



ESTUDO COMPARATIVO DE DUAS CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DOS MOLHES DE PROLONGAMENTO DE UM CANAL

Filipa S. B. F. Oliveira* e Claudino Vicente*

* Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal,

foliveira@lnec.pt, cvicente@lnec.pt

Sumário

O canal do Jardim de Alah do Rio de Janeiro, Brasil, estabelece a ligação da zona costeira das praias Arpoador-Ipanema-Leblon com a lagoa Rodrigo de Freitas.

A análise que aqui se descreve faz parte de um estudo integrado de reabilitação ambiental do sistema formado pela lagoa e a orla costeira adjacente. Trata-se de um estudo interdisciplinar realizado pelo LNEC, com uma importante componente de engenharia costeira. A presente análise teve como objectivos comparar o grau de abrigo relativo à penetração da agitação marítima na zona entre os molhes de prolongamento do canal na direcção do mar, e as condições de assoreamento e automanutenção de fundos da zona de entrada do canal, para duas configurações geométricas dos molhes. Estes objectivos foram alcançados através da avaliação das características da agitação marítima e da avaliação do transporte de sedimentos por arrastamento e em suspensão, à entrada do canal e ao longo deste, para as duas configurações geométricas.

No estudo de agitação marítima foi aplicado o modelo matemático RDR-Hyperbolic baseado na equação de *mild-slope* para simular a propagação de um conjunto de ondas monocromáticas representativas do regime de agitação médio anual incidente na zona costeira em estudo. Os processos físicos de transformação da onda considerados foram: refacção, difracção, reflexão e rebentação. A aplicação do modelo matemático compreendeu duas fases: a propagação do regime representativo do regime médio anual ao largo até ao início da zona de implantação dos molhes, numa extensão de zona costeira particularmente complexa devido à existência vários grupos de ilhas; e a propagação da agitação na zona de implantação dos molhes.

No estudo de transporte de sedimentos na zona entre os molhes de prolongamento do canal foi aplicado o modelo comercial LITPACK. Foram determinados os volumes de transporte de areias por suspensão e arrastamento em diversos pontos, por acção conjunta de ondas e correntes de maré.

Os resultados obtidos mostram a maior eficiência de uma das configurações geométricas dos molhes de prolongamento do canal na protecção contra a penetração da agitação marítima e de areias.

Palavras chave: modelação numérica da propagação da onda, equação de *mild-slope*, refacção de onda, difracção da onda, reflexão da onda, rebentação da onda, transporte de sedimentos, assoreamento de canal, praia de Arpoador-Ipanema-Leblon.

1 - Introdução

O estudo que aqui se descreve faz parte de um estudo integrado de reabilitação ambiental solicitado ao LNEC pela Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro. Este último, consiste num estudo de âmbito interdisciplinar, com uma importante componente de engenharia costeira.

O canal do Jardim de Alah do Rio de Janeiro, Brasil, estabelece a ligação da zona costeira das praias Arpoador-Ipanema-Leblon (Figura 1) com a lagoa Rodrigo de Freitas. É um canal com fundo de betão e profundidade constante igual a 0.88 m relativamente ao nível médio do mar. Tem cerca

de 800.0 m de comprimento e largura variável: cerca de 10.0 m à entrada na zona marítima e 30.0 m à entrada na zona da lagoa Rodrigo de Freitas.

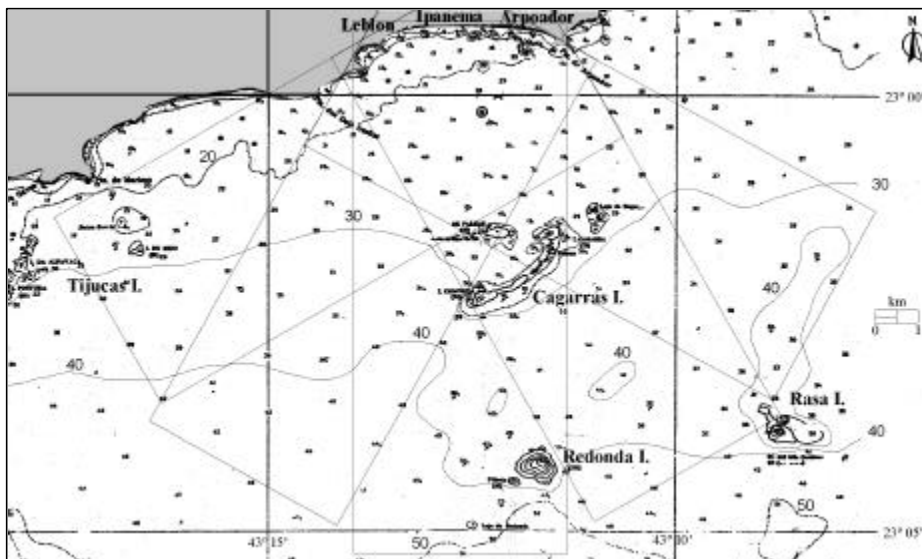


Figura 1 - Localização da zona de estudo. Zona costeira a sul das praias Arpoador-Ipanema-Leblon (Baseado na carta n.º 1501 da Directoria de Hidrografia e Navegação).

O estudo teve como objectivos analisar e comparar o grau de abrigo relativo à penetração da agitação marítima na zona entre os molhes de prolongamento do canal, e analisar e comparar as condições de assoreamento e automanutenção de fundos na mesma zona, para duas configurações geométricas dos molhes. Estes objectivos foram alcançados através da avaliação das características da agitação marítima e da avaliação do transporte de sedimentos por arrastamento e em suspensão no canal definido pelos molhes, para as duas configurações geométricas analisadas.

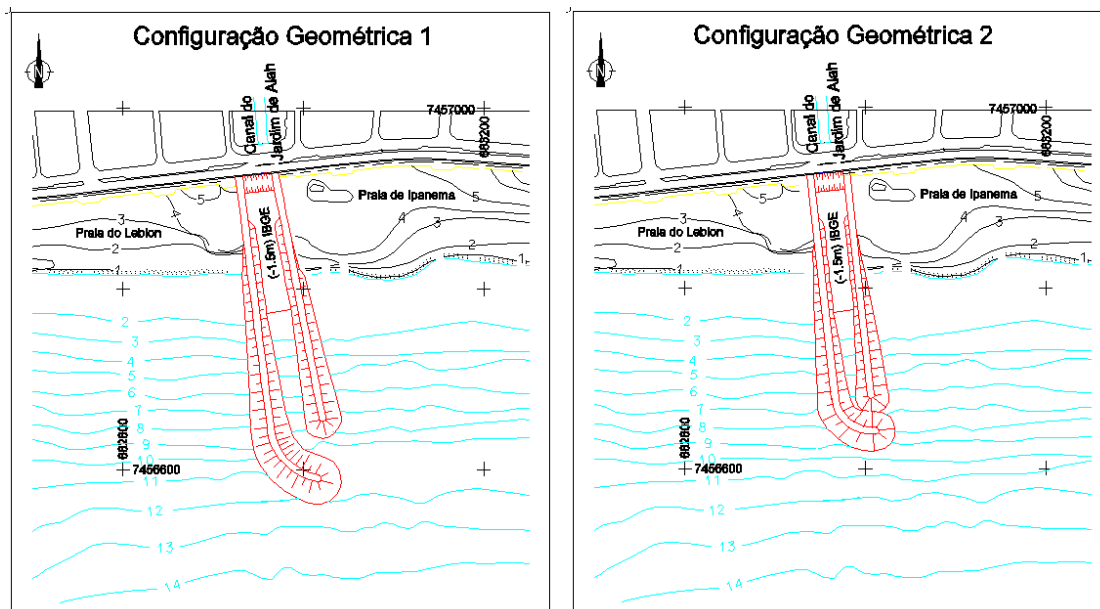


Figura 2 - Configurações geométricas dos molhes: CG1 e CG2.

