

CARACTERIZAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA DAS ONDAS DE AREIA DO CANAL DE ACESSO DO COMPLEXO PORTUÁRIO DO MARANHÃO

Rogério Fernando do Amaral¹; Paolo Alfredini²; Odair J. Souza³.

¹ Aluno de Mestrado em Engenharia Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
e-mail: rogerio.amaral@poli.usp.br

² Professor Livre-Docente da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
e-mail: alfredin@usp.br, paolo.alfredini@poli.usp.br

³ Professor da Universidade Presbiteriana Mackenzie de São Paulo

RESUMO

Descreve-se a caracterização hidrossedimentológica da área de influência do Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão. Esta região tem como peculiaridade a formação de ondas de areia, que causam embaraços à navegação, na medida em que reduzem a profundidade. Sendo o Canal de Acesso operado por navios de classe ULOC (Ultra Large Ore Carrier), o gabarito de navegação exige profundidade mínima de 24 metros. Com a caracterização da área pretende-se fornecer subsídios à Engenharia Portuária, possibilitando o planejamento de dragagens eficientes, tornando-se conhecida a periodicidade necessária para a mesma.

ABSTRACT

It is described the hydrossedimentological features of the Navigation Channel of the Harbour Complex of Maranhão. This region has the sand wave formation as the main problem for the navigation, reducing the effective depth. This Navigation Channel enables the access of ULOC (Ultra Large Ore Carrier), being necessary a minimum depth of 24 m. The purpose of describing the behavior of this channel is to get informations for the Port Engineering about an improvement of the dredging planning, giving a knowledge about its periodicity.

Palavras-Chave: ondas de areia; dragagem; engenharia portuária.

1. INTRODUÇÃO

A Área Portuária do Maranhão constitui-se no segundo maior complexo portuário do Brasil e um dos maiores do mundo em termos de movimentação de carga, com mais de 60 milhões de toneladas movimentadas em 2002, isto é mais de 10% da movimentação portuária anual do país. Situada na costa ocidental da Ilha de São Luís, na Baía de São Marcos, esta área portuária abrange o Complexo Portuário de Ponta da Madeira, da CVRD - Companhia Vale do Rio Doce S. A., o Porto de Itaqui, da EMAP – Empresa Maranhense de Administração Portuária e o Porto da ALUMAR. Em termos do potencial logístico do transporte aquaviário brasileiro esta região constituir-se-á em cerca de dez anos no principal pólo portuário brasileiro em movimentação de cargas, em função dos projetos previstos para a área. Localiza-se próximo dos grandes mercados consumidores, como: Estados Unidos, Europa e Ásia através do Canal do Panamá. Constitui-se em escoadouro natural de ampla região geoeconômica, que é a Amazônia Legal Oriental (ver Figura 1), sendo as principais cargas movimentadas os minérios de ferro e manganês, provenientes da Província Mineral de Carajás (PA), ferro gusa, alumina e alumínio, resultado do beneficiamento da bauxita provinda do Rio Trombetas (PA), grãos e granéis líquidos. Nos próximos anos estão previstos projetos de aumento de berços de atracação e áreas retroportuárias para o embarque de concentrado de cobre da Província Mineral de Carajás, importação de carvão para usinas termelétricas e siderúrgicas, embarque de produtos siderúrgicos e maior movimentação de containeres.



Figura 1: Localização da área de estudo.

O Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – LHEPUSP – tem uma longa história de 25 anos de parceria tecnológica com a Companhia Vale do Rio Doce S. A. no estudo do Complexo Portuário de Ponta da Madeira, contando com modelo físico de 1500 m² de área, bem como dos Portos de Itaqui e ALUMAR. O acervo técnico do laboratório é o mais completo da área e abrange levantamentos hidrográficos de sondagens batimétricas, correntometrias e de trajetórias de derivadores, sedimentologia e dados de dragagens efetuadas na área nos últimos trinta anos, acompanhando a implantação dos projetos portuários de Ponta da Madeira, Itaqui e ALUMAR.

