



ESCOLA NAVAL



ta sainte & bief faire

Luís Pedro Nobre Serôdio

**Métodos Expeditos para a Previsão das
Condições Ambientais em Operações Anfíbias.**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Fuzileiros



Alfeite

2022



ESCOLA NAVAL

ta sante e bi-faire



Luís Pedro Nobre Serôdio

Métodos Expeditos para a Previsão das Condições Ambientais em Operações Anfíbias.

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Fuzileiros

Orientação de: Carlos Miguel Reis Silva de Oliveira e Lemos

Co-orientação de: António da Costa Neves dos Santos Martinho

O Aluno Mestrando,

O Orientador,

Assinado por: Luís Pedro Nobre Serôdio
Num. de Identificação: 14756313
Data: 2022.09.11 21:23:40+01'00'



Luís Serôdio

Carlos Lemos

Alfeite
2022

Agradecimentos

O presente Trabalho de Dissertação de Mestrado contou com o valioso apoio e colaboração do meu orientador e docente da cadeira de Oceanografia Costeira que em muito enriqueceu o trabalho realizado e que procurou sempre obter as respostas às dúvidas que ocorreram ao longo do caminho. Ao Sr. Capitão-de-Mar-e-Guerra Oliveira e Lemos uma palavra particular de agradecimento e reconhecimento pela sua dedicação incansável, orientação sábia e discussões animadas, cujo conhecimento e orientação foram essenciais durante todo o processo deste projeto.

Agradeço também ao meu coorientador pela disponibilidade demonstrada e motivação para dar continuidade ao meu trabalho.

Por fim, agradeço à minha família e amigos pela paciência incondicional e apoio ilimitado ao longo desta etapa do meu percurso académico.

A todos o meu profundo reconhecimento e admiração.

Resumo

O avanço tecnológico no âmbito da guerra eletrónica e da ciber-guerra tem vindo cada vez mais a aumentar. Este facto apresenta um enorme impacto na utilização e recurso a sistemas de informação que permitam auxiliar o processo de tomada de decisão para as operações militares. No âmbito das operações anfíbias, o acesso a sistemas de previsão meteo-oceanográficos pode vir a ser comprometido, pelo que surge a necessidade de recorrer a métodos manuais de previsão que permitam prever as condições para se efetuar uma operação anfíbia. Assim, o seguinte trabalho pretende, através da análise cartas de tempo e utilização de dados meteo-oceanográficos obtidos a partir de plataformas navais, propor um método de previsão das condições ambientais em operações anfíbias, constituído por um conjunto de programas simples de utilização semiautomática, que pode ser utilizado na tomada de decisão em operações de desembarque e reembarque, quando a informação ambiental originada por fontes externas é limitada, de modo a inferir a exequibilidade das operações anfíbias pelos Fuzileiros.

Palavras-chave: Operação Anfíbia, Ondas de Vento, Previsão das Condições METOC

Abstract

Technological advancement in the field of electronic warfare and cyber warfare has been increasing. This fact has a huge impact on the use of information systems that help on the decision-making process for military operations. In the context of amphibious operations, access to meteo-oceanographic forecasting systems may be compromised, which is why there is a need to resort to manual forecasting methods to predict the conditions for carrying out an amphibious operation. Thus, the following work intends, through the analysis of weather charts and the use of meteo-oceanographic data obtained from naval platforms, to propose a method for predicting environmental conditions in amphibious operations, consisting of a set of simple programs for semi-automatic use, which can be used in decision-making in disembarkation and re-embarkation operations, when environmental information from external sources is limited, in order to infer the feasibility of amphibious operations by the Marines.

