



MODELO DE CORRENTES POR QUEBRA EM PRAIAS



MANUAL DE REFERÊNCIA COPLA MC/SP

APOIO:



REALIZAÇÃO:



GOVERNO BRASILEIRO

Presidência da República

MICHEL TEMER

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

JOSÉ SARNEY FILHO

Secretaria Executiva

MARCELO CRUZ

Secretaria de Recursos Hídricos e Ambientes Urbanos

JAIR VIEIRA TANNUS JUNIOR

Diretoria de Zoneamento Territorial

RAIMUNDO NONATO C. CORDEIRO FILHO

Gerência Costeira

RÉGIS PINTO DE LIMA

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, DESENVOLVIMENTO E GESTÃO

DYOGO HENRIQUE DE OLIVEIRA

Secretaria Executiva

DYOGO HENRIQUE DE OLIVEIRA

Secretaria do Patrimônio da União

SIDRACK DE OLIVEIRA CORREIA NETO

Departamento de Destinação do Patrimônio

ANDRÉ LUÍS PEREIRA NUNES

MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES

JOSÉ SERRA

Secretaria-Geral das Relações Exteriores

MARCOS BEZERRA ABBOTT GALVÃO

Subsecretaria-Geral de Cooperação Internacional, Promoção Comercial e Temas Culturais

SANTIAGO IRAZABAL MOURÃO

Agência Brasileira de Cooperação

JOÃO ALMINO

GOVERNO ESPANHOL

Embaixador da Espanha no Brasil

MANUEL DE LA CÁMARA HERMOSO

Coordenador-Geral da Cooperação Espanhola no Brasil

JESÚS MOLINA VÁZQUEZ

Diretora de Programas da Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID)

MARGARITA GARCÍA HERNÁNDEZ

Diretor de Projetos da Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID)

ALEJANDRO MUÑOZ MUÑOZ

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantabria - Universidade da Cantabria

Laboratório de Oceanografia Costeira - Universidade Federal de Santa Catarina

Instituto Oceanográfico – Universidade de São Paulo

Ministério do Meio Ambiente do Brasil

RESPONSÁVEIS TÉCNICOS

Professor: Mauricio González Rodríguez

Endereço: c/Isabel Torres nº 15

Parque Científico e Tecnológico da Cantabria 39011 Santander

Espanha

E-mail: mauricio.gonzalez@unican.es

Tel.: +34 942 201 616

Fax: +34 942 266 361

<http://www.ihcantabria.com>

Professor: Antonio Henrique da Fontoura Klein

Universidade Federal de Santa Catarina

Centro de Filosofia e Ciências Humanas

Departamento de Geociências

Campus Universitário - Trindade

Florianópolis, SC- Brasil - CEP: 88040-900

E-mail: antonio.klein@ufsc.br

MANUAL DE REFERÊNCIA – COPLA MC/SP

Tel.: 55-48-37212577

<http://loc.ufsc.br/>

Professor: Moysés Gonzalez Tessler

Universidade de São Paulo

Endereço: Rua Anna Nastari Brunetti, 62 Granja Viana, Cotia , São Paulo-Brasil.

CEP: 06709-135

E-mail: mgtessle@gmail.com

Tel.: [55-11-98381-8410](tel:55-11-98381-8410)

<http://ldc.io.usp.br/>

Diego Pereira de Oliveira (Analista de Infraestrutura)

Ministério do Meio Ambiente

SEPN 505 – Bloco B - Edifício Marie Prendi Cruz – sala 107

Brasília - DF - Brasil - 70730-542

E-mail: diego.oliveira@mma.gov.br

Tel.: 55- 61- 2028-1743 / 55-61-2028-1364

<http://www.mma.gov.br/>

Observação Jurídica

Nenhum dos participantes, nem as instituições as quais representam no desenvolvimento do SMC-Brasil, são responsáveis pela utilização dada a esta publicação.