Ondas de areia são uma classe de conformação de fundo compostas predominantemente de solo não coesivo, em

forma de onda dos sedimentos transportados, conforme pode ser visto na Figura 2, notando-se a formação de cristas (regiões escuras) e cavados (regiões claras). Trata-se de mega enrugamentos que se formam onde a água tem profundidade suficiente e o aporte de areia é abundante com velocidades do escoamento relativamente fortes, geralmente desenvolvidas por correntes de maré. Estas formações têm comprimentos superiores a 10 m, podendo chegar a centenas de metros, e alturas acima de 0,75 m.

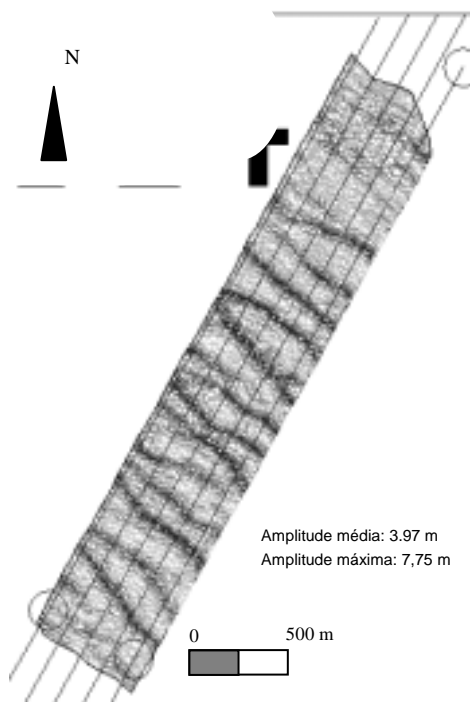


Figura 2: Superfície criada a partir da batimetria da Área IV, no período de outubro de 1998, do Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão.

Poucas áreas do mundo apresentam os requisitos necessários para a formação de ondas de areia, conforme pode ser visto na Figura 3. Nota-se o caso do Canal de Bisanseto (Japão), região próxima a Kobe, onde o desenvolvimento dessas ondas limita a profundidade do canal (KATOH et alli, 1998; KNAAPEN et alli, 2002). Durante o período de 1981 até 1983 foram dragados cerca de 2,2 milhões de m³, mas em apenas 10 anos desenvolveram-se ao mesmo patamar de 1981.

No Estreito de Messina (Itália), localizado entre a Sicília e a Calábria, estão assentadas no fundo do mar diversas tubulações e cabos, que não foram dimensionados considerando a sobrecarga de uma onda de areia, o que tem sido estudado pela Universidade de Catania (SANTORO et alli, 2002).

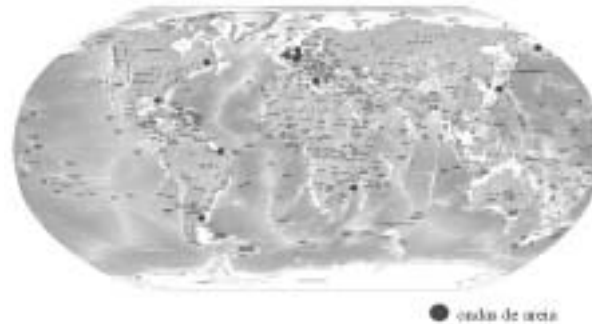


Figura 3: Localização de incidência de ondas de areia nas áreas marítimas.

Já no Complexo Portuário do Maranhão, aonde o canal de acesso é praticado por navios da classe ULOC (Ultra Large Ore Carrier), com portes brutos superiores a 250.000 TPB, exigindo profundidades mínimas de 24 m, a formação de ondas de areia é motivo de grande preocupação. Torna-se assim necessário um constante acompanhamento da região e, quando necessário, a atuação de uma dragagem de manutenção. Estas apresentam pouco rendimento, pois parte do tempo a boca de dragagem está sobre uma crista, dragando efetivamente, mas parte do tempo atua sobre um cavado, operando em vazio. Portanto, torna-se necessário conhecer e prever o comportamento hidráulico e morfológico do transporte de sedimentos dessas áreas peculiares.