Keywords: Amphibious Operation, Wind Waves, Prediction of METOC conditions

Índice

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Organização da Dissertação	2
1.3	Objetivos da Dissertação	3
1.4	Metodologia	3
2	Enquadramento Teórico	5
2.1	A Teoria Linear das Ondas Progressivas	6
2.2	Descrição da Agitação Irregular	18
2.2.1	Análise no domínio do tempo	20
2.2.2	Análise Espectral	22
2.2.3	Distribuição de alturas e comparação dos parâmetros estatísticos	24
2.3	Determinação da velocidade e direção do vento	25
2.3.1	Determinação da velocidade e direção do vento a partir de observações a bordo	27
2.3.2	Determinação da velocidade e direção do vento a partir de cartas de superfície	29
	Cálculo do vento geostrófico	32
	Correção da curvatura e consideração dos efeitos de fricção para reduzir a velocidade à superfície	33
2.4	Processos de Geração de Ondas de Vento	33
2.4.1	Geração e crescimento das ondas de vento	37
2.4.2	Modelos Empíricos de Previsão da Altura e Período das Ondas Geradas pelo Vento	38
2.5	Processos de Propagação de Ondas de Vento	45
2.5.1	Dispersão em Frequência	46
2.5.2	Dispersão Angular	47
2.6	Processos de Transformação de Ondas de Vento	51
2.6.1	Empolamento	51

2.6.2 Refração	53
2.6.3 Rebentação	54
3 Condições para Execução das OA	59
3.1 Critérios de Exequibilidade	60
4 Desenvolvimento do Modelo de Previsão	63
4.1 Tratamento dos Dados para Emprego no Modelo e Procedimentos	
Empíricos	65
4.1.1 Determinar a Zona de Geração	66
4.1.2 Cálculo da Altura e Período Representativos da Vaga	68
4.1.3 Cálculo do Decaimento da Ondulação	69
Cálculo da Distância	70
Cálculo da Dispersão	70
4.1.4 Cálculo da Rebentação	72
4.1.5 Determinação do Impacto das Condições METOC para as	
Operações Anfíbias	73
5 Comparação com Outros Modelos de Previsão	75
5.1 Procedimento de Análise dos Dados	75
5.2 Fontes de Informação METOC e Modelos de Previsão de Tempo Nu-	
méricos	76
5.3 Análise dos Dados e Resultados	78
5.4 Limitações	86
Conclusão e Desenvolvimentos Futuros	87
5.5 Trabalhos Futuros	91
Bibliografia	93
Anexos	101
I - Conversão do Vento Relativo em Vento Verdadeiro	101

Lista de Figuras

2.1	Classificação de ondas oceânicas por período. Fonte: Organization (2018).	7
2.2	Características de uma onda linear.	9
2.3	Comportamento da função tangente hiperbólica em função de kD . Fonte: adaptado de Bosboom e Stive (2021).	12
2.4	Órbitas prescritas pelas partículas de água em várias profundidades e condições de propagação numa onda que se propaga da esquerda para a direita na condição de águas profundas. Fonte: adaptado de Faizal, Ahmed, Kim e Lee (2011).	13
2.5	Avanço da partícula de água no espaço de dois períodos de onda. Fonte: Organization (2018).	13
2.6	Interação de duas ondas lineares com comprimentos de onda e períodos distintos. Fonte: Butt (s.d.).	14
2.7	Notação utilizada para analisar a Energia e Fluxo de uma onda.	16
2.8	O oceano como o somatório de ondas aleatórias. Fonte: L. H. Holthuijsen (2010).	18
2.9	Análise da agitação irregular de um registo de ondas (a), no domínio do tempo (b) e no domínio da frequência (c). Fonte: Komar (1983).	19
2.10	Registo de ondas reais em dois locais e momentos diferentes. Fonte: Coastal Engineering Research Center (1984).	20
2.11	Excerto de um registo de ondas reais com a contabilização de ondas através de zeros descendentes (círculos) e apresentação de cristas (traços). Fonte: Organization (2018).	21
2.12	Exemplo de um espectro de onda com o correspondente registo de onda (12 Novembro de 1973, 2100 UTC, 53°25'N, 4°13'E, profundidade 25 m, altura de onda 4.0 m, período 6.5 s, vento de Oeste nós). Fonte: Organization (2018).	24
2.13	Modelo da camada-limite planetária com perfil de velocidade do vento sobre a superfície da água. Fonte: Coastal Engineering Research Center (1984).	26