MANUAL DE REFERÊNCIA – COPLA MC/SP

A base de dados de ondas em águas profundas (GOW) e de níveis (GOT; GOS) incluída no SMC-Brasil são de propriedade do IH Cantabria. O SMC-Brasil permite o processamento e análise de tais dados ao longo da costa brasileira. Todavia, esses dados não estão disponíveis para os usuários do sistema, apenas o dado processado e analisado por cada usuário. O uso inadequado desses dados ou dos resultados obtidos a partir destes, bem como as ferramentas não são de responsabilidade do IH Cantabria ou do grupo que desenvolveu o projeto nem do MMA. Os usuários não podem utilizar técnicas de engenharia reversa, descompilar ou fazer o *download* da base de dados de ondas e níveis do *software* SMC-Brasil.

Contribuições e Desenvolvimento

Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantabria (IH Cantabria)

Universidade da Cantabria

Instituição líder do projeto: Mauricio González (principal pesquisador do projeto), Raúl Medina, Omar Gutiérrez (coordenador do projeto), Nabil Kakeh, Cynthia Martínez, Roland Garnier, Lara Ruiz, Jara Martínez, Verónica Canovas, Laura Ribas de Almeida, Belén López, Fernando Méndez, Antonio Espejo, Melisa Menéndez, Ana Abascal, Sonia Castanedo.

Laboratório de Oceanografia Costeira - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Líder local do projeto: Antonio Henrique da Fontoura Klein (principal pesquisador do projeto), Clarissa Brelinger De Luca, Priscila Hoerbe Soares, Paula Gomes da Silva, Jonas Gomes Oliveira, Maiara Werner Pinto, Charline Dalinghaus, Caio Trajano Siqueira Salgado, Julia Gil dos Santos.

Instituto Oceanográfico – Universidade de São Paulo (USP)

Líder local do projeto: Moyses Gonzalez Tessler (principal pesquisador do projeto), Samara Cazzoli y Goya.

Gerenciamento Costeiro – Ministério do Meio Ambiente (MMA)

Colaboradores: Márcia Regina Lima de Oliveira, Leila Swerts, Adalias Freires Bastos, Salomar Mafaldo de Amorim Júnior, Flávia Cabral Pereira, Bruna Teixeira Pandolpho da Costa e Silva e Mateus Pereira Rodrigues Borges.

Financiamento do projeto

Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento – AECID
Ministério do Meio Ambiente- MMA Brasil
Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão/Secretaria de Patrimônio da União- MP-SPU Brasil.

Colaboração (Fornecimento de dados)

Marinha do Brasil

Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH)

Foto da Capa

Autor:

Cedida por:

Local:

MANUAL DE REFERÊNCIA – COPLA MC/SP

Projeto SMC-Brasil: Manual de Referência – Modelo de Correntes por Quebra em Praias (COPLA MC/SP) / Ministério do Meio Ambiente- MMA / Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantabria - IHC / Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Brasília-DF, Brasil - 2017.

ISBN xxx-xx-xxxxx-xx-x

xxx p.

1. Correntes. 2. Modelo. 3. SMC - Brasil. 4. Quebra de ondas. I. Título. II. Ministério do Meio Ambiente - MMA. III. Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantabria - IHC. IV. Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC – MMA.

CDU: 910.1
910.2

Sumário

CAPÍTULO 1: SOBRE ESTE MANUAL	16
1. Sobre este Manual	17
1.1. Objetivos	17
1.2. Conteúdo	17
CAPÍTULO 2: APRESENTAÇÃO TEÓRICA DO PROBLEMA	19
2. Apresentação Teórica do Problema	20
2.1. Introdução	20
2.2. Modelo de correntes na zona de arrebenção	21
2.3. Discussão de parâmetros	27
CAPÍTULO 3: FORMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROBLEMA	31
3. Formulação Numérica do Problema	32
3.1. Introdução	32
3.2. Discretização do domínio	32
3.3. Condições iniciais	32
3.4. Condições de contorno	34
3.5. Método de resolução	38
3.6. Implementação numérica de condições de contorno	43
3.7. Estabilidade numérica do modelo	45
3.8. Arquivos de entrada e saída do programa COPLA – (MC/SP)	46
CAPÍTULO 4: ESTRUTURA DO CÓDIGO DO PROGRAMA	49
4. Estrutura do Código do Programa	50
4.1. Introdução	50
4.2. Descrição de sub-rotinas	50
CAPÍTULO 5: APLICAÇÕES DO MODELO	55
COPLA MC/SP	55
5. Aplicações do Modelo COPLA MC/SP	56
5.1. Casos teóricos	56
5.2. Casos Práticos	74
REFERÊNCIAS	83