Assim, é de grande importância a existência de estudos que caracterizem a circulação das correntes de maré e do transporte de sedimentos associados ao Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão. Estes estudos incluem, fundamentalmente, o estudo das marés e correntes associadas, principais agentes do transporte de areias que modelam os fundos da Baía de São Marcos. Em última análise, é imprescindível que se tenha uma metodologia confiável para a análise da evolução morfológica, tendo em vista o planejamento de dragagens com maior eficiência.

2 LOCALIZAÇÃO

O Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão desenvolve-se em sua maior extensão na sub-área oceânica da Plataforma Continental do Maranhão (Golfo Maranhense), sendo o restante situado na própria Baía de São Marcos (ver Figura 1). Ao largo da costa do Maranhão, em frente à Baía de São Marcos, observa-se a formação de bancos de areia margeando o Canal de Acesso, tendo sido por consequência necessário balizar o canal em seus cerca de 100 km a partir da Ponta da Madeira. O Canal apresenta quatro áreas especiais denominadas Área I, Área II, Área III e Área IV, no sentido sudoeste-nordeste respectivamente, conforme Figura 4. Essas áreas apresentam a formação de ondas de areia.

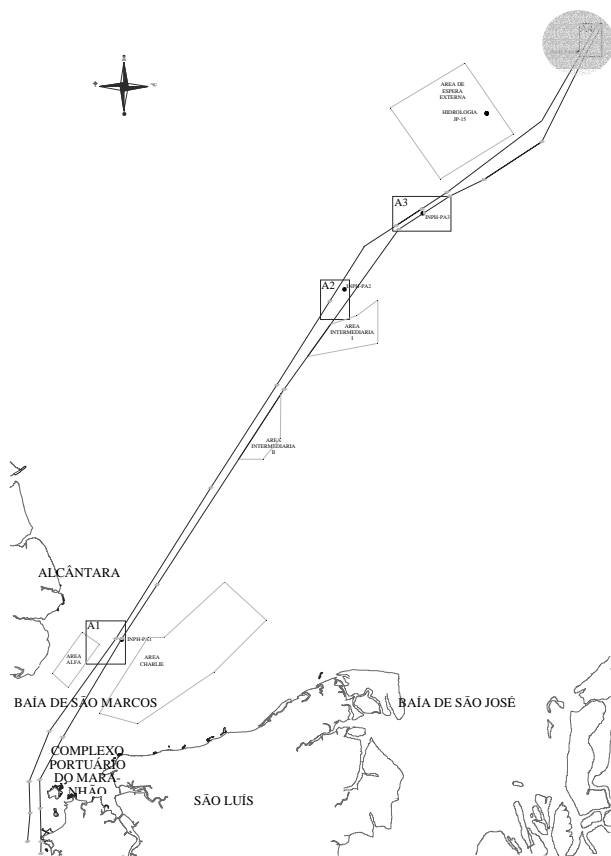


Figura 4: Canal de Acesso, com as áreas especiais (AI, AII, AIII e AIV), detalhe para a AIV sombreada.

3. SEDIMENTOS

O sedimento encontrado na região é classificado como areia fina, trata-se de um solo não coesivo com diâmetro do grão na faixa de 0,125 ~ 0,25 mm. A areia fina é arrastada do fundo com velocidades médias a partir de 0,2 m/s e é transportada com velocidades na faixa de 0,1 à 0,2 m/s, sendo que abaixo de 0,1 m/s ocorre a sedimentação.

4. MARÉS

A maré na Baía de São Marcos é semidiurna, podendo chegar a 7 m de amplitude na região interna (CVRD, 1993). Ao longo do Canal de Acesso as marés variam de fase e de amplitude. Na entrada do Canal de Acesso a maré é adiantada em 75 minutos e com amplitude de 60% da observada na região interna (podendo chegar a 4,2m), conforme nota constante da Carta Náutica n° 410 da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil.