2.14	Deslocamento do ar no hemisfério Norte. Fonte: Dashew e Linda (1999).	30
2.15	Elementos meteorológicos presentes em cartas de tempo relativos a frentes, centros de pressão e isóbaras. Fonte: Office (2015).	31
2.16	Exemplo de uma carta de tempo para análise de condições meteorológicas sobre o Oceano Atlântico Norte e a Europa, válida até às 1200 UTC do dia 20 maio 2022. Fonte: Office (s.d.[b]).	32
2.17	Velocidade do vento geostrófico (em kn) em função da distância entre isóbaras em graus e latitude (intervalo de 4hPa), pressão de 1015mbar, temperatura 11.85°C, densidade do ar 1.1241kg/m ³ . Fonte: Organization (2018).	34
2.18	Direções do vento em torno dos centros de alta (H) e baixa pressão (L) considerando os efeitos de atrito, <i>Coriolis</i> e gradiente de pressão. Fonte: Thornton (s.d.).	36
2.19	Geração das ondas de vento a partir de uma tempestade, processos de transferência de energia e trajeto até à rebentação em costa. Fonte: Komar (1983).	36
2.20	Os espectros de <i>Pierson-Moskowitz</i> e JONSWAP. Fonte: Organization (2018).	40
2.21	Nomograma de crescimento das ondas elaborado por Mercer (2008), baseado nas equações de Breugem e L. Holthuijsen (2007). Fonte: Organization (2018).	44
2.22	Efeito da dispersão em frequência das ondas que saem da frente da zona de geração ilustrada sobre a forma espectral. As primeiras ondas (mais rápidas) a atingir o ponto P são ilustradas por (a), seguidas das ondas com frequências mais altas que chegam posteriormente ao mesmo ponto ilustradas em (b). Fonte: Organization (2018).	48
2.23	Espectro direcional da geração de ondas de vento mostrado em coordenadas polares. Fonte: L. H. Holthuijsen (2010).	49
2.24	Ponto de observação P afetado por ondulação que se propaga na direção <i>alpha</i> , entre os ângulos θ_1 e θ_2 . Adaptado de Whitford (2002b).	50
2.25	Ponto de observação P afetado por ondulação, com frequências entre f_1 e f_2 , que se propaga entre os ângulos θ_1 e θ_2 num dado espaço de tempo. Fonte: L. H. Holthuijsen (2010).	51
2.26	Representação de uma onda com incidência normal às linhas batimétricas do fundo. Fonte: Bosboom e Stive (2021).	52

2.27	Incidência oblíqua de uma onda com ângulo α_0 em relação à normal das isóbatas paralelas a costa. Fonte: adaptado de Bosboom e Stive (2021).	53
2.28	Limite da declividade e correspondente ângulo de crista em águas profundas. Fonte: Coastal Engineering Research Center (1984).	55
2.29	Ilustração de um perfil de praia. Fonte: adaptado de Andriolo, Mendes e Taborda (2020).	56
2.30	Tipos de rebentação de ondas. Fonte: Kamphuis (2010).	58
4.1	Modelo conceitual do programa de previsão.	64
4.2	Formato de apresentação do modelo de previsão.	65
4.3	Determinação de zonas de geração para uma tempestade no mar de <i>Weddell</i> e quais os pontos que estas afetam. O ponto A é afetado pelas áreas de <i>fetch</i> 1 e 2. O ponto B é afetados pelas zonas de geração 4 e 5, o ponto C é afetado somente por 5 e o ponto E pelas áreas 9 e 10. O ponto D é afetado por 8 e mais tarde por 9 e 10. As áreas 3, 6 e 7 não afetam diretamente nenhum dos pontos. Fonte: Organization (2018).	67
4.4	Exemplos de <i>fetch</i> dinâmicos. Fonte: Naval Personnel (1995).	68
4.5	Demonstração do código VBA que corre no modelo para determinação do tipo de rebentação.	74
5.1	Região da praia de desembarque entre a Praia da Fonte da Telha e a Praia dos Olhos de Água. Fotografia retirada da Carta Náutica, da série Costeira, 2 ^a Edição, Cabo da Roca ao Cabo de Sines 24204 (Hidrográfico 2005).	79
5.2	Comparação das alturas de ondulação observadas no NRP <i>Dom Carlos I</i> , com as alturas previstas pelo IPMA e pelo METOCMIL.	80
5.3	Dados para introdução no programa das tempestades analisadas durante o período de 30 de maio a 5 de junho de 2022.	81
5.4	Previsões das tempestades analisadas durante o período de 30 de maio a 5 de junho de 2022.	82
5.5	Análise individual das tempestades, durante o período de 30 de maio a 5 de junho de 2022, e comparativa das previsões obtidas pelo programa e do IPMA.	83
5.6	Análise gráfica da fiabilidade das previsões do programa para a ondulação e rebentação com tempestades isoladas.	84

