praia do Inatel, Albufeira, um importante destino turístico com uma população flutuante de 14 000 habitantes e está em serviço desde 1986. O sistema fornece saneamento a cerca de 130 000 habitantes equivalentes, descarregando efluente urbano com tratamento secundário e desinfecção do Verão. A estrutura tem 956 m de comprimento, um diâmetro de 400 mm e descarrega a 8 m de profundidade. O difusor tem 8 orifícios. A ETAR de Vale Faro foi construída em 2002 para realizar o tratamento terciário das águas residuais afluentes, para uma população de projecto de 130.000 habitantes equivalentes, com remoção de azoto e desinfecção por UV.

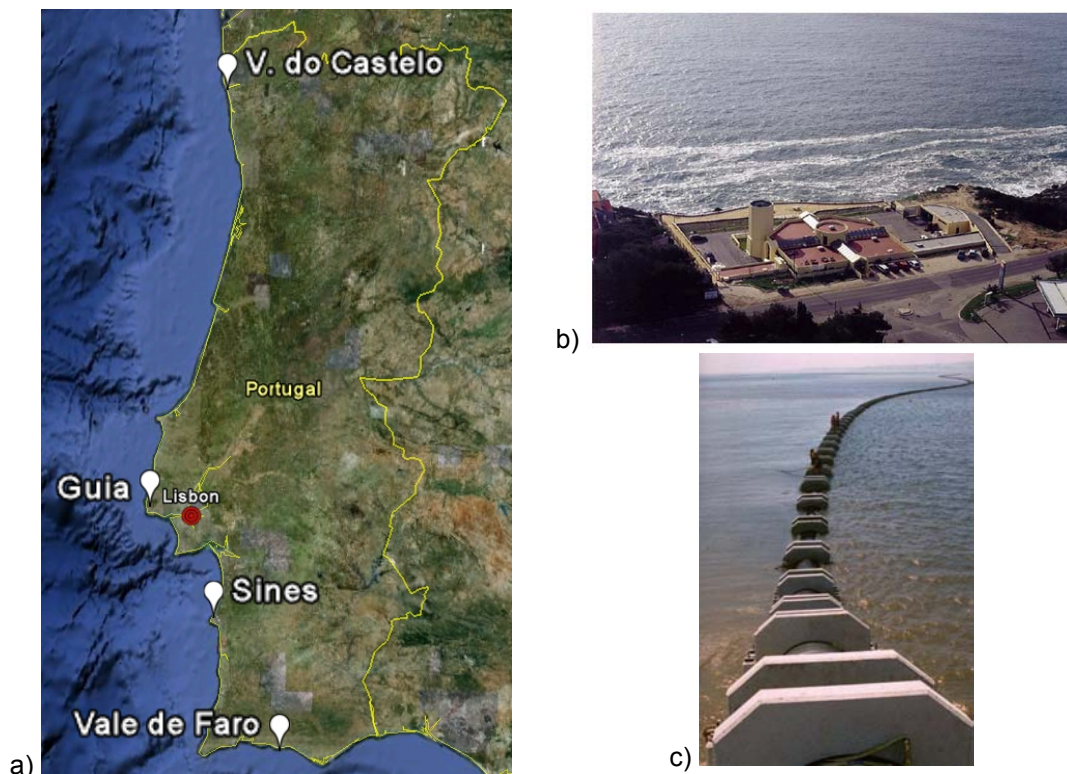


Figura 4. a) Localização dos emissários submarinos estudados, b) Estação de tratamento da Guia, Cascais, c) Emissário submarino da Guia.

O procedimento geral aplicado no presente trabalho consiste na utilização de métodos, a aplicar em sequência, que ajudam a determinar a alternativa de projecto que melhor satisfaz os requisitos de segurança, serviço e exploração que estão de acordo com os níveis recomendados de segurança, funcionalidade e operacionalidade, nas várias fases de projecto.

No presente estudo, o procedimento é aplicado, numa fase preliminar, aos quatro casos de estudo descritos, iniciando-se pela atribuição de valores de ERI e SERI para definir a natureza intrínseca da estrutura marítima.