As duas configurações geométricas dos molhes de prolongamento do canal, aqui nomeadas como configuração geométrica 1 (CG1) e configuração geométrica 2 (CG2), têm as características gerais descritas na Tabela 1, e podem ser vistas na Figura 2. Os molhes são constituídos por enrocamento e secção trapezoidal.

Configuração geométrica 1 (CG1)	Configuração geométrica 2 (CG2)
Molhe do lado da praia de Ipanema com desenvolvimento rectilíneo, 280.0 m de comprimento medidos a partir do passeio marginal onde a obra enraíza, até à sua extremidade, cujo sopé do talude atinge 9.5 m de profundidade.	Molhe do lado da praia de Ipanema com desenvolvimento rectilíneo, 255.0 m de comprimento medidos a partir do passeio marginal onde a obra enraíza, até à sua extremidade, cujo sopé do talude atinge 7.0 m de profundidade.
Molhe do lado da praia do Leblon com comprimento total de 340.0 m. Desenvolvimento rectilíneo até aos 280.0 m do passeio marginal, seguido de um prolongamento em curva até à sua extremidade, cujo sopé do talude atinge 12.0 m de profundidade.	Molhe do lado da praia do Leblon com comprimento total de 315.0 m. Desenvolvimento rectilíneo até aos 255.0 m do passeio marginal, seguido de um prolongamento em curva até à sua extremidade, cujo sopé do talude atinge 9.5 m de profundidade.
Largura variável da secção do canal definido pelos molhes: 32.0 m no enraizamento com o passeio marginal e 60.0 m na extremidade oposta.	Largura constante da secção do canal definido pelos molhes: 32.0 m.
Profundidade variável da secção do canal definido pelos molhes, do canal para o mar: <ul style="list-style-type: none"> • 0.88 m à entrada do canal; • profundidade determinada por um declive de 7.5%, que faz a transição desde a entrada do canal até à profundidade de 1.5 m; • profundidade constante igual a 1.5 m numa extensão de 135.0 m na direcção dos molhes; • e profundidade natural da praia para as restantes secções . 	Profundidade variável da secção do canal definido pelos molhes, do canal para o mar: <ul style="list-style-type: none"> • 0.88 m à entrada do canal; • profundidade determinada por um declive de 7.5%, que faz a transição desde a entrada do canal até à profundidade de 1.5 m; • profundidade constante igual a 1.5 m numa extensão de 135.0 m na direcção dos molhes; • e profundidade natural da praia para as restantes secções .

Tabela 1 - Características das duas configurações geométricas dos molhes.

A descrição desde estudo encontra-se organizada da seguinte forma: no capítulo seguinte apresentam-se os modelos matemáticos aplicados, comenta-se a validade da sua aplicação para o presente caso de estudo e descrevem-se de forma geral as fases em que os modelos foram aplicados no contexto geral do estudo. Os capítulos 3 e 4 são dedicados respectivamente à propagação da agitação marítima desde o largo até à zona de implantação dos molhes e à propagação da agitação marítima na zona de implantação dos molhes. Descrevem-se as condições de entrada no modelo: agitação incidente, geometria de fundos e fronteiras sólidas (ilhas e estruturas marítimas). Faz-se uma análise crítica dos resultados obtidos. No capítulo 5 faz-se a descrição das condições de hidrodinâmica e sedimentares na zona entre os molhes de prolongamento do canal e uma análise do assoreamento resultante. Finalmente no capítulo 6, apresentam-se comentários conclusivos sobre o estudo.

2 - Metodologia

O estudo foi realizado com base em modelação matemática. Foi aplicado um modelo matemático para simular os processos físicos dominantes de transformação da onda na sua propagação em direcção à costa: refacção, difracção, reflexão e rebentação. Foi aplicado um modelo matemático de transporte de sedimentos não coesivos para simulação do transporte de areias em suspensão e por arrastamento devido à acção conjunta de ondas e correntes de maré.

No estudo de agitação marítima foi aplicado o modelo matemático RDR-Hyperbolic (Oliveira, 1993, 1997) baseado na equação de *mild-slope* (Berkhoff, 1972) para simular a propagação de um conjunto de ondas monocromáticas representativas do regime de agitação incidente na zona costeira em estudo. O modelo foi anteriormente verificado através da comparação de resultados

numéricos obtidos com: resultados experimentais e de outros modelos numéricos para o caso da transformação da onda sobre um fundo variável; e soluções analíticas para a difracção da onda por efeito da presença de um quebra-mar destacado, um quebra mar semi-infinito e uma abertura entre quebra-mares. Neste estudo, a aplicação do modelo matemático compreendeu duas fases: a propagação do regime representativo do regime médio anual ao largo até ao início da zona de implantação dos molhes, numa extensão costeira particularmente complexa devido à existência vários grupos de ilhas; e a propagação da agitação na zona de implantação dos molhes.

No estudo de transporte de sedimentos foi aplicado o modelo matemático LITPACK (DHI, 2000) de transporte de sedimentos não coesivos em zonas litorais. Foram simuladas uma série de combinações de condições de hidrodinâmica em três secções do canal definido pelos molhes: acção conjunta de ondas monocromáticas representativas do regime de agitação incidente e correntes de maré astronómica correspondentes à situação de maré viva média e afluência média de caudal de água doce à lagoa Rodrigo de Freitas. As características sedimentológicas foram obtidas através de uma recolha de dados de campo realizada.

3 - Propagação da Agitação Marítima desde o Largo até à Zona de Implantação dos Molhes

3.1 - Condições de Agitação e Batimetria

Dada a inexistência de outros dados de ondas que permitissem fazer uma caracterização do regime de agitação ao largo, o regime de agitação representativo do regime médio anual ao largo, frente às praias Arpoador-Ipanema-Leblon, foi obtido com base em dados do *Ocean Wave Statistics* (Hogben and Lumb, 1967) e encontra-se esquematizado na Tabela 2. É caracterizado por um grupo de ondas monocromáticas descritas por quatro parâmetros: altura significativa, H_s (m), período, T (s), direcção, θ ($^\circ$) e frequência de ocorrência (%).

Regime representativo do regime anual ao largo			
H_s (m)	T (s)	θ ($^\circ$)	Ocorrência %
1.22	6	120	15.2
3.84	6	120	0.4
2.23	7	120	5.2
2.26	11	120	2.6
4.25	11	120	0.3
1.38	12	120	1.2
1.21	6	150	16.2
2.23	8	150	6.0
3.90	8	150	0.3
2.43	11	150	2.9
1.25	12	150	1.4
3.74	12	150	1.5
1.15	6	180	15
2.27	8	180	8.2
3.60	8	180	1.3
1.32	11	180	0.3
2.20	12	180	1.6
4.10	13	180	1.3
1.14	6	210	7.8
2.41	7	210	2.7
4.07	7	210	0.8
2.25	11	210	0.4
1.11	12	210	0.4
4.17	12	210	1.2
1.06	6	240	3.9
2.24	8	240	0.8
1.13	11	240	0.2
2.33	11	240	0.5
4.18	13	240	0.4

Tabela 2 - Regime de agitação marítima representativo do regime médio anual ao largo.