5. CORRENTES

A circulação das águas no Golfão Maranhense é governada pelas variações de maré. Os ventos predominantes, de média intensidade, apenas contribuem para provocar pequenos desvios na circulação produzida pelas marés.

Os valores mínimos das correntes ocorrem próximo às estofas e as máximas ocorrem 3 a 4 horas após a

preamar nas vazantes e de 2 a 3 horas após a baixamar nas enchentes.

No Canal de Acesso as correntes apresentam as direções 40 – 220° a 60 – 240°, podendo atingir a velocidade 2,5 nós.

Na Figura 5 apresenta-se a rosa de correntes do levantamento realizado no Ponto A4 (coordenadas: latitude 1° 48' 33" S e longitude 43° 51' 57" W), localizado nas proximidades da área IV, no período de abril de 1991.

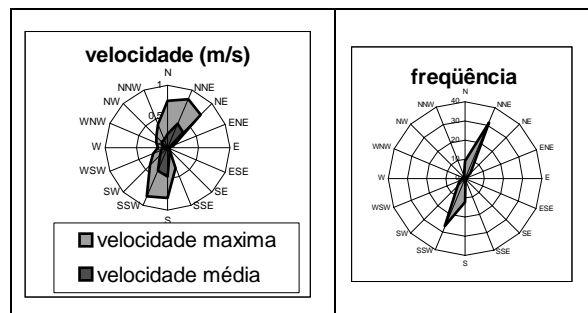


Figura 5: Levantamento das velocidades (m/s) no Ponto A4 (20 metros do fundo) dos dias 05 a 26 de abril de 1991.

6. MAPEAMENTO DAS FORMAÇÕES DE ONDAS DE AREIA

Foram analisados dois períodos distintos de levantamentos batimétricos. O primeiro compreendido entre julho de 1989 a maio de 1992, período na qual procedia-se a dragagens periódicas de manutenção do canal. O segundo período, que é compreendido entre abril de 1997 a 2003, corresponde a um período sem dragagens.

Para o primeiro período, 1989/1992, é apresentada a Tabela 1, com as características médias das dragagens efetuadas para a área IV (FCTH, 1995).

Tabela 1: Características médias das dragagens efetuadas na área IV.

Dragagens	Δt	Bat	Características das ondas	Mé-dia*	D.P.
jul/88 cota 23 m V = 24776 m ³ (11,4 m ³ /m canal)	6 1/2 me- ses	25/8/ 1988	abscissa da posição da crista (m)		
			comprimento da onda (m)	158	52
			cota do cavado (m)	30,5	0,8
			cota da crista (m)	25,1	1,1
			altura da onda (m)	5,7	1,3
	jul/89	06/3/ 1989	abscissa da posição da crista (m)		
			comprimento da onda (m)	158	47
			cota do cavado (m)	30,2	1,3
			cota da crista (m)	24,3	1,6
			altura da onda (m)	6,2	1,7
jul/89 COTA 24 m V = 108705 m ³ (49,9 m ³ /m canal) Fev/91	8 3/4 me- ses	19/7/ 1989	abscissa da posição da crista (m)		
			comprimento da onda (m)	158	48
			cota do cavado (m)	30,9	0,8
			cota da crista (m)	25,7	1,4
			altura da onda (m)	5,7	1,3
	11/4/ 1990	abscissa da posição da crista (m)			
		comprimento da onda (m)	159	50	
		cota do cavado (m)	31,1	0,8	
	10 1/4 me- se s	18/2/ 1991	cota da crista (m)	25,4	2
			altura da onda (m)	6	1,8
			abscissa da posição da crista (m)		
		18/2/ 1991	comprimento da onda (m)	157	46
			cota do cavado (m)	30,9	1,2
			cota da crista (m)	25,3	1
Fev/91 COTA 24 m V = 130585 m ³ (60,0 m ³ /m canal)	14 3/4 me- ses	28/2/ 1991	altura da onda (m)	6,5	1,5
			abscissa da posição da crista (m)		
			comprimento da onda (m)	157	46
			cota do cavado (m)	31,2	1,3
			cota da crista (m)	25,3	1
			altura da onda (m)	6,2	1,1
			19/5/ 1992	abscissa da posição da crista (m)	
comprimento da onda (m)	157	42			
cota do cavado (m)	31,3	1,4			
cota da crista (m)	25,4	1,4			
Mai/92			altura da onda (m)	6,1	1,6

* média das 14 ondas observadas.

