



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Costeiros dos Países de Expressão Portuguesa / XI Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa

27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

PROPAGAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA DO LARGO PARA À COSTA DE MAPUTO: APLICAÇÃO AO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Cristina Nheleti Américo Viola¹, Manel Grifoll², Jaime Palalane³ e Tiago Oliveira⁴

¹ Universidade Eduardo Mondlane – Faculdade de Engenharia; Av. de Moçambique km 1.5, Maputo – Moçambique; e-mail: cristina.nhelete@gmail.com

² Universidade Politécnica da Catalunha – Laboratório de Engenharia Marítima; Carrer Jordi Girona 1-3, 080034 Barcelona – Espanha; manel.grifoll@upc.edu

³ Universidade Eduardo Mondlane – Faculdade de Engenharia; Av. de Moçambique km 1.5, Maputo – Moçambique; jaime.palalane@uem.mz

⁴ Universidade Politécnica da Catalunha – Laboratório de Engenharia Marítima; Carrer Jordi Girona 1-3, 080034 Barcelona – Espanha; tiago.oliveira@upc.edu

Palavras-chave: Costa de Maputo. Agitação Marítima. SWAN. Transporte Longitudinal de Sedimentos.

Tema: Modelação nas Zonas Costeiras (Sub-tema 3)

Tipo de comunicação: Comunicação oral

RESUMO

O propósito deste trabalho é de caracterizar a agitação marítima na região costeira de Maputo. Assim, pretende contribuir para o melhor conhecimento da agitação marítima, um dos principais agentes físicos contribuintes para degradação verificada nesta região.

A caracterização foi feita por meio de propagação da agitação marítima do largo para à costa usando primeiro a Teoria Linear de Propagação de Ondas e posteriormente o modelo SWAN, para uma série de registos de ondas com 13 anos de dados proveniente do modelo numérico *NOAA Wave Watch III* (NOAA).

A Propagação Linear foi feita para a altura morfológica do clima médio de agitação numa região na península Machangulo. As ondas do clima médio e ondas do clima extremo foram também propagadas no modelo SWAN.

Para a propagação com o modelo SWAN, estudaram-se vários cenários afim de apurar a influência nos resultados de parâmetros como o vento, nível de marés, espectro de frequência, e a resolução da malha de cálculo.

Os resultados da Propagação Linear foram a posterior empregues para estimar o transporte longitudinal de sedimentos por ação da agitação marítima, especificamente resultante das correntes paralelas à linha da costa originadas pela rebentação das ondas, para um trecho da península Machangulo pela fórmula de CERC.

Da propagação com o modelo SWAN concluiu-se que as ilhas Inhaca, Xefina, Elefantes e as penínsulas Macaneta e Machangulo existentes na baía de Maputo actuam como protecção natural para a costa, de modo que as alturas significativas das ondas nesta região não superam 1 m.

O cálculo da taxa potencial de transporte longitudinal de sedimentos, indicou que na região em estudo o transporte dá-se maioritariamente para o Norte, uma vez que as direcções de ondulação mais frequentes ao largo localizam-se entre este e sudoeste.

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA DO TEMA



A zona costeira de Maputo apresenta uma grande diversidade de recursos naturais e paisagísticos, caracterizada pela ocorrência de mangais, bancos de corais submarinos, pequenas ilhas e arquipélagos, entre outros. Estes recursos aparecem como elemento fundamental na economia desta região do país, pois impulsionam as actividades económicas, turísticas e culturais aqui realizadas. O alto potencial desta zona costeira tem igualmente contribuído para a elevada densidade populacional que nela se regista.

A evolução desta zona costeira é caracterizada pela sua degradação por erosão, perda dos mangais, bem como a diminuição das dunas. Parte desta degradação deve-se à processos naturais, relacionados com a agitação marítima, a par das acções antrópicas. Por este facto revela-se importante melhorar o conhecimento do comportamento da agitação marítima na região costeira de Maputo. Este conhecimento adicional pode, por sua vez, contribuir alimentar os estudos e esforços no sentido de reduzir a vulnerabilidade desta zona costeira a estas ameaças.