Dada a vasta gama de direcções de onda incidente foram aplicados dez domínios numéricos. A área total de aplicação do modelo matemático (Figura 1), tem os seguintes limites: a Norte, a praia encaixada Arpoador-Ipanema-Leblon, à latitude $22^{\circ} 59' S$, com alinhamento Este - Oeste; a Oeste, o grupo de ilhas Tijucas à longitude $43^{\circ} 18' W$; a Este, pelo meridiano com latitude $43^{\circ} 07' 30''$ (cerca de 5° Este da ilha Rasa); e a Sul pela isolinha de 50.0 m de profundidade. A área de estudo contém quatro grupos de ilhas: as Tijucas, as Cagarras, a Redonda e a Rasa.

A propagação das ondas desde o largo até à entrada nos domínios numéricos foi feita com base na lei de Snell, admitindo ser a refacção o único processo físico responsável pela transformação das ondas a essas profundidades.

O nível do mar considerado nas simulações correspondeu ao nível médio.

3.2 - Resultados

Foi simulada a propagação de cada uma das ondas monocromáticas do conjunto de ondas da Tabela 2. Da grande quantidade de informação obtida através desta fase do estudo, que permitiu também fazer um estudo detalhado de dinâmica litoral no trecho Arpoador-Ipanema-Leblon, destacam-se os seguintes comentários gerais:

- A presença das ilhas influencia a propagação das ondas que se aproximam da costa, originando um padrão de transformação da onda típico do processo de difracção;
- A extensão e alinhamento das zonas de sombra geradas pela presença das ilhas depende das características da onda incidente;
- A exposição da praia à energia das ondas incidentes depende simultaneamente da localização geográfica das ilhas relativamente à praia e das características da onda incidente.

Nas Figuras 3, 4 e 5, apresentam-se os resultados obtidos para três das vinte e nove simulações efectuadas, expressos em termos do factor de amplificação da onda, H_s/H_{si} , onde H_s é a altura significativa na onda em cada posição e H_{si} é a altura significativa da onda incidente no domínio numérico.

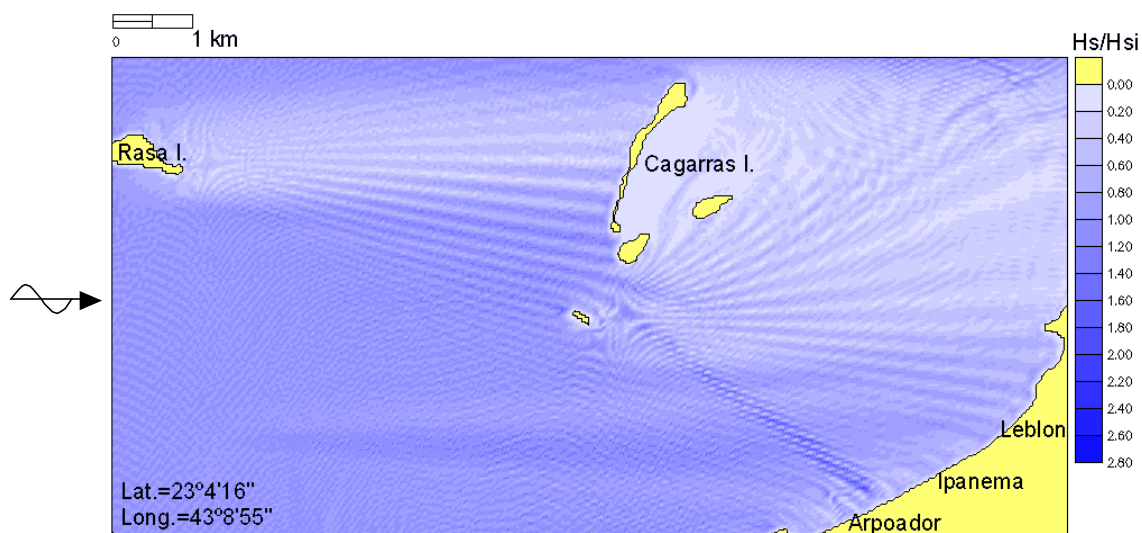


Figura 3 - Factor de amplificação da onda. Onda ao largo: $H_s=3.84m$; $T=6s$; $\theta=120^{\circ}$. Alinhamento horizontal da malha: $E-30^{\circ}-S$ (120°).

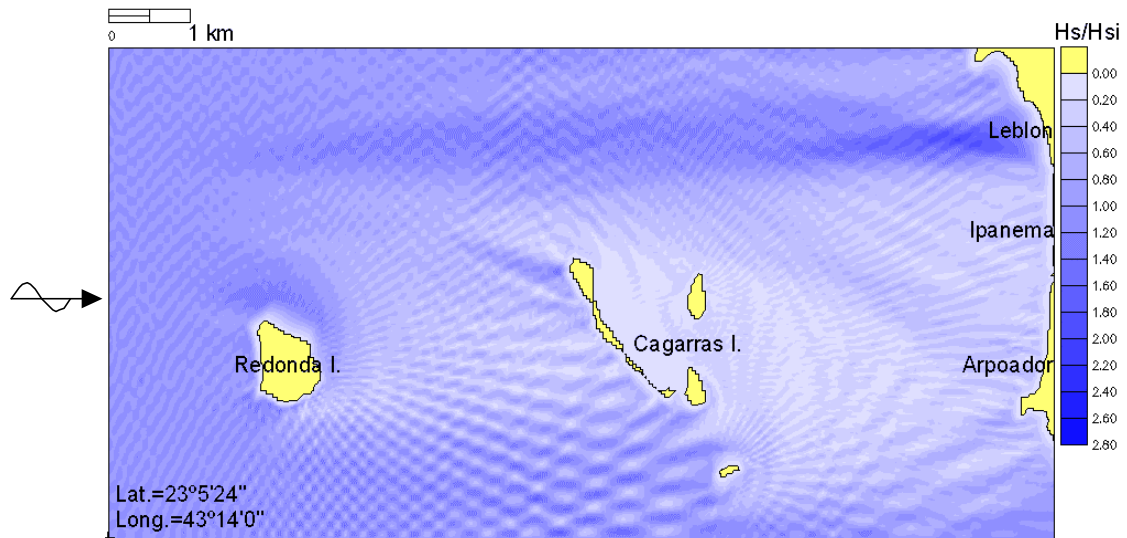


Figura 4 - Factor de amplificação da onda. Onda ao largo: $H_s=4.10\text{m}$; $T=13\text{s}$; $\theta=180^\circ$. Alinhamento horizontal da malha: S (180°).

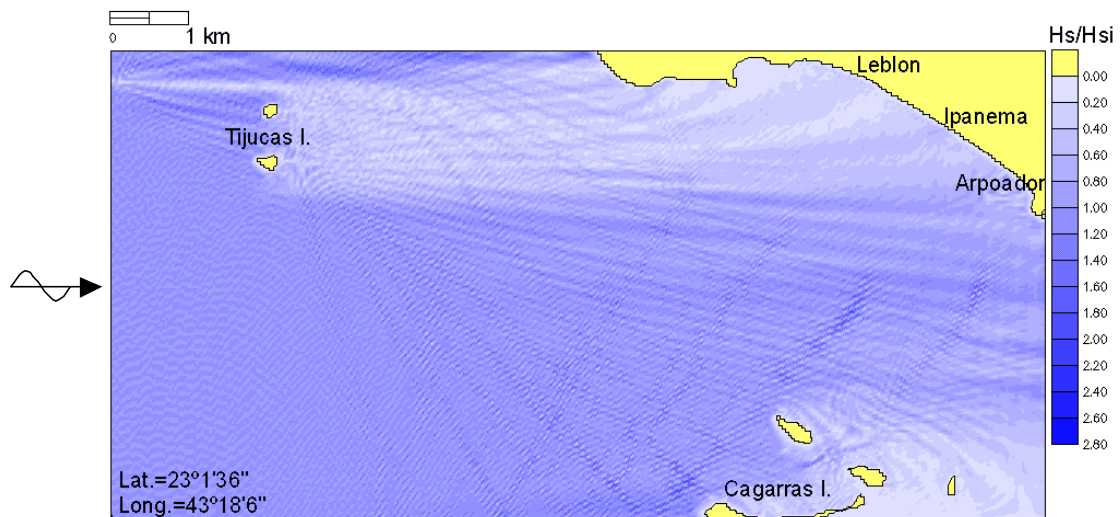


Figura 5 - Factor de amplificação da onda. Onda ao largo: $H_s=1.06\text{m}$; $T=6\text{s}$; $\theta=240^\circ$. Alinhamento horizontal da malha: S-60°-W (240°).