Lista de Figuras

Figura 1 – Malha de referência com os dados de entrada ao COPLA (MC/SP) (altura de onda H_1 , período de onda T , direção da onda θ , profundidade da água, h).	33
Figura 2 – Esquema geral das condições de contorno.....	37
Figura 3 – Representação gráfica do esquema numérico do cálculo de correntes e nível médio.	39
Figura 4 – Malha de resultados para a propagação de onda OLUCA-(MC/SP) e as correntes por quebra COPLA-(MC/SP).....	44
Figura 5 – Exemplo do arquivo de dado [chave].dat para correntes em praias.	47
Figura 6 – Copla-(MC/SP): Esquema global dos programas.....	51
Figura 7 – Batimetria reta e paralela ($m=1/20$).....	57
Figura 8 – Propagação de onda ($\theta=0$, $H=5,0$ m, $T=18$ s).	58
Figura 9 – Campo de correntes (onda normal). (a) campo de velocidade, (b) sobrelevação do nível médio, (c) variação transversal do nível médio.	60
Figura 10 - Propagação de onda irregular em fundo plano ($\theta_0=30$, $H_s=5,0$ m, $T_p = 18$ s). (a) amplitude e direção da onda, (b) altura da onda significativa.	61
Figura 11 - Campo de velocidades ($\epsilon = 0$, $\theta_0 = 30^\circ$). (a) $K_{swc} = 2,0$ (b) $K_{swc} = 0,5$	63
Figura 12 – Campo de velocidade ($K_{swc} = 0,5$, $\theta_0 = 30^\circ$). (a) $\epsilon = 5$, (b) $\epsilon = 15$	64
Figura 13 – Variação transversal de velocidades. (a) $\epsilon = 0$, $K_{swc} = 2,0$, $K_{swc} = 0,5$; (b) $K_{swc} = 0,5$, $\epsilon = 5$, $\epsilon = 15$	65
Figura 14 – Propagação de onda em uma cunha ($\theta = 0^\circ$, $H_s = 5,0$ m, $T_p = 18$ s). (a) batimetria, (b) amplitude e direção da onda.	67
Figura 15 – Propagação de onda em uma cunha ($\theta = 0^\circ$, $H_s = 5,0$ m, $T_p = 18$ s). (a) altura de onda significativa, (b) superfície livre (uma componente).	68
Figura 16 – Campo de velocidades na cunha. (a) sistemas de correntes, (b) sobrelevações do nível médio.....	69
Figura 17 – Praia em equilíbrio estático. $\alpha_{min} = 48^\circ$, $R0 = 297$ m, $A = 0,23$, $\Delta x = 10$ m.	71
Figura 18 – Propagação da onda. $H = 5,0$ m, $T = 10$ s, $\theta = 0^\circ$	72
Figura 19 – Campo de velocidades. Praia em equilíbrio. $C = 15$, $\Sigma = 20$, $H = 5,0$, $T = 10$ s, $\theta = 0^\circ$	73
Figura 20 – Batimetria praia de Puntal.....	75
Figura 21 – Propagação da onda (Puntal). $H = 5,0$ m, $T = 8$ s, DIR = NNW.....	76
Figura 22 – Campo de correntes devido à onda (El Puntal). Onda: $H = 5,0$ m, $T = 8$ s, DIR = NNW. Correntes: $C = 15$, $\Sigma = 25$	77