Assim, o objetivo fundamental deste trabalho é de caracterizar a agitação marítima na região adjacente à costa de Maputo, tomando como base dados de ondas disponíveis para o largo da baía de Maputo. Procurou também o presente estudo, modelar as características da agitação marítima na sua propagação para à costa de Maputo e avaliar do transporte longitudinal de sedimentos por acção da agitação marítima.

2. METODOLOGIA

Para se proceder a este estudo de forma coerente foi feita uma análise bibliográfica sobre os processos de geração e propagação das ondas do largo à costa, assim como as transformações provocadas pela aproximação das ondas à costa. A pesquisa bibliográfica serviu para estudos e projectos que efectuaram a caracterização da agitação marítima na costa de Maputo. Posteriormente, foi feita a propagação de ondas recorrendo numa primeira etapa à Teoria Linear e numa segunda à modelação numérica com o SWAN.

A utilização do modelo SWAN foi precedida por testes para avaliar a sensibilidade dos diferentes parâmetros incluídos no modelo que potencialmente podem afectar o processo de propagação.

Na última etapa do estudo, avaliou-se o transporte longitudinal de sedimentos por acção da agitação marítima com a formulação de CERC.

Devido à carência de registos de dados visuais e instrumentais na costa e ao largo, os dados de agitação marítima foram obtidos a partir do modelo numérico NWW3, para um ponto a cerca de 600 km da costa de Maputo (26 °S e 38 °45'E). A série obtida neste modelo consiste num registo de dados medidos diariamente, num intervalo de três horas durante 13 anos. A Figura 1 ilustra a baía de Maputo e o ponto de proveniência de dados, designado ponto P. A batimetria usada foi proveniente da GEBCO (*General Bathymetric Charts of Ocean*). Os dados de ventos e marés foram provenientes de estudos feitos para esta região.

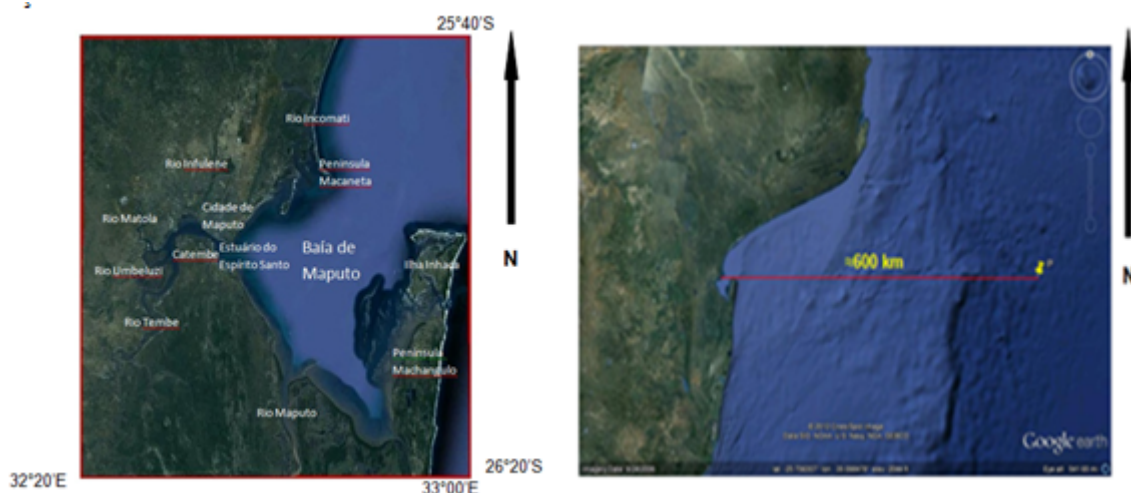


Figura 1: Localização da Baía de Maputo (Modificado de Google Earth).
Ponto de proveniência dos dados do NWW3 (Modificado de Google Earth).