Com base nos resultados obtidos determinou-se o regime de agitação representativo do regime médio anual à profundidade de 10.0 m na zona da embocadura do canal do Jardim de Alah. Este regime, inicialmente composto por vinte e nove ondas monocromáticas, foi representado por um outro regime composto por um conjunto de dez ondas monocromáticas, resultante de um agrupamento de ondas por proximidade de rumos locais (Tabela 3).

4 - Propagação da Agitação Marítima na Zona de Implantação dos Molhes

4.1 - Condições de Agitação e Batimetria

Ao conjunto de dez ondas monocromáticas representativas do regime médio anual local, considerado à profundidade de 10.0 m na zona da embocadura do canal do Jardim de Alah, foram

associadas mais duas ondas (Tabela 3), correspondentes a situações extremas de temporal de Sudeste e Sudoeste (Hogben and Lumb, 1967).

	Hsi (m)	T (s)	$\theta_i(^{\circ})$	Ocorrência %
Regime representativo do regime anual local	0.93	6	126	21.0
	1.74	11	134	4.1
	0.29	7	151	22.7
	0.53	12	163	5.6
	1.10	7	178	24.8
	1.86	13	178	2.8
	1.48	7	200	11.2
	3.51	12	192	1.9
	0.52	7	215	4.7
	2.16	13	197	1.2
Temporais	3.60	11	138	
	5.40	13	193	

Tabela 3 - Condições de agitação incidente na área de implantação dos molhes.

Foi simulada a propagação do conjunto de ondas monocromáticas da Tabela 3 para as duas configurações geométricas em estudo, CG1 e CG2 (Figura 2).

Dada a vasta gama de direcções de onda incidentes foram aplicados cinco domínios numéricos. Foram utilizadas malhas de cálculo cinco vezes mais refinadas do que as malhas utilizadas para a simulação da propagação do regime representativo do regime anual do largo até à embocadura do canal.

O nível do mar considerado nas simulações correspondeu ao nível médio.

4.2 - Resultados

Nas Figuras 6 a 10 apresentam-se os resultados numéricos obtidos para seis das vinte e quatro simulações executadas, expressos em termos do factor de amplificação da onda.

Destacam-se os resultados obtidos para cinco locais do canal definido pelo prolongamento dos molhes: ponto B (boca), ponto M (médio) a 200.0 m do passeio marginal, ponto I (interior) a 100.0 m do passeio marginal, ponto PM (passeio marginal) e ponto CJA (canal do Jardim de Alah). Os três primeiros pontos encontram-se assinalados nas Figuras 6 a 11. O ponto PM localiza-se no enraizamento dos molhes e o ponto CJA localiza-se 30.0 m a montante do passeio marginal.

A percentagem de ocorrência de alturas de onda nos pontos B, M, I e PM, pode ser vista nas Figuras 12 a 15. Para o ponto CJA, os valores máximos de altura de onda que aí ocorrem são pouco significativos: da ordem de 1.1 cm para a CG2 e 3.6 cm para a CG1 (caso de temporal de Sudeste).

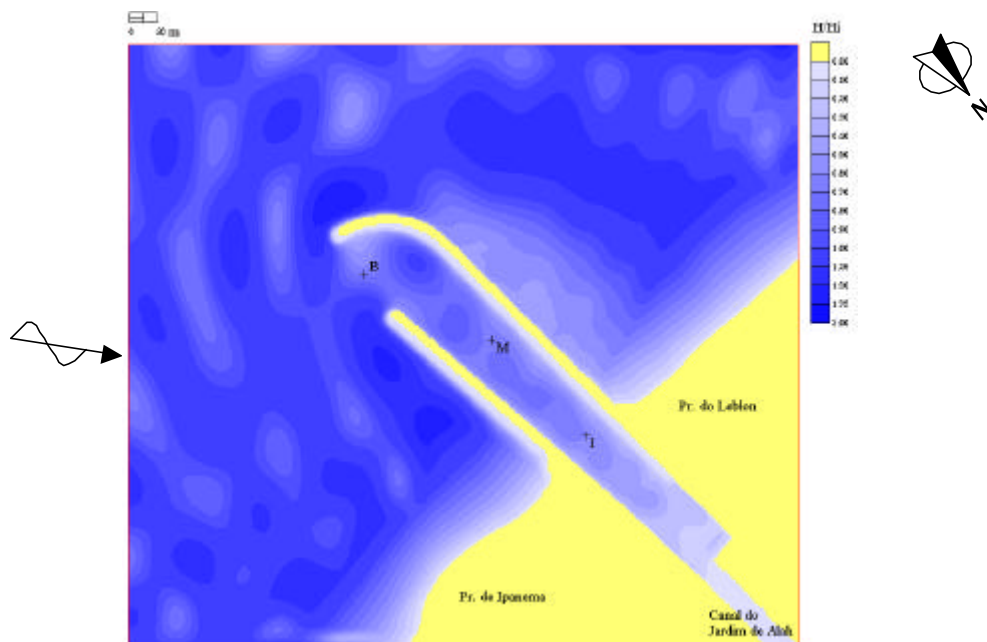


Figura 6 - Factor de amplificação da onda. Simulação: CG1; $H_i=1.74\text{m}$; $T=11\text{s}$; $\theta=134^\circ$.

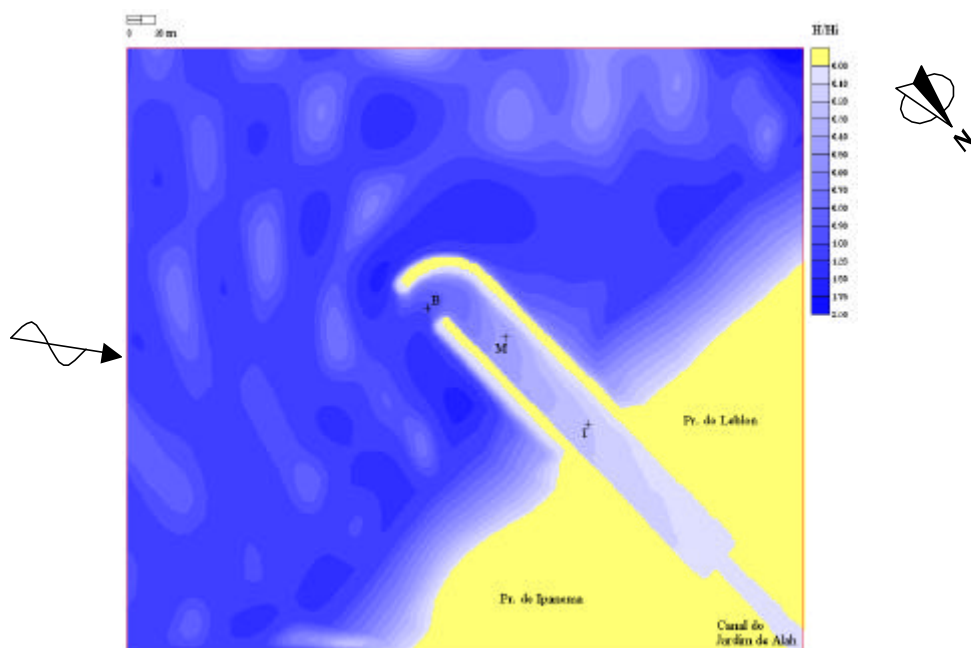


Figura 7 - Factor de amplificação da onda. Simulação: CG2; $H_i=1.74\text{m}$; $T=11\text{s}$; $\theta=134^\circ$.