5.7	Análise integrada das tempestades durante o período de 30 de maio a 5 de junho de 2022.	85
5.8	Análise gráfica da fiabilidade das previsões do programa para a ondulação e rebentação com a combinação das tempestades.	86

Lista de Tabelas

2.1	Classificação e condições de propagação de uma onda de vento. Fonte: adaptado de Coastal Engineering Research Center (1984).	12
2.2	Características das ondas de vento conforme as condições de propagação.	14
2.3	Síntese das características das ondas para as diferentes condições de propagação.	15
2.4	Velocidade do vento geostrófico (em kn) em função da distância entre isóbaras em graus e latitude (intervalo de 4 hPa), pressão de 1015 mbar, temperatura 11.85 °C, densidade do ar 1.1241 kg/m ³ . Fonte: Organization (2018).	35
2.5	Critérios para tipo de rebentação.	57
3.1	Critérios de exequibilidade perante rebentação progressiva. Fonte: Unidade de Meios de Desembarque (1998).	61

Lista de Símbolos

L	Comprimento de onda	m
L_∞	Comprimento de onda em águas profundas	m
D	Profundidade	m
a	Amplitude	m
H	Altura de onda	m
\bar{H}	Altura média das ondas num registo	m
H_{max}	Altura máxima das ondas num registo	m
$\bar{H}_{\frac{1}{N}}$	Altura média de $\frac{1}{N}$ das ondas mais altas num registo	m
$\bar{H}_{\frac{1}{3}}$	Altura média de $\frac{1}{3}$ das ondas mais altas num registo	m
H_{rms}	Altura quadrática média	m
H_s	Altura significativa da onda	m
H_c	Altura característica da onda	m
H_{m0}	Altura de onda significativa pela análise espectral	m
η	Elevação da superfície livre	m
F	Comprimento do <i>fetch</i>	m
W_F	Largura do <i>fetch</i>	m
b	Largura de crista	m
σ	Desvio padrão	m
z	Altura de medição do vento	m
T	Período de onda	s
\bar{T}_z	Período médio entre zeros ascendentes/descendentes consecutivos	s
$\bar{T}_{\frac{1}{N}}$	Período médio de $\frac{1}{N}$ das ondas mais altas num registo	s
$\bar{T}_{\frac{1}{3}}$	Período médio de $\frac{1}{3}$ das ondas mais altas num registo	s
T_r	Duração de um registo de agitação marítima	s
T_p	Período de pico do espectro de variância	s
T_{m01}	Período correspondente à frequência média do espectro de variância	s
T_{m02}	Período equivalente ao período médio num registo de ondas	s
ω	Frequência angular	rad s ⁻¹
k	Número de onda	rad m ⁻¹
f	Frequência	Hz
C	Velocidade de propagação ou velocidade de fase	m s ⁻¹