3. PRINCIPAIS RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propagação usando a Teoria Linear

A Teoria Linear de Propagação sustenta-se em formulações teóricas baseadas na Teoria Linear de Ondas que, fundamentalmente, associa as alterações que determinadas características da onda sofrem na sua propagação, nomeadamente: a altura de onda, seu período de onda e sua direcção, aos fenómenos de refacção e empolamento. Para o estudo recorreu-se às tabelas de contingência, que relacionam a ocorrência de uma altura e período de onda, a uma determinada direcção. Assim, dividiu-se a série de dados em intervalos de direcções de 22.5° . Desta divisão resultaram 16 tabelas de alturas significativas de onda H_s (em intervalos de 0.5 m) e T_p (em intervalos de 2s). A tabela 1 apresenta os valores da caracterização feita ao largo com recurso às tabelas de contingência e na tabela 2, apresentam-se os valores das alturas de onda na rebentação resultantes da propagação linear. As características das ondas ao largo e na costa são também apresentadas na figura 2, em que para cada direcção de propagação é apresentada a frequência. O índice 0 nas tabelas corresponde ao ponto ao largo, pois este se encontra em águas profundas.

Tabela 1: Características das ondas ao largo (ponto P) consideradas na propagação Linear.

T_p (s)	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
3	-----	1.50	-----	-----	-----	1.50	-----	1.00
5	2.05	2.00	-----	1.91	2.18	2.31	1.83	2.40
7	2.32	2.31	2.55	2.32	2.57	2.81	2.90	2.78
9	2.84	3.13	3.61	2.76	3.04	2.99	2.76	2.68
11	3.30	4.00	-----	3.72	3.21	2.92	2.79	2.75
13	-----	-----	-----	4.00	3.13	3.58	3.07	3.10
15	-----	-----	-----	-----	-----	2.00	1.74	2.94
17	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	2.76
19	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	2.50



Tabela 2: Características das ondas propagadas linearmente no ponto de rebentação.

T_p (s)	NNE_0	NE_0	ENE_0	E_0	ESE_0	SE_0	SSE_0	S_0
3	-----	0.515	-----	-----	-----	0.605	-----	0.106
5	0.657	1.101	-----	1.356	1.589	1.556	0.857	0.477
7	0.607	1.054	1.500	1.428	1.602	1.606	1.250	0.464
9	0.668	1.330	2.015	1.524	1.708	1.477	0.978	0.371
11	0.709	1.618	-----	1.991	1.609	1.250	0.865	0.334
13	-----	-----	-----	1.966	1.398	1.472	0.880	0.350
15	-----	-----	-----	-----	-----	0.615	0.374	0.298
17	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.252
19	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.203

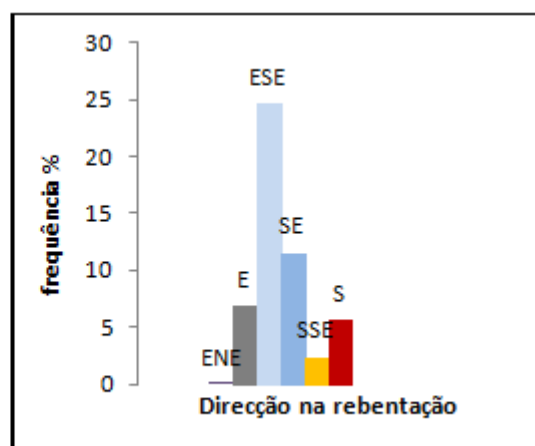
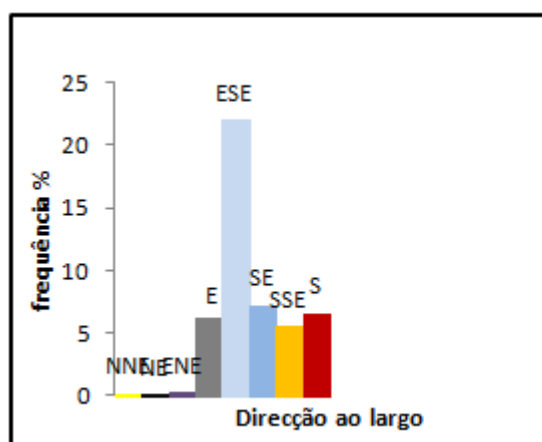


Figura 2: Frequência das direcções de propagação.