Os valores de ERI obtidos na Tabela 6 para as estruturas sugerem que as repercussões económicas da sua destruição ou perda total de exploração variam entre baixas ( $ERI \leq 5$ ) para o caso da Guia, moderadas ( $5 < ERI \leq 8$ ) para os casos de Vale de Faro e Viana do Castelo e altas ( $ERI > 8$ ) para o caso de Sines.

Os valores do SERI mostram que as repercussões sociais e ambientais resultantes da destruição ou perda total de operacionalidade dos emissários submarinos são baixas ( $SERI \leq 10$ ) para o emissário da Guia, moderadas ( $10 < SERI < 20$ ) para os casos de Vale de Faro e Viana do Castelo e alta ( $SERI \geq 20$ ) para Sines (Tabela 7).

Para definir a natureza intrínseca operacional foram atribuídos valores aos parâmetros OIER e OISER para os casos de estudo considerou-se que o modo de paragem que implica o nível operacional mínimo é a obstrução do emissário submarino.

Os valores dos parâmetros D, E e F foram considerados para avaliar o OIER:

- *Coefficiente de simultaneidade* ( $D=5.0$ ), períodos simultâneos, pois os emissários estão em funcionamento todo o ano;
- *Coefficiente de intensidade* ( $E=5$ ), muito intensivo, devido ao uso de demanda no período de tempo considerado;
- *Coefficiente de adaptabilidade* ( $F=3$ ), baixa adaptabilidade, devido à existência de apenas um emissário submarino em cada caso de estudo. Em caso de paragem operacional o efluente continua a descarregar junto à costa.

Assim,  $OIER=30$  para os quatro casos de estudo.

Os valores de OISER apresentados na Tabela 8, mostram que o índice operacional de repercussão social e ambiental dos emissários submarinos no caso de paragem operacional é baixo no caso da Guia ( $OISER < 20$ ), alto ( $20 \leq OISER < 30$ ) para Vale de Faro e Viana do Castelo e muito alto ( $OISER \geq 30$ ) para Sines.

Esta classificação permite evidenciar a importância dos emissários submarinos que descarregam efluentes industriais e os seus possíveis impactos na saúde humana e no ambiente.

Considerando a rotura como o pior modo de falha de um estado limite último (ULS), tendo como base os índices obtidos, pode concluir-se que:

- A repercussão económica é baixa ( $R_1$ ) para o emissário submarino da Guia, moderada ( $R_2$ ) para os casos de Vale de Faro e Viana do Castelo e alta ( $R_3$ ) para o caso de Sines;
- O impacto social e ambiental é baixo ( $S_1$ ) para o emissário submarino da Guia, moderado ( $S_2$ ) para os casos de Vale de Faro e Viana do Castelo e alto ( $S_3$ ) para o caso de Sines.
- Quando ocorre obstrução, a repercussão económica é alta para os quatro casos de estudo ( $R_{O,3}$ ) e o impacto social e ambiental é baixo no caso da Guia ( $S_{O,1}$ ), alto ( $S_{O,2}$ ) para Vale de Faro e Viana do Castelo e muito alto ( $S_{O,3}$ ) para Sines.



**Tabela 6. Valores dos parâmetros para avaliar o índice de repercussão económica (ERI) para os casos de estudo.**

Definição do parâmetro	Parâmetro	Guia, Cascais	Vale de Faro, Albufeira	Viana do Castelo	Sines
Investimento inicial actualizado	$C_{RD}$ (euros)	880 000	240 000	250 000	600 000
Parâmetro de dimensionalização	$C_0$	300 000	300 000	300 000	300 000
-	$C_{RD}/C_0$	2.93	0.8	0.83	2.0
Coeficiente de importância económica	$C$				
	3: relevante 2: essencial	3	2	2	2
Economia: pesca/moluscos	$a_1$				
	0: irrelevante 2: relevante 5: essencial	2	5	5	5
Turismo	$a_2$				
	0: irrelevante 2: relevante 5: essencial	2	5	2	2
Ambiente e habitats protegidos	$a_3$				
	0: irrelevante 2: relevante 5: essencial	0	0	5	5
Áreas afectadas, $B_L$	$\sum_{i=1}^3 a_i$	4	10	12	12
$C_{RI}/C_0$	$1/C \times [1 + B_L]$	1.67	5.5	6.5	6.5
ERI	$C_{RD}/C_0 + C_{RI}/C_0$	4.60	6.3	7.33	8.5