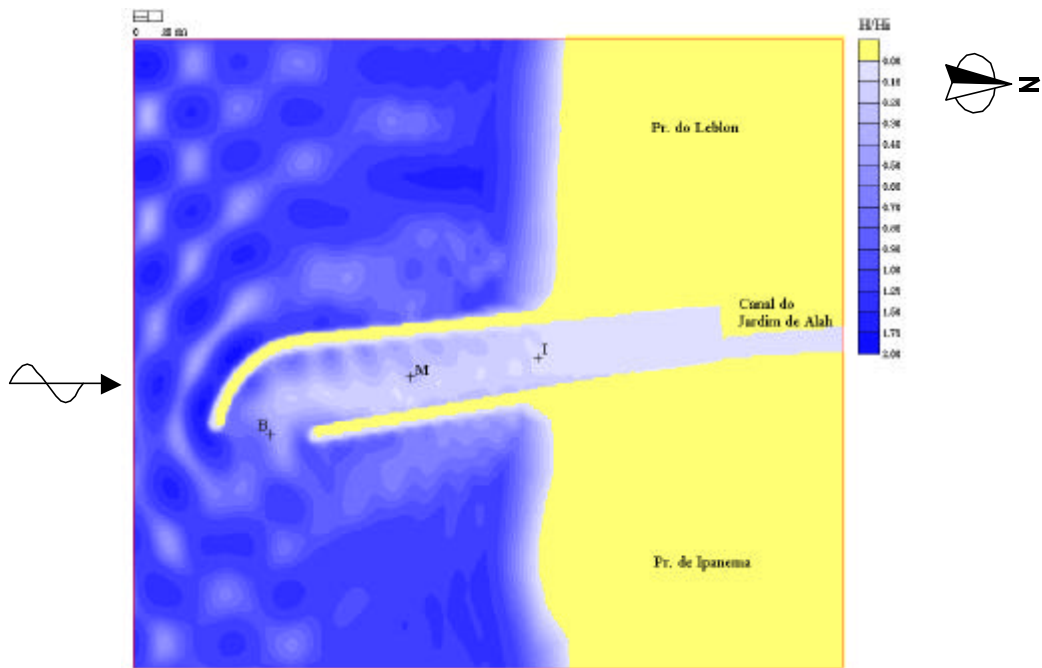


Figura 8 - Factor de amplificação da onda. Simulação: CG1; $H_i=1.10\text{m}$; $T=7\text{s}$; $\theta=178^\circ$.

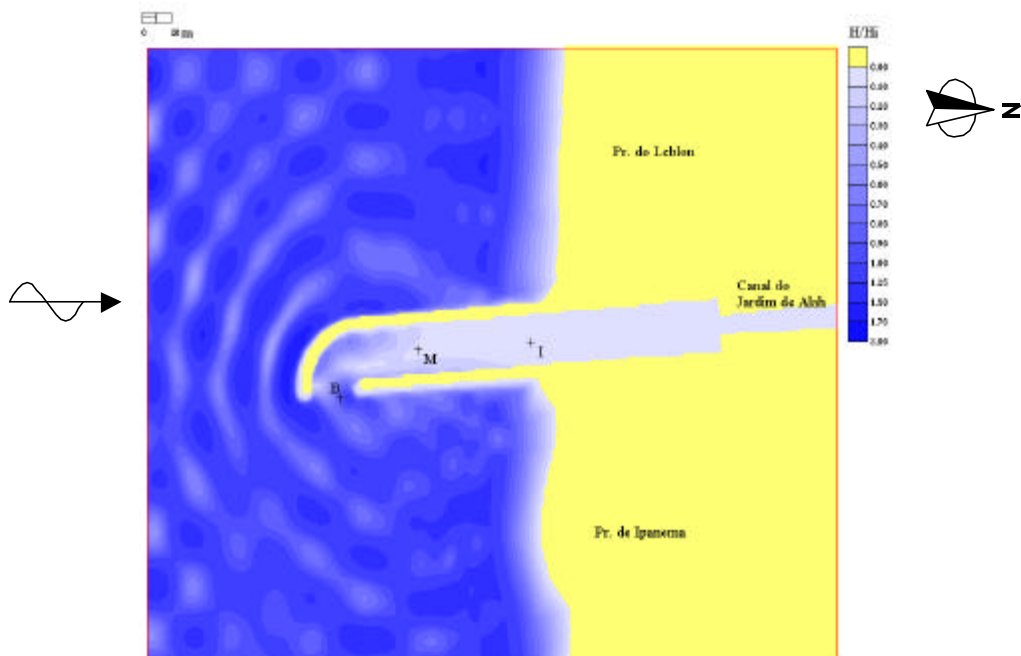


Figura 9 - Factor de amplificação da onda. Simulação: CG2; $H_i=1.10\text{m}$; $T=7\text{s}$; $\theta_i=178^\circ$.

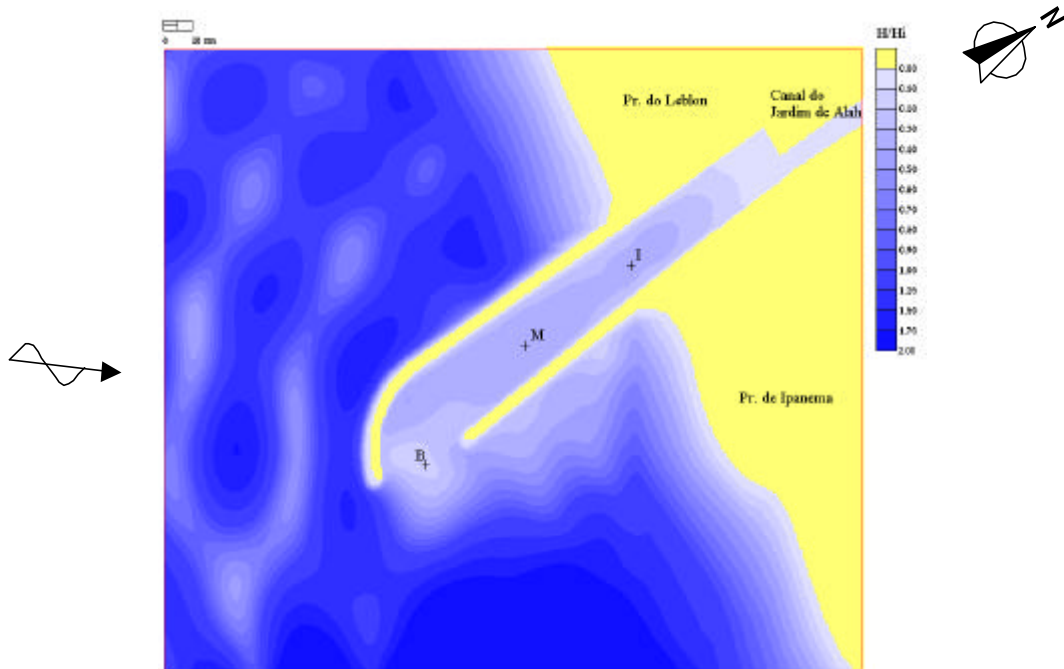


Figura 10 - Factor de amplificação da onda. Simulação: CG1; $H_i=2.16\text{m}$; $T=13$; $\theta_i=197^\circ$.