Figura 23 – Efeito das correntes na praia de Puntal.	78
Figura 24 – Batimetria da praia de Plentzia (Vizcaya).....	80
Figura 25 – Propagação de onda. Plentzia (Vizcaya). (a) Superfície livre (uma componente) $T_p = 18$ s, NW, $H_s = 4$ m. (b) Altura de onda significativa. Isolinhas de altura de onda significativa.....	81
Figura 26 – Correntes na praia de Plentzia. $T_p = 18$ s, NW, $H_s = 5$ m.	82

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Esquema das diferenças finitas no espaço 38

Lista de Abreviaturas

AECID – Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento

COPLA – Modelo de Correntes por Quebra em Praias

DH – Dimensão horizontal

DIR – Direção da onda incidente

DV – Dimensão vertical

DXR – Discretização espacial em X

DYR - Discretização espacial em Y

EROS – Modelo de Erosão/Sedimentação de Praias

GOS – *Global Ocean Surges*

GOT – *Global Ocean Tides*

GOW – *Global Ocean Waves*

IH – Instituto Hidráulico

INPH – Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias

MC – Modelo de Ondas Monocromáticas

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MOPLA – Modelo de Morfodinâmica de Praias

NMM – Nível Médio do Mar

NMMR – Nível Médio do Mar em Repouso

NNW – Norte/Nordeste

OLUCA – Modelo de Propagação de Ondas em Praias

SMC – *Sistema de Modelado Costero / Sistema de Modelagem Costeira*

SP – Modelo de Ondas Espectrais

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

USP – Universidade de São Paulo

Lista de Símbolos

- \hat{a} – Viscosidade turbulenta (*Eddy Viscosity*)
- \hat{a}_{min} - Ângulo mínimo empiricamente definido formado pelo ponto de controle com o alinhamento retilíneo do final da praia
- A – Parâmetro de escala baseado nas características do sedimento
- A_{jl} – Amplitude para uma componente frequencial j e direcional l , em uma onda irregular
- Δt – Intervalo de tempo de cálculo
- Δx – Discretização espacial do tamanho da malha (DXR, DYR)
- c – Coeficiente de Chézy
- c – Velocidade de fase
- ζ – Elevação da superfície livre a partir do nível médio do mar
- c_g – Velocidade de grupo
- cU – Número de Courant
- D – Profundidade máxima do domínio
- \hat{e} – Ângulo do vetor número de onda com o eixo x
- E – Energia de onda monocromática
- g – Aceleração da gravidade
- h – Profundidade da água
- h_b – Profundidade estática
- H – Profundidade total
- H_1 – Altura de onda
- H_s – Altura significativa de onda
- j – Componente frequencial em uma onda irregular
- k – Número de onda
- k_j – Número de onda associado a componente frequencial j
- K_s – Rugosidade associada ao tamanho dos sedimentos do fundo, rugosidade de Nikuradse
- K_{sf} – Rugosidade associada às formas do leito, devido à interação onda - corrente
- K_{swc} - Rugosidade efetiva/ hidráulica
- l – Componente direcional em uma onda irregular
- L – Comprimento de onda em cada ponto da malha
- n – Relação de velocidade do grupo c_g em relação à velocidade de fase c
- \tilde{n} – Densidade do fluxo
- η_b - Variação do nível médio do mar dinâmico no ponto de quebra

n_j – Relação de velocidade de grupo c_{gj} em relação à velocidade c_j da componente frequencial j

P – Pressão total

P_0 – Pressão estática a partir do nível médio de referência

R_0 – Linha de controle que une o ponto de difração até extremidade final da parte retilínea da praia

S_{xx} – Tensor de radiação atuando no plano x ao longo do eixo x

S_{xy} – Tensor de radiação atuando no plano y ao longo do eixo x

S_{yy} – Tensor de radiação atuando no plano y ao longo do eixo y

t – Tempo

T – Período da onda

T_p – Período de pico

u – Velocidade instantânea na direção x

U – Ordem de magnitude da velocidade média esperada

v – Velocidade instantânea na direção y

x – Direção transversal à praia

y – Direção longitudinal à praia

z – Direção vertical

ε – Viscosidade turbulenta (*Eddy Viscosity*)