3.2 Propagação usando o modelo numérico SWAN

O modelo SWAN foi usado para tomar em conta um maior número de acções e processos que interferem na propagação das ondas. No sentido de testar a sensibilidade dos resultados, considerou-se o uso de duas malhas de cálculo, M1 e M2. Assim, propagou-se uma onda aleatória, porém representativa, do ponto P na malha M1 para o ponto P1 e colheram-se os resultados. Com os resultados obtidos propagou-se para o ponto P2. De igual modo propagou-se do ponto P para o ponto P2, e colheram-se os resultados para o ponto P2. O ponto P2 é um ponto aleatório no interior da baía com coordenadas à 26° S e 32° 42' E. Da comparação entre os resultados colhidos no P2 da propagação considerando as malhas M1 e M2 e considerando somente a malha M1, optou-se por correr o modelo no último cenário, tendo em conta a fiabilidade de considerar as duas malhas. A figura 3 ilustra as malhas e os pontos considerados na propagação.

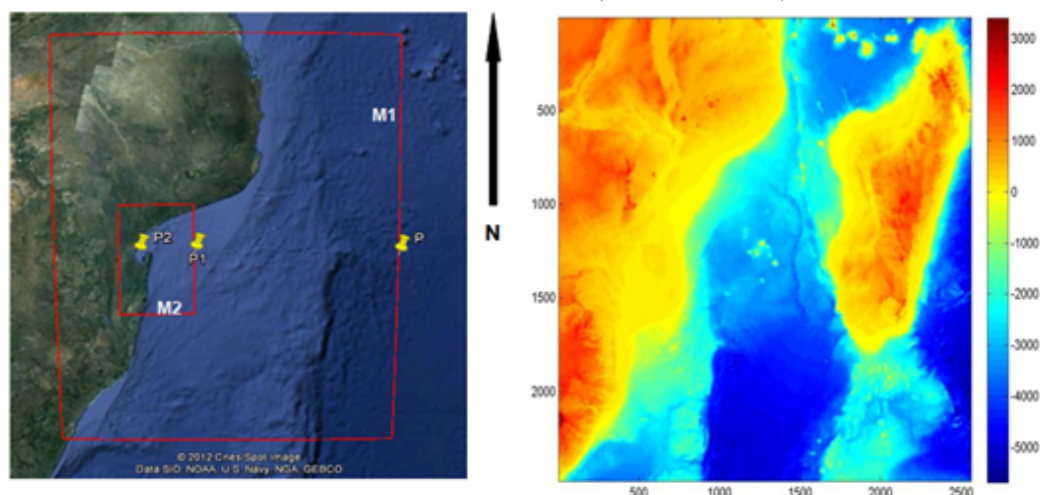


Figura 3: a) Esquerda – Malhas de cálculo consideradas. (Fonte: Google Earth).
b) Direita – Batimetria da região (Fonte: GEBCO).

Na propagação do largo para o ponto P2, foram considerados 5 cenários diferentes. O cenário 1 correspondeu à propagação do clima médio sem a influência de agentes externos, nomeadamente o vento e as marés. O cenário 2 corresponde a adição do efeito do vento em que se assumiu uma velocidade de ventos de 4.5 m/s (Langa, 2007). O cenário 3 correspondeu a adição do efeito das marés em que se adotou uma amplitude de baixa-mar de 0.2 m e preia-mar de 3.8 m (Langa, 2008). O cenário 4 é referente à variação do espectro padrão do modelo SWAN, variando o estado do mar e o cenário 5 corresponde à propagação do clima extremo cujos dados foram extraídos do estudo “Caracterização da Agitação Marítima ao Largo da Baía de Maputo” (Guiloviça, 2011). A tabela 3 apresenta os resultados para os diferentes cenários (1, 2, 3 e 4) de propagação do clima médio e a tabela 4 apresenta a propagação do clima extremo para um período de retorno de 25 anos.

Tabela 3: Resultados da propagação do clima médio no modelo SWAN.

Cenário	Direcção _{Onda,0} (°)	Variacão	H _s (m)	T _p (s)	Direcção final (°)
Propagação inicial (só ondas)	202.5	-	1.5	10.5	162
Propagação incluindo vento	202.5	Vento NE	1.6	9.0	158.7
	202.5	Vento E	1.4	9.2	160
	202.5	Vento SW	1.3	9.4	159.2
Propagação incluindo marés	202.5	Preia – mar	1.6	10.5	162.4
	202.5	Baixa – mar	1.6	10.5	162.2
Propagação variando o espectro	202.5	Jonswap	1.5	10.5	162
	202.5	Espectro PM	1.6	9.7	163.2

Tabela 4: Propagação do clima extremo no modelo SWAN para período de retorno de 25 anos.