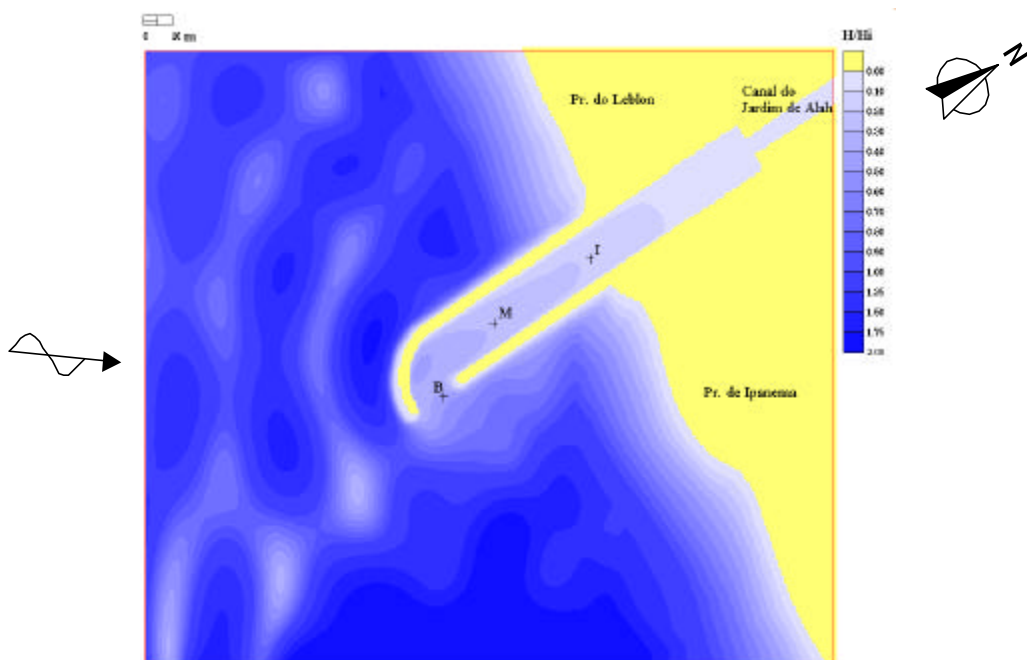


Figura 11 - Factor de amplificação da onda. Simulação: CG2; $H_i=2.16\text{m}$; $T=13$; $\theta_i=197^\circ$.

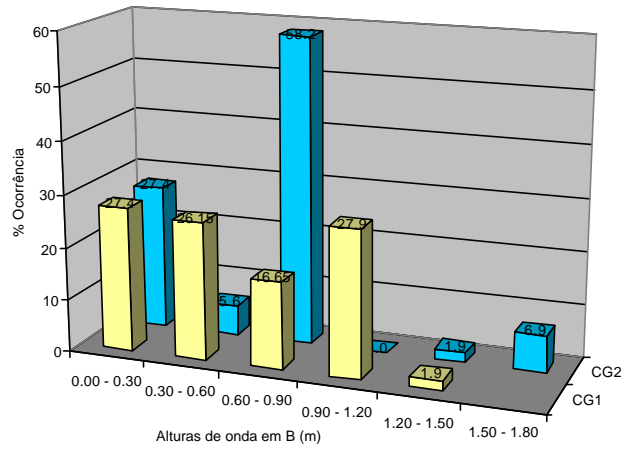


Figura 12 - Ocorrência de alturas de onda no ponto B.

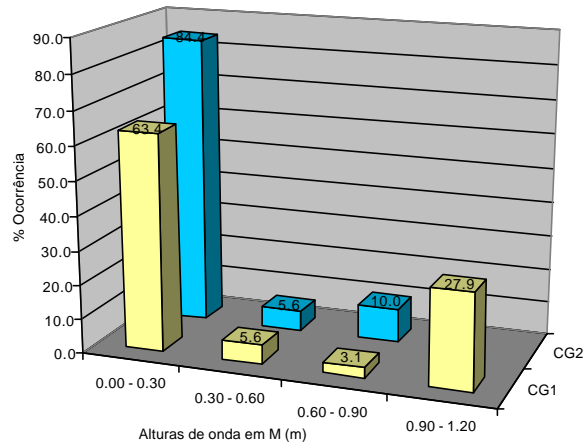


Figura 13 - Ocorrência de alturas de onda no ponto M.

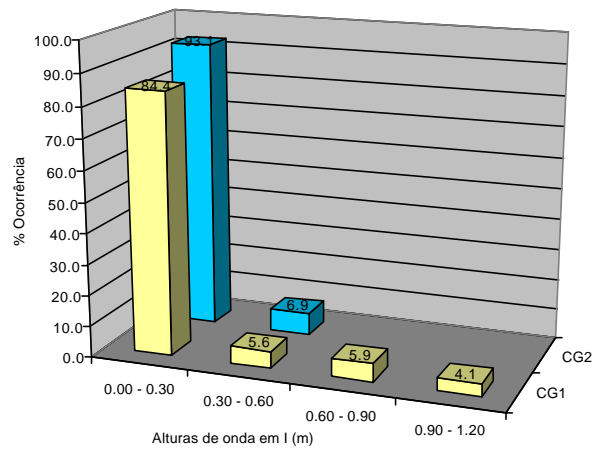


Figura 14 - Ocorrência de alturas de onda no ponto I.

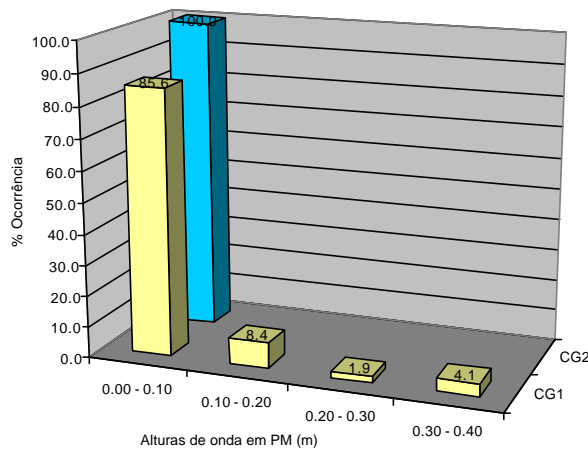


Figura 15 - Ocorrência de alturas de onda no ponto PM.

Da análise dos resultados obtidos nos pontos B, M, I, PM e CJA, destacam-se os seguintes comentários:

- No ponto B (boca) a CG2 apresenta uma ocorrência de cerca de 27% de ondas com alturas inferiores a 0.30 m, cerca de 58% de ondas com alturas entre 0.60 e 0.90 m e cerca de 7% de ondas com alturas mais elevadas, entre 1.50 e 1.80 m. A CG1 proporciona a ocorrência de alturas de onda com uma distribuição relativamente uniforme, com valores até 1.20 m;
- No ponto M (médio) a CG2 apresenta cerca de 84% de ondas com altura inferior a 0.30 m e não se observam ondas com alturas superiores a 0.90 m. A CG1 apresenta cerca de 28% de ocorrência de alturas de ondas ente 0.90 e 1.20 m;
- No ponto I (interior) a CG2 não proporciona a ocorrência de alturas de onda superiores a 0.60 m, sendo cerca de 93% inferiores a 0.30 m. A CG1 apresenta 10% de ondas entre os 0.60 e 1.20 m;
- No ponto PM (passeio marginal) a CG2 é bastante favorável, não apresentando alturas de onda superiores a 0.10 m. A CG1 proporciona a ocorrência de ondas até aos 0.40 m, sendo ainda cerca de 4% entre os 0.30 e 0.40 m;
- No ponto CJA (canal do Jardim de Alah) não se verifica agitação significativa em qualquer das configurações.