η – Sobrelevação do nível médio do mar

θ – Direção da onda

θ_{ji} – Ângulo do vetor número de onda com o eixo x para um componente frequencial j e direcional

ρ – Densidade da água

CAPÍTULO 1: SOBRE ESTE MANUAL

1. Sobre este Manual

1.1. Objetivos

O presente manual compreende uma descrição geral das equações e formulações numéricas aplicadas nos modelos COPLA-MC e COPLA-SP (modelo de correntes induzidas pela quebra de onda monocromática (MC) e onda espectral (SP) em praias), bem como a estrutura do programa.

Os programas COPLA-MC e COPLA-SP formam parte do “Modelo Integral de Propagação de Onda, Correntes e Morfodinâmica em Praias” (MOPLA), o qual integra uma série de modelos numéricos que permitem realizar uma análise em curto prazo em praias

Além do COPLA-MC e COPLA-SP, o MOPLA inclui os “Modelos de Propagação de Ondas Monocromática e Espectral em Praias” (OLUCA-MC e OLUCA-SP) (IH CANTABRIA – MMA, 2017a,b) e os “Modelos de Erosão/Sedimentação de Praias” (EROS-MC e EROS-SP) (IH CANTABRIA – MMA, 2017c).

O objetivo deste manual é dar uma ideia geral ao usuário das equações aplicadas nos modelos COPLA-MC e COPLA-SP, sem aprofundar em deduções teóricas, mas sim apresentando muito claramente as hipóteses nas quais se fundamentam e sua área de aplicação. Se o usuário desejar analisar mais detalhadamente algum destes aspectos, é apresentada uma lista de referências ao final do texto de cada um dos assuntos.

1.2. Conteúdo

No capítulo 2 é apresentado teoricamente o problema das correntes por quebra de ondas em praias.

No capítulo 3 é apresentado o modelo numérico de discretização das equações, geração das malhas e condições de contorno.

No capítulo 4 é apresentado o esquema geral do código do programa.

No capítulo 5 é aplicado o modelo em casos com solução analítica e/ou casos de praias reais.

No capítulo 6 são incluídas as referências.

**CAPÍTULO 2: APRESENTAÇÃO TEÓRICA DO
PROBLEMA**

2. Apresentação Teórica do Problema

2.1. Introdução

Os modelos COPLA-MC e COPLA-SP são modelos numéricos que resolvem as equações de fluxo dentro da zona de arrebentação. Usam como dados de entrada aqueles dados de saída do campo de ondas calculados a partir dos modelos OLUCA-MC e OLUCA-SP, respectivamente (detalhes sobre os modelos de propagação podem ser consultados em seus correspondentes “Manuais de Referência” (IH CANTABRIA – MMA, 2017a,b)).

Dentro do movimento do fluido, as correntes que são geradas na costa influenciam de maneira importante na configuração morfológica das praias, sendo este sistema de correntes, em muitos dos casos, de notável complexidade. Johnson (1919) distinguiu os seguintes tipos de correntes que podem contribuir para o desenvolvimento da linha da costa: correntes devido às ondas, correntes de maré, correntes hidráulicas associadas às oscilações de baías, correntes devido ao vento, correntes planetárias associadas a sistemas oceânicos circulatorios, correntes devido a rios, etc. De todas elas, na maioria dos casos, são as correntes devido às ondas as mais importantes no desenvolvimento da linha da costa.

O sistema circulatorio na zona de arrebentação é dominado pelas forças induzidas pela onda e associadas à quebra da mesma. A modelagem do sistema circulatorio na zona de arrebentação é necessária para resolver o transporte de sedimentos e as variações morfológicas na linha da costa.