	Direcção (°)	H _s (m)	T _p (s)
Ao largo	90	7.63	11
Região costeira	106.5	5.0	10.1

3.3 Transporte de Sedimentos



Os resultados encontrados na propagação foram empregues para estudar a dinâmica litoral, tendo-se procedido a uma análise do transporte longitudinal de sedimentos para um trecho da península de Machangulo com uma extensão de cerca de 21 km. Uma vez que não se dispõe de dados como tamanho do sedimento e inclinação do perfil da região em estudo, que são parâmetros de base das formulações de Kamphuis (Kamphuis, 1991) e Van Rijn (Rijn, 2001) esta avaliação limitou-se à formulação de CERC (USACE, 1984).

Porque a resolução da malha de cálculo do SWAN não permite conhecer as características das ondas na rebentação, que são as que definem o transporte longitudinal, esta análise foi feita somente com os resultados obtidos na propagação Linear. A figura 4 mostra a zona de estudo e as tabelas 5 e 6 apresentam os resultados do transporte em m^3/ano , indicando com o sinal negativo movimento de sedimento na direcção sul.

As taxas potenciais do transporte de sedimentos resultantes desta análise são consideravelmente baixas, devido à carência de alguns dados e limitações da teoria linear para o transporte de sedimentos.

Pode-se comparar estes resultados com o estudo de transporte de sedimentos para a praia de Escuadrón, na região de Bío-Bío no Chile (Díaz et al, 2012), em que houve maior inclusão de dados, cujo valor total de sedimentos mobilizado (bruto) foi de 37.2 Mm^3/s .

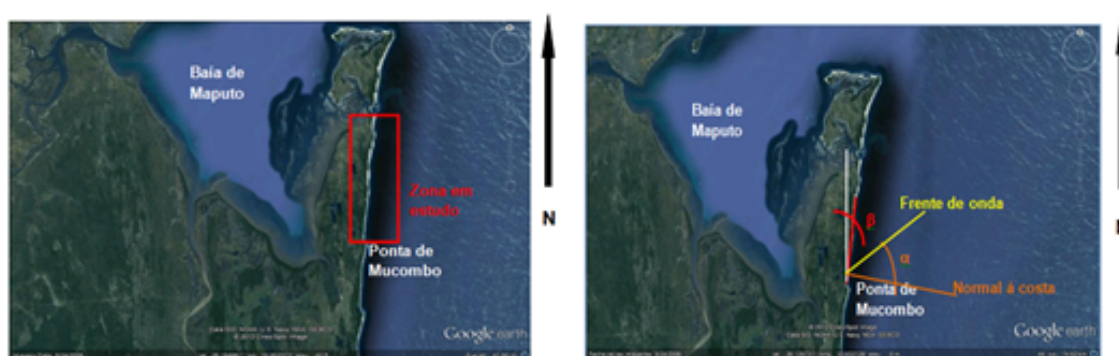


Figura 4: Zona de estudo da dinâmica sedimentária. (Modificado de Google Earth).

Tabela 5: Taxa potencial de transporte de sedimentos em m^3/ano por direcção e período.

T_p (s)	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
3	-----	- 0.024	-----	-----	-----	0.031	-----	0.003
5	- 0.615	- 0.126	-----	- 0.770	7.173	21.317	7.812	0.134
7	- 0.986	- 4.750	- 11.797	- 41.506	123.926	210.317	79.650	2.822
9	- 0.063	-1.175	- 14.436	- 36.222	137.827	187.570	58.000	11.680
11	- 0.181	- 6.083	-----	- 2.514	14.702	27.53	15.576	2.582
13	-----	-----	-----	- 3.927	0.142	3.064	110.061	0.252
15	-----	-----	-----	-----	-----	0.007	0.087	0.042
17	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.001
19	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	0.0003



Tabela 6: Taxa potencial de transporte longitudinal obtido pela fórmula de CERC.