C_∞	Velocidade de propagação em águas profundas	m s^{-1}
C_g	Velocidade de grupo	m s^{-1}
$C_{g\infty}$	Velocidade de grupo em águas profundas	m s^{-1}
U_z	Velocidade do vento à altura z	m s^{-1}
U_{10}	Velocidade do vento à altura de 10 m	m s^{-1}
U_*	Velocidade de atrito do vento	m s^{-1}
U_A	<i>Wind-stress</i>	m s^{-1}
VV_V	Velocidade do vento verdadeiro	m s^{-1}
V_N	Velocidade do navio	m s^{-1}
E	Densidade de energia	J/m^2
E_p	Densidade de energia potencial	J/m^2
E_k	Densidade de energia cinética	J/m^2
\bar{E}	Densidade de energia média	J/m^2
\bar{P}	Fluxo médio	W
σ^2	Variância	m^2
m_n	Momento de ordem n de um espectro de variância	m^2
m_0	Momento de ordem 0 de um espectro de variância ou variância total	m^2
f_p	Frequência de pico do espectro de variância	Hz
$S(f)$	Espectro de variância	m^2/Hz
$E(f)$	Espectro de densidade de energia	$\text{J/m}^2\text{Hz}$
z_0	Rugosidade da superfície	μm
q	Função SMB para cálculo do tempo mínimo	m^{-1}
MV_R	Marcação do vento relativo	◦
MV_V	Marcação do vento verdadeiro	◦
VV_R	Velocidade do vento relativo	◦
θ	Ângulo de propagação das ondas	◦
θ_m	Direção principal de propagação das ondas	◦
θ_1	Ângulo do limite superior do <i>fetch</i>	◦
θ_2	Ângulo do limite inferior do <i>fetch</i>	◦
$D(\theta)$	Função de dispersão angular em relação à direção θ	◦
$D(\theta_1, \theta_2)$	Função de dispersão angular com base em ângulos limite	◦
ϕ	Latitude	◦
λ	Longitude	◦
K	Constante de von Kármán	adimensional
ψ	Função que descreve o efeito da estabilidade	adimensional
β	Constante dos espectros de variância	adimensional
α	Constante dos espectros de variância	adimensional

γ	Constante do espectro de variância de JONSWAP	adimensional
\tilde{D}	Termo de profundidade	adimensional
\tilde{F}	Termo do <i>fetch</i>	adimensional
K_r	Coefficiente de refração	adimensional
K_s	Coefficiente de empolamento	adimensional
s	Declividade da onda	adimensional
s_∞	Declividade da onda em águas profundas	adimensional
s_{max_∞}	Declividade máxima da onda em águas profundas	adimensional
m	Declive da praia	adimensional
ξ	<i>Surf similarity parameter</i>	adimensional
$Disp_f$	Fator de dispersão em frequência	adimensional
$Disp_a$	Fator de dispersão angular	adimensional
g	Aceleração da gravidade	9.81 m/s ²
R_T	Raio da Terra	6371 km
ρ_w	Densidade da água salgada	1030 kg

Lista de Acrónimos

ALADIN	<i>Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International.</i>
ATF	<i>Amphibious Task Force.</i>
BB	Bombordo.
CATF	<i>Commander of the Amphibious Task Force.</i>
CG	Ciber-Guerra.
CGEOMETOC	<i>Centro Geoespacial, Meteorológico e Oceanográfico Marítimo.</i>
CLF	<i>Commander of the Landing Force.</i>
COA	<i>Course of Action.</i>
EB	Estibordo.
ECDIS	<i>Electronic Chart Display Information System.</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.</i>
FD	Força de Desembarque.
GE	Guerra Eletrónica.
GFS	<i>Global Forecast System.</i>
IH	Instituto hidrográfico.
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera.
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project.</i>
METOC	Meteo-Oceanográficos.
METOCMIL	Meteorologia e Oceanografia Militar.

MOGREPS	<i>Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System.</i>
NRP	<i>Navio da República Portuguesa.</i>
NWP	<i>Numerical Weather Prediction.</i>
OA	<i>Operação Anfíbia.</i>
PM	<i>Pierson-Moskowitz.</i>
SMB	<i>Sverdrup-Munk-Bretschneider.</i>
SWAN	<i>Simulating WAVes Nearshore.</i>
SWL	<i>Still Water Level.</i>
TUDeft	<i>Delft University of Technology.</i>
VBA	<i>Visual Basic for Applications.</i>
WW3	<i>Wave Watch 3.</i>