Estes modelos são baseados, fundamentalmente, na resolução das equações integradas do movimento e da equação da continuidade. No entanto, estas equações podem ser resolvidas com diferentes graus de complexidade. Em qualquer caso, a utilização das equações integradas precisa de algumas expressões para as tensões tangenciais e turbulentas, que obrigam a introduzir uma série de equações de fechamento.

O modelo mais completo é o tridimensional (3-D) que resolve as equações em uma malha tridimensional e, portanto as características do sistema circulatorio em toda a coluna de água, de forma longitudinal e perpendicular à costa. Este tipo de modelo, atualmente, necessita de um grande espaço computacional devido ao tamanho do

sistema a ser resolvido, e tem grandes dificuldades de calibração, dadas suas características tridimensionais.

A fim de simplificar o modelo circulatório uma dimensão é reduzida, passando aos modelos bidimensionais (2D). A técnica de resolução numérica mais utilizada é de diferenças finitas e, principalmente, esquemas do tipo implícito, dado que estes reduzem as instabilidades numéricas.

Existem duas aproximações diferentes para estes modelos, os puramente 2D (2DH) e os modelos integrados na vertical (2DV). No primeiro caso (2DH) (DALLY; DEAN, 1984; STIVE; BATTJES, 1984), assume-se que as velocidades e gradientes na direção paralela à costa são nulos e os resultados obtidos são velocidade e níveis. Os modelos (2DV) (BASCO, 1983; DE VRIEND, 1987), resolvem as equações do movimento e da continuidade integradas na vertical sobre uma malha e, como resultado, são obtidos níveis e as duas componentes horizontais da velocidade. No entanto, apresentam o inconveniente de perder a estrutura vertical do fluxo, que é incorporada na expressão da fricção de fundo.

2.2. Modelo de correntes na zona de arrebentação

• *Apresentação do Problema*

Shepard e Inman (1950) propuseram uma justificativa para existência de correntes induzidas por ondas através de uma análise bidimensional da propagação e quebra das ondas. Essa análise foi completada por outro modelo tridimensional pelos mesmos pesquisadores, onde se deu ênfase pela primeira vez ao conceito de sistema circulatório de correntes na área litoral.

Nos últimos anos foram apresentadas diversas teorias que permitiram responder algumas questões apresentadas, mas sempre com caráter parcial e com fortes limitações na sua aplicação a casos muito concretos e particulares. Mas estas teorias apresentaram um mundo mais complexo do que o descrito no modelo de Shepard e Inman (1950). Um dos grandes avanços nesta área surgiu a partir da introdução do conceito de tensão de radiação (LONGUET-HIGGINS; STEWART, 1962), conceito que pode ser explicado do seguinte modo:

Com a passagem de uma onda, podem ser considerados dois movimentos: o movimento instantâneo das partículas e o movimento líquido das partículas ou transporte de massa. Em profundidades indefinidas e inclusive intermediárias este transporte de massa é pequeno, porém em profundidades reduzidas, onde a onda se propaga ao longo da praia, por exemplo, a celeridade da onda diminui, a velocidade instantânea cresce, assim como a velocidade de transporte de massa. No momento da quebra da onda, as velocidades instantâneas, de massa e a celeridade são igualadas em termos de magnitude e direção. Na quebra, se injeta um excesso de massa de água que gera um excesso de quantidade de movimento dentro da zona de arrebatção, denominados tensores de radiação, que são os geradores de correntes em praias devidos unicamente à onda.

• **Hipótese do modelo**

O modelo de correntes nas praias é deduzido a partir das equações de Navier-Stokes, com base nas seguintes hipóteses:

Em relação ao fluido:

- › Fluido homogêneo;
- › Incompressível;
- › Densidade constante.

Em relação ao movimento:

› A variação do fundo do mar em relação à horizontal é lenta (acelerações verticais muito pequenas), o que implica que as principais características do sistema de correntes em praias estejam contidas na variação horizontal das propriedades integradas na profundidade, de modo que a velocidade de corrente (u,v) é independente da profundidade.