Para o segundo período, com o crescimento natural das ondas, procedeu-se à criação das superfícies correspondentes, conforme Figura 2.

Traçaram-se as curvas de isóbatas de 24 metros para a área IV. O resultado pode ser observado respectivamente na Figura 6.



Figura 6: Evolução das curvas de isóbatas de 24 metros.

Para cada área peculiar foram estabelecidos três alinhamentos, na direção do canal e iniciando-se ao sul, para o levantamento batimétrico longitudinal do canal. Para a área IV o alinhamento foi: linha 1, ponto inicial (E626503, N9799500); linha 2, ponto inicial (E626650, N9799500) e linha 3, ponto inicial (E626798, N 9799500).

Aproximando-se da crista da terceira onda, do alinhamento da linha 1 da área IV, pode-se notar que a migração dessa onda oscilou cerca de 20 metros em quase 5 anos sem tendência definida, conforme pode ser visto na Figura 7.

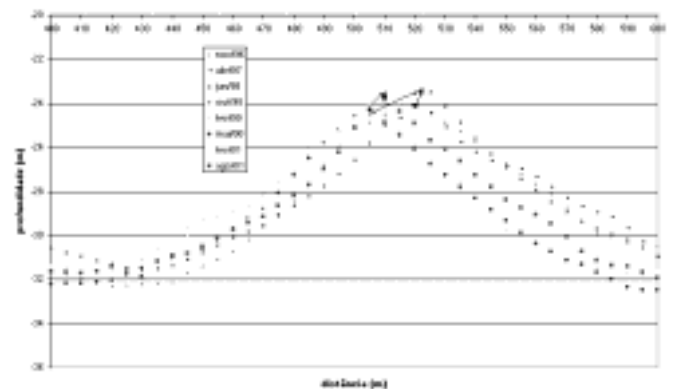


Figura 7: Migração da terceira onda da área IV.

7. APLICAÇÃO DE FORMULAÇÕES CONHECIDAS NA ÁREA IV

Flemming (2000), com base em 1491 conjuntos de dados, definiu a seguinte regressão:

$$H = 0,0677 \cdot L^{0,8098}$$

onde: H é a altura da onda e L é o comprimento de onda.

Aplicada na área IV para o primeiro período analisado forneceu os resultados da Tabela 2:

Tabela 2: Comparação da altura estimada com valores médios observados no período de 1989 a 1992.

Onda	H (m) Médio Observado	L(m) Médio Observado	H (m) (estimado por Flemming)
1	5,85	245	5,83
2	5,97	116	3,18
3	5,37	142	3,75
4	6,20	223	5,40
5	4,97	110	3,05
6	7,03	141	3,72
7	5,30	95	2,70
8	5,22	196	4,86
9	6,30	177	4,48
10	6,94	167	4,27

A fórmula empírica de Haque e Mahmood (LEVIN et alli, 1992) foi proposta em 1985, apresentando para ondas de areia uma relação da altura em função do comprimento e dependendo da profundidade.

$$\frac{a}{L} = 0,4(m)^{-1,178(1-e^{-\frac{2,5D}{L}})}$$

onde: a é altura da onda; L é o comprimento de onda; m é um adimensional que descreve o escoamento num plano (2,5 ~ 6); D é a profundidade.

A aplicação da fórmula de Haque e Mahmood, para o adimensional m com valor de 4, forneceu os resultados da Tabela 3:

Tabela 6: Comparação da altura estimada com valores médios observados no período de 1989 a 1992, na região da área IV.