Transporte longitudinal potencial em m³/ano			
Líquido	Bruto	Para Sul	Para Norte
896.992	1 147.348	125.178	1 022.170

3.4 Comparação entre a Propagação linear e modelo SWAN

Para a comparação dos resultados entre a Propagação Linear e o modelo SWAN foi considerado um ponto comum de análise, P, situado a norte da Ponta Mucombo com as coordenadas 25° 48' S de latitude e 33° 04' E de longitude. Comparando os resultados dos dois métodos de propagação verifica-se neste ponto, que as diferenças em termos de altura de onda são pequenas, notando-se maiores variações nas direcções e nos períodos das ondas, onde a teoria linear apresenta menor variação destes valores. Nas tabelas seguintes apresentam-se os resultados obtidos na propagação linear, bem como no modelo SWAN. A figura 5 mostra o ponto considerado para a análise. As tabelas 9 e 10 apresentam os resultados da propagação para o ponto de análise.

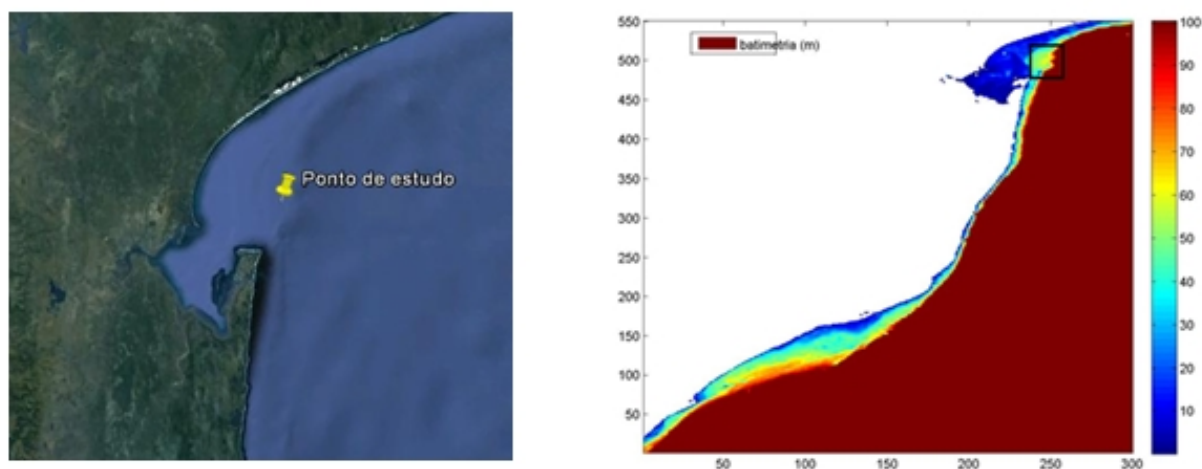


Figura 5: Ponto de estudo para comparação dos métodos de propagação.
Esquerda (Modificado Google Earth).

Tabela 7: Resultado da propagação Linear para o ponto à 60 m de profundidade.

Dir ₀ (°N)	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180
Dir (°N)	29.2	47.8	67.5	90.0	112.4	134.6	156.7	169.8
H _s (m)	2.7	3.8	2.6	2.3	3.0	3.0	2.7	1.7
T _p (s)	11	11	7	7	9	9	9	11

Tabela 8: Resultado da propagação com o modelo SWAN para o ponto à 60 m de profundidade.

Dir ₀ (°N)	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180
Dir (°N)	73.9	82.2	93.1	105	117	133	147	156
H _s (m)	1.2	2.2	1.6	1.7	2.7	2.5	2.2	2.0
T _p (s)	9.1	9.3	6.2	6.2	7.9	7.9	7.8	9.1



Comparando os dois métodos de análise, verifica-se que algumas limitações de um método foram supridas pelo outro. Deste modo, o SWAN tem uma maior abrangência de fenómenos incluindo para além do empolamento e da refração, que são os incluídos na Teoria Linear, a batimetria, o fenómeno da difração e a variação do período da onda. Já a Teoria Linear toma relevância uma vez que ela dá a altura de rebentação da onda, que é a variável de entrada na análise do transporte de sedimentos. Porém, os resultados obtidos no modelo SWAN foram também por sua vez limitados por alguns factores. A baixa resolução da batimetria limitou a análise no interior da Baía de Maputo. A consideração de condições iniciais constantes ao longo de uma fronteira não corresponde a realidade, uma vez que as ondas têm características distintas, em diferentes pontos. A dificuldade em definir o espectro de frequência mais representativo, uma vez que o estado do mar não se apresenta constante. O vento considerado é o frequente para a região da Baía de Maputo, que é uma área bastante reduzida comparando com a área de estudo, e este não actua de forma constante numa grande área. A maré tem maior efeito nas proximidades da costa e dada a baixa resolução da batimetria existente, o seu efeito foi pouco visível.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Da análise feita verificou-se que ao aproximarem-se da costa, as ondas tendem a assumir direcções entre o primeiro e o segundo quadrante ($0 - 180^\circ$).