**Tabela 7. Valores dos parâmetros para avaliar o índice de repercussão social e ambiental (SERI) para os casos de estudo.**

Definição do parâmetro	Parâmetro	Guia, Cascais	Sines	Viana do Castelo	Vale de Faro, Albufeira
Irritações de pele	$a_1$				
	0: irrelevante 1: relevante	1	1	1	1
Problemas digestivos	$a_2$				
	0: irrelevante 2: relevante	2	2	2	2
Doenças crónicas	$a_3$				
	0: irrelevante 5: relevante	0	5	5	0
Indirecta, ingestão de peixe e moluscos	$B$				
	0: irrelevante 2: relevante	0	2	2	2
Zona costeira	$C$				
	1: <i>standard</i> 2: sensível	1	1	1	2
SERI <sub>1</sub>	$[\sum_{i=1}^3 a_i + B] \times C$	3	10	10	10
SERI <sub>2</sub>	0: Remota 2: Baixa 4: Moderada 8: Alta 15: Muito alta	2	4	4	2
	0: Baixa 5: Moderada 10: Alta 15: Muito alta	5	10	5	5
SERI	$\sum_{i=1}^3 SERI_i$	10	24	19	17

**Tabela 8. Valores dos parâmetros para avaliar o índice operacional de repercussão social e ambiental (OISER) para os casos de estudo.**

Definição do parâmetro	Parâmetro	Guia, Cascais	Vale de Faro, Albufeira	Viana do Castelo	Sines
Impacto na saúde humana	OISER <sub>1</sub> 3: relevante	3	15	10	10
	10: alto				
	15: muito alto				
Impacto no ambiente e habitats	OISER <sub>2</sub> 2: baixa	4	15	8	8
	4: moderada				
	8: alta				
Nível de alarme social gerado	OISER <sub>3</sub> 0: baixo	5	15	10	10
	5: moderado				
	10: alto				
OISER	15: muito alto	12	45	28	28
	$\sum_{i=1}^3 OISER_i$				

## CONCLUSÕES

O objectivo do presente estudo é desenvolver uma metodologia de apoio à decisão no *projecto* de emissários submarinos, para vários materiais, técnicas e elementos utilizados para estes propósitos. Este procedimento é baseado na adaptação da classificação das estruturas marítimas descrito nas Recomendações da ROM 0.0, em termos da sua natureza intrínseca geral e operacional. Estes índices (GIN e OIN) avaliam as consequências económicas, sociais e ambientais dos modos de falha com consequências mais graves.

Dependendo do tipo de emissário e da sua importância para a economia, turismo e ambiente, o passo final do procedimento fornece valores de vida útil mínima da estrutura, a probabilidade conjunta de falha dos modos principais de falha considerados como estados limites últimos e de serviço, a operacionalidade mínima, o número médio de falhas técnicas e o número máximo de horas de paragem admissível.

## AGRADECIMENTOS

Projecto financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através da bolsa SFRH/ BD/ 60748/ 2009.

## REFERÊNCIAS

- Burcharth, H.F. (2000). "Reliability Based Design of Coastal Structures". Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mis.
- Losada, A.Miguel e Benedicto, M. Izaskun (2005). "Target Design Levels for Maritime Structures". J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. 131, pp. 171-180.
- Oumeraci, H.; Kortenhuis, A.; Allosp, W.; de Groot, M.; Crouch, R.; Vrijling, H.; Voortman, H. (2001). "Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters". Balkema Publishers, Amsterdam.
- ROM 0.0 (2002). "General procedure and requirements in the design of harbor and maritime structures. Part I: Recommendations for Maritime Structures", Ministerio de Fomento, Puertos del Estado, Spain.