Onda	H (m) médio observado	L(m) médio observado	m	D(m)	H(m) (estimado)
1	5,85	245	4	28,78	4,24
2	5,97	116	4	27,33	6,28
3	5,37	142	4	27,75	5,44
4	6,20	223	4	28,08	4,25
5	4,97	110	4	27,13	6,50
6	7,03	141	4	27,08	5,24
7	5,30	95	4	27,63	7,79
8	5,22	196	4	28,73	4,66
9	6,30	177	4	26,60	4,37
10	6,94	167	4	27,36	4,74

8. CONCLUSÕES

Poucas localidades do mundo apresentam as condições necessárias para a formação de ondas de areia como a região do Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão, com fortes correntes de maré, sedimento não coesivo e profundidade suficiente. Conforme pode ser visto pela caracterização deste artigo, nesta área reúnem-se todas as condições necessárias para o aparecimento de ondas de areia.

Os métodos empíricos propostos para estimar a altura das ondas mostram-se um pouco distantes da realidade, pois aparentemente apenas o parâmetro de comprimento de onda não é suficiente para prever a altura da onda. A fórmula Haque e Mahmood exige o valor do adimensional m, que, a partir de observações, pode ser calibrado para melhor atender à previsão da altura da região estudada.

As isóbatas levantadas mostraram que as formações de ondas de areia não apresentam significativa mudança de posição com o tempo, o que pode ser interessante para um plano de dragagem, como se observa na Figura 7, que evidencia como a crista da onda não apresenta uma migração definida.

A reduzida migração dessas ondas, principalmente nas áreas III e IV, pode ser resultado da simetria alternativa nas correntes de maré nas respectivas regiões.

Em 2003 a Área de Hidráulica Marítima do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo completa 50 anos de atividades voltados aos recursos do mar e 10 anos de estudos sobre as ondas de areia do Golfão Maranhense.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COMPANHIA VALE DO RIO DOCE S.A.: Terminal Ponta da Madeira, “Informações Portuárias”, São Luís, Maranhão, 1993.
- FLEMMING, B. W.: “The role of grain size, water depth and flow velocity as scaling factors controlling the size of subaqueous dunes.” In: ALAIN TRENTESAUX and T H I E R R Y G A R L A N (eds.), Marine Sand-wave Dynamics, Lille, França, 2000.
- FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA.: “Análise Preliminar dos Dados Existentes, sobre a implantação e manutenção do canal de acesso do TPM”, Volume 1 e Volume 2, São Paulo, Brasil, 1995.
- KATOH, K., KUME, H., KUROKI, K. AND HASEGAWA, J.: “The development of sand waves and the maintenance of navigation channels in the Bisanseto Sea.”. Coastal Engineering, pp 3491-3502, 1998.
- KNAAPEN, M. A. F. AND HULSCHER, S. J. M. H.: “Regeneration of sand waves after dredging”. Journal Coastal Engineering (Elsevier), pp. 277 –289, 2002.
- KNAAPEN, M. A. F.; HULSCHER, S. J. M. H. AND SCHOLL, O.: “Can we predict the growth of sand waves? Hindcast of a field experiment in the Bisanseto Sea, Japan.”. Coastal Engineering, ASCE, Vol. 3, pp. 2661 –22671, 2000.
- LEVIN, D. R., LILLYCROP, W. J.: “Sand Waves – Report 1: Sand Waves Shoaling in Navigation Channels”,

II Congresso sobre Planejamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa
IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário
II Congresso do Quaternário dos Países de Língua Ibéricas

US Army Corps of Engineers, Washington, Estados Unidos, 1992

SANTORO, V. C., AMORE, E., CAVALLARO, L., COZZO, G. AND FOTI, E.: “Sand Waves in the Messina Strait”. *Journal of Coastal Research*, No. 36, pp 640-653, 2002.

Universidade de São Paulo – Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica – “Relatórios e levantamentos hidrográficos referentes aos estudos da Área Portuária do Maranhão”, São Paulo, 1972-2002.