Pela Teoria Linear nota-se que as profundidades de rebentação variam de não superam 2,60 m, sendo que as ondas provenientes do sul apresentam profundidades de rebentação menores, inferiores a 40 cm.

Da propagação com o modelo SWAN concluiu-se que as ilhas Inhaca, Xefina, Elefantes e as penínsulas Macaneta e Machangulo existentes na baía de Maputo actuam como protecção natural para a costa, de modo que as alturas significativas das ondas nesta região não superam 1 m.

O transporte de sedimentos dá-se na sua maioria para norte, uma vez que a maior frequência verifica-se para ondas provenientes do segundo e terceiro quadrantes.

As metodologias de propagação de ondas experimentadas pelo estudo mostraram ter um potencial alto para ajudar na obtenção de dados de ondas junto a costa com base em valores existentes para pontos localizados ao largo, possíveis de obter em modelos numéricos como o NWW3. Deste modo é possível suprir as dificuldades enfrentadas na obtenção de dados instrumentais pela inexistência de bóias ondógrafos em serviço. O método de quantificação das taxas de transporte de sedimentos dá valores indicativos e direcções predominantes que podem ser úteis para melhorar a gestão das zonas costeiras, o ordenamento do território e propor soluções adequadas para a resolução dos problemas de erosão costeira. Contudo, as dificuldades enfrentadas neste estudo, mostram ser necessário melhorar alguns aspectos.

Investir em registos visuais dos dados envolvidos no processo de agitação marítima, ondas e ventos, e realizar estudos baseados nesses dados.

A calibração dos parâmetros envolvidos no transporte de sedimentos para a costa de Maputo, para efectuar estudos considerando outras formulações.

A comparação com outros estudos para a validação dos resultados apresentados.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi feito dentro do projeto "Desenvolvimento do ensaio e investigação em engenharia portuária e Costeira na Universidade Eduardo Mondlane" financiado pelo Ministério de Exteriores Espanhol através do programa PCI A1/037998/11. Deste modo, agradeço à FE/UEM, a AECID e ao CCD/UPC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DIAZ, Loredana et al - **Evaluación de la dinámica costera asociada a los fenómenos de oleaje para la planificación territorial de playa Escudrón, región del Bío-Bío, Chile**: Tese de pós graduação em



- Engenharia Civil.** Barcelona: Laboratório de Engenharia Marítima – Universidade Politécnica de Catalunya, 2012.
- GUILOMÇA, Cláudia B. - **Caracterização da agitação marítima ao largo da Baía de Maputo: Tese de licenciatura em Engenharia Civil.** Maputo: Faculdade de Engenharia - Universidade Eduardo Mondlane, 2011.
- KAMPHUIS, J. William - Alongshore Sediment Transport Rate. **Journal Waterway Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE**. 1:17 (1991) 624-640.
- LANGA, Jânio V. Q. - Problemas da zona costeira de Moçambique com ênfase para a costa de Maputo, **Revista de Gestão Costeira Integrada**. 1:7 (2007) 33 – 44.
- LANGA, Stela M. G. - **Análise e Previsão de Marés na Baía de Maputo, Tese de licenciatura em Física.** Faculdade de Ciências - Universidade Eduardo Mondlane, 2008.
- RIJN, Leo C. V. - **Longshore sediment transport: Report Z3054.20.** Holanda: Delft Hydraulics, 2001.
- USACE (U. S. Army Corps of Coastal Engineer) - **Shore Protection Manual**. 3rd Ed. Estados Unidos da América: U. S. Gov. Print. Office, 1984.