5 - Transporte de sedimentos

5.1 - Condições de Hidrodinâmica e Sedimentares

Com base nas características apresentadas nos pontos B, M e I, pelas ondas representativas do regime médio anual, e nos níveis e correntes de enchente e de vazante correspondentes a uma situação de maré viva média, foi simulado o transporte de areias em suspensão e por arrastamento nas secções correspondentes aos pontos B, M e I, identificados no capítulo anterior.

Os valores de níveis e correntes usados no cálculo do transporte de areias no canal definido pelos molhes foram fornecidos por um modelo numérico de hidrodinâmica, forçado unicamente pelas marés astronômicas, dado que as marés meteorológicas geram correntes desprezáveis neste canal, devido ao seu longo período. Os valores utilizados correspondem às condições de maré viva média e a afluências médias de caudais de água doce à lagoa Rodrigo de Freitas.

Através da recolha de dados de campo foi possível fazer a caracterização granulométrica necessária à aplicação do modelo matemático. Os parâmetros determinados encontram-se nas Tabelas 4 e 5, juntamente com os dados de hidrodinâmica para as três secções, B, M e I, de cada uma das configurações geométricas.

Secções	Declive do fundo	D ₅₀ (mm)	Coeficiente de dispersão granulométrica	Enchente				Vazante			
				Veloc. média (m/s)	Duração (s)	Profundidade (m)	Largura média da secção (m)	Veloc. média (m/s)	Duração (s)	Profundidade (m)	Largura da secção (m)
B	0.00	0.22	1.63	0.03	17400	9.48	33.73	0.02	27000	8.73	32.61
M	0.05	0.28	1.65	0.07	17400	3.89	35.33	0.06	27000	3.15	34.27
I	0.00	0.33	1.62	0.18	17400	1.69	31.29	0.24	27000	0.97	30.33

Tabela 4 - Parâmetros de correntes de maré e de sedimentologia. CG1.

Secções	Declive do fundo	D ₅₀ (mm)	Coeficiente de dispersão granulométrica	Enchente				Vazante			
				Veloc. média (m/s)	Duração (s)	Profundidade (m)	Largura média da secção (m)	Veloc. média (m/s)	Duração (s)	Profundidade (m)	Largura da secção (m)
B	0.00	0.24	1.51	0.09	19800	6.85	10.30	0.09	24600	6.10	9.18
M	0.05	0.28	1.65	0.08	19800	3.87	21.96	0.09	24600	3.17	21.03
I	0.00	0.33	1.62	0.17	19200	1.63	24.84	0.24	25200	1.04	24.06

Tabela 5 - Parâmetros de correntes de maré e de sedimentologia. CG2.

5.2 - Resultados

Foi aplicado o módulo STP do modelo LITPACK para determinação das taxas de transporte em suspensão, por arrastamento e total, por segundo e por metro de largura nas secções B, M e I, por efeito da acção conjunta das ondas e correntes de maré descritas na secção anterior deste capítulo. Com base nestes resultados foi determinado o transporte anual em suspensão, por arrastamento e total, nas secções B, M e I. Os resultados obtidos para as três secções de cada uma das configurações geométricas dos molhes de prolongamento do canal encontram-se representados nas Tabelas 6 a 11, sendo os valores positivos correspondentes a transportes dirigidos para o interior do canal.

Ondas				Transportes (m ³ /ano)						
Hs (m)	Ts (s)	Rumo (°)	Freq. (%)	Enchente			Vazante			Total
				Susp.	Arrast.	S+A	Susp.	Arrast.	S+A	
1.04	6	128	21.0	45	15	59	33	8	41	100
1.20	11	128	4.1	44	10	54	39	7	46	100
0.23	7	134	22.7	0	0	0	0	0	0	0
0.46	12	134	5.7	10	1	11	-10	0	-11	1
0.57	7	147	24.8	40	4	44	-41	-1	-42	3
1.02	13	124	2.8	16	4	20	16	3	19	39
1.40	12	144	11.2	145	28	173	152	20	172	346
0.32	13	161	1.9	0	0	0	0	0	0	0
0.81	7	163	4.7	9	2	11	-8	0	-7	4
0.30	7	172	1.2	0	0	0	0	0	0	0
Totais				310	64	374	182	37	219	593

Tabela 6 - Transporte anual em suspensão, por arrastamento e total na secção B da CG1.

Ondas				Transportes (m3/ano)						
Hs (m)	Ts (s)	Rumo (°)	Freq. (%)	Enchente			Vazante			Total
				Susp.	Arrast.	S+A	Susp.	Arrast.	S+A	
0.73	6	137	21.0	263	13	276	-31	-16	-47	229
1.67	11	160	4.1	26	7	32	-6	-6	-11	21
0.18	7	122	22.7	0	0	0	0	0	0	0
0.33	12	114	5.7	2	1	3	-6	-1	-7	-4
0.76	7	136	24.8	44	0	44	-20	0	-20	24
1.51	13	117	2.8	41	7	48	-1	-4	-5	44
1.30	12	100	11.2	119	27	146	-16	-17	-33	112
0.86	13	96	1.9	6	3	9	-3	-3	-7	3
0.74	7	120	4.7	9	4	13	-4	-5	-9	4
0.26	7	140	1.2	0	0	0	0	0	0	0
Totais				510	62	572	-86	-52	-138	434

Tabela 7 - Transporte anual em suspensão, por arrastamento e total na secção B da CG2.

Ondas				Transportes (m3/ano)						
Hs (m)	Ts (s)	Rumo (°)	Freq. (%)	Enchente			Vazante			Total
				Susp.	Arrast.	S+A	Susp.	Arrast.	S+A	
0.13	6	145	21.0	0	0	0	0	0	0	0
1.20	11	168	4.1	308	72	379	113	-12	101	480
0.06	7	153	22.7	0	0	0	0	0	0	0
0.31	12	176	5.7	32	11	42	-44	-4	-48	-6
0.28	7	183	24.8	71	31	102	-132	-12	-144	-42
0.97	13	174	2.8	131	43	174	36	-7	29	203
0.81	12	171	11.2	225	105	330	88	-14	74	404
0.82	13	163	1.9	47	19	65	13	-3	10	75
0.19	7	157	4.7	0	1	1	0	-1	-1	0
0.04	7	190	1.2	0	0	0	0	0	0	0
Totais				813	281	1094	74	-53	21	1115

Tabela 8 - Transporte anual em suspensão, por arrastamento e total na secção M da CG1.

Ondas				Transportes (m3/ano)						
Hs (m)	Ts (s)	Rumo (°)	Freq. (%)	Enchente			Vazante			Total
				Susp.	Arrast.	S+A	Susp.	Arrast.	S+A	
0.25	6	132	21.0	11	7	18	-58	-12	-71	-53
0.84	11	155	4.1	89	33	123	-16	-15	-31	91
0.06	7	192	22.7	0	0	0	0	0	0	0
0.22	12	175	5.7	0	2	2	0	-2	-2	0
0.10	7	213	24.8	0	0	0	0	0	0	0
0.67	13	171	2.8	31	18	49	-15	-11	-26	23
0.77	12	170	11.2	146	84	230	-58	-46	-104	127
0.63	13	164	1.9	17	11	28	-9	-7	-17	11
0.09	7	225	4.7	0	0	0	0	0	0	0
0.02	7	159	1.2	0	0	0	0	0	0	0
Totais				294	156	451	-157	-95	-251	199

Tabela 9 - Transporte anual em suspensão, por arrastamento e total na secção M da CG2.

Ondas				Transportes (m3/ano)						
Hs (m)	Ts (s)	Rumo (°)	Freq. (%)	Enchente			Vazante			Total
				Susp.	Arrast.	S+A	Susp.	Arrast.	S+A	
0.08	6	159	21.0	0	6	6	-2	-98	-100	-94
1.08	11	168	4.1	577	113	689	-2914	-835	-3748	-3059
0.03	7	178	22.7	0	0	0	0	-17	-17	-17
0.27	12	171	5.7	107	57	164	-255	-279	-534	-370
0.09	7	201	24.8	0	9	9	-4	-123	-127	-118
0.87	13	177	2.8	371	80	451	-1233	-432	-1665	-1214
0.70	12	167	11.2	961	259	1220	-3741	-1325	-5065	-3846
0.76	13	163	1.9	203	48	251	-625	-248	-873	-622
0.16	7	179	4.7	4	13	17	-108	-92	-200	-183
0.03	7	180	1.2	0	0	0	0	-1	-1	-1
Totais				2222	584	2807	-8882	-3448	-12330	-9524

Tabela 10 - Transporte anual em suspensão, por arrastamento e total na secção I da CG1.

Ondas				Transportes (m3/ano)						
Hs (m)	Ts (s)	Rumo (°)	Freq. (%)	Enchente			Vazante			Total
				Susp.	Arrast.	S+A	Susp.	Arrast.	S+A	
0.05	6	182	21.0	0	1	1	0	-29	-29	-29
0.42	11	182	4.1	99	63	162	-435	-227	-662	-500
0.02	7	186	22.7	0	0	0	0	-2	-2	-2
0.13	12	168	5.7	0	6	6	-15	-45	-60	-55
0.04	7	162	24.8	0	0	0	0	0	0	0
0.43	13	170	2.8	76	44	120	-339	-163	-502	-381
0.60	12	166	11.2	584	203	787	-2071	-807	-2879	-2092
0.39	13	165	1.9	44	28	72	-196	-101	-297	-225
0.04	7	184	4.7	0	0	0	0	-4	-4	-4
0.03	7	204	1.2	0	0	0	0	-1	-1	-1
Totais				804	344	1148	-3057	-1379	-4436	-3288

Tabela 11 - Transporte anual em suspensão, por arrastamento e total na secção I da CG2.

6 - Conclusões

O estudo descrito teve como objectivo fazer uma análise comparativa de duas configurações geométricas dos molhes de prolongamento do canal do Jardim de Alah que estabelece a ligação entre a lagoa Rodrigo de Freitas e o mar. O critério de comparação foi baseado em dois aspectos funcionais do canal definido pelos molhes: condições de abrigo contra a agitação marítima, para evitar a ocorrência de impactes significativos sobre o paramento do passeio marginal, e capacidade de automanutenção de fundos, para evitar penetração e acumulação de areias.

A análise das características da agitação marítima para as duas configurações geométricas em estudo na zona de implementação dos molhes permitiu obter as seguintes conclusões:

- Existem áreas de sombra, resultado do efeito de difracção, na zona exterior Este dos molhes (praia de Ipanema), quando as ondas incidentes têm rumos locais de Sudoeste, o que corresponde a 19% de ocorrência, e na zona exterior Oeste dos molhes (praia do Leblon) quando as ondas incidentes têm rumos locais de Sudeste, o que corresponde a 81% de ocorrência;
- A extensão da área de sombra aumenta com o aumento de amplitude do ângulo da onda incidente relativamente à direcção de alinhamento dos molhes. As ondas incidentes que geram áreas de sombra com maior extensão na praia do Leblon são as incidentes com

direcção E - 36° - S (126°). As ondas incidentes que geram áreas de sombra com maior extensão na praia de Ipanema são as incidentes com direcção S - 35° - W (215°);

- Para cada caso de onda incidente a extensão da área de sombra é sempre maior para a CG1 do que para a CG2. Isto verifica-se porque os molhes propostos na CG1 são mais compridos, isto é, prolongam-se até maiores profundidades, do que os molhes propostos na CG2;
- A CG2 proporciona valores mais baixos do factor de amplificação de onda na embocadura (zona entre os molhes) do que a CG1 para todas as simulações executadas, mesmo nos casos de ondas cuja direcção incidente permite uma penetração directa entre os molhes;
- A CG2 é bastante eficaz na redução da altura de onda principalmente para as ondas mais longas (de maior período) associadas a alturas de onda mais elevadas, quando comparada com a CG1;
- Na zona entre os extremos dos molhes (boca) ocorrem elevados gradientes de altura de onda, ou seja, variações bruscas da altura num pequeno espaço (cerca de 60.0 e 30.0 m entre coroamentos, para a CG1 e CG2, respectivamente). É uma zona onde ocorrem concentrações de energia cujo foco varia espacialmente consoante as características da onda incidente. Observam-se características típicas do processo de difracção de ondas na presença de obstáculos;
- Para a CG2 e para um regime médio anual, a uma distância de 200.0 m do passeio marginal, entre os molhes, 85% das alturas de onda ocorrentes são inferiores a 0.30 m, e 15% estão entre 0.30 e 0.90 m;
- Para a CG2 e para um regime médio anual, a uma distância de 100.0 m do passeio marginal, entre os molhes, 93% das alturas de onda ocorrentes são inferiores a 0.30 m, e 7% estão entre 0.30 e 0.60 m;
- Para a CG2 e para um regime médio anual, 100% das alturas de onda ocorrentes junto ao passeio marginal têm altura inferior a 0.30 m;
- Para a CG2 e para um regime médio anual, o valor das alturas de onda ocorrentes no canal do jardim de Alah é insignificativo (inferior a 1 centímetro).

A análise do transporte de areias em suspensão e arrastamento para as duas configurações geométricas em estudo na zona de implementação dos molhes, permitiu obter as seguintes conclusões:

- Em ambas as configurações as fracções de transporte em suspensão predominam sobre as de arrastamento, nas três secções consideradas e tanto na enchente como na vazante;
- A movimentação de areias no canal definido pelos molhes é diminuta em ambas as configurações, correspondendo a uma penetração de pequeno volume na boca e na secção média e a uma expulsão de valor um pouco mais elevado na secção interior.
- A CG2 é um pouco mais favorável pois apresenta volumes anuais de penetração de areias mais reduzidos.

Este estudo permitiu concluir que a configuração geométrica 2 é mais vantajosa do que a configuração geométrica 1, não só em termos funcionais, porque proporciona maior abrigo contra a agitação marítima e menor penetração e acumulação de areias na zona entre os molhes, mas também em termos económicos (economia de obra), uma vez que o encurtamento dos molhes pode ser realizado sem prejuízo da eficácia do seu funcionamento no que respeita à garantia de abrigo interior e automanutenção de fundos.

Agradecimentos: os autores agradecem à Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro, Brasil, a autorização concedida para publicação dos resultados deste estudo, e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia o financiamento concedido no âmbito do projecto de investigação PRAXIS/C/ECM/12100/1998 para disseminação destes resultados.

Referências

Berkhoff, J. C. W., 1972. Computation of combined refraction–diffraction. *Proc. 13th ICCE, Vancouver, ASCE*, 471 – 490.

DHI, 2000. LITPACK, DHI Software - User guide. DHI, Denmark.

Oliveira, F. S. B. F., 1993. *Waves in harbours*, M.Sc. Dissertation. Imperial College of Science Technology and Medicine, University of London, UK.

Oliveira, F. S. B. F., 1997. *Numerical modelling of irregular wave propagation in the nearshore region*, Ph.D. Dissertation. Imperial College of Science Technology and Medicine, University of London, UK.