› Os movimentos associados às correntes de praia são permanentes, permitindo gerar equações médias que os representem no tempo (período da onda), o qual significa que para períodos de tempo maiores que o período da onda as variações temporárias são desprezíveis. Cada trem de ondas incidente cria seu próprio sistema circulatório de correntes.

› Os efeitos de viscosidade molecular são fracas, exceto em contornos, em consequência, pode ser admitido que o movimento oscilatório é essencialmente irrotacional (LONGUET-HIGGINS; STEWART, 1962).

› As flutuações turbulentas devidas às ondas são desprezíveis.

› É rejeitada a força de Coriolis.

› As correntes são suficientemente fracas para ser considerada sua interação com o trem de ondas.

• **Modelo de correntes de praia**

O modelo bidimensional de correntes em praia é deduzido das equações de Navier-Stokes. Se são integradas estas equações na profundidade e calculadas em um período de tempo médio em um sistema de coordenadas localizado no nível médio do mar (x = direção transversal à praia; y = direção longitudinal à praia; z = direção vertical) sob as hipóteses anteriormente apresentadas são obtidas as seguintes equações de continuidade e quantidade de movimento:

Continuidade:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Momentum:

› Direção x (transversal à praia):

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xx}) + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (S_{xy}) + \frac{gU}{C^2 H} (U^2 + V^2)^{1/2} \\ - \varepsilon \left[\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

› Direção y (longitudinal à praia):

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial x} (S_{xy}) + \frac{1}{\rho H} \frac{\partial}{\partial y} (S_{yy}) + \frac{gV}{C^2 H} (U^2 + V^2)^{1/2} \\ - \varepsilon \left[\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

onde:

$$H = \eta + h \quad (4)$$

$$S_{xx} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} (\rho u^2 + p) dz dt - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 p_0 dz dt \quad (5)$$

$$S_{yy} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} (\rho v^2 + p) dz dt - \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 p_0 dz dt \quad (6)$$

$$S_{xy} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} \rho uv dz dt \quad (7)$$

$$V = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} v(x, y, z, t) dz dt \quad (8)$$

$$\eta = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \eta(x, y, t') dt' \quad (9)$$

$$U = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} u(x, y, z, t) dz dt \quad (10)$$

Tensores de radiação devido à onda monocromática (modelo COPLA-MC)

Aplicando a teoria linear de ondas são obtidas as expressões para os tensores de radiação de 2^o ordem:

$$S_{xx}(x, y) = E \left(n \cos^2 \theta + n - \frac{1}{2} \right) \quad (11)$$

$$S_{yy}(x, y) = E \left(n \sin^2 \theta + n - \frac{1}{2} \right) \quad (12)$$

$$S_{xy}(x, y) = E \sin \theta \cos \theta \quad (13)$$

onde:

$$E = \frac{\rho g H_l^2}{8} \quad (14)$$

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \quad (15)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (16)$$

Com o qual os tensores de radiação, em cada ponto do domínio, dependem de (H_l, T, ϵ, h) , parâmetros que são obtidos a partir do “Modelo de Propagação de Onda” (OLUCA-MC) (IH CANTABRIA – MMA, 2017a).

Tensores de radiação devido à onda irregular (Modelo COPLA-SP)

Os tensores de radiação devidos a uma onda irregular são calculados com base nos tensores gerados por cada uma das componentes de energia. Tais componentes se propagam formando um ângulo θ em relação ao eixo x e à soma linear de todas estas, em um ponto do domínio, determinam as seguintes expressões dos tensores de radiação:

$$S_{xx}(x, y) = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \left[n_j (1 + \cos^2 \theta_{jl}) - \frac{1}{2} \right] \quad (11a)$$

$$S_{yy}(x, y) = \frac{1}{2} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 \left[n_j (1 + \sin^2 \theta_{jl}) - \frac{1}{2} \right] \quad (12a)$$

$$S_{xy}(x, y) = \frac{1}{4} \rho g \sum_{j=1}^{N_f} \sum_{l=1}^{N_\theta} |A_{jl}|^2 n_j \sin(2\theta_{jl}) \quad (13a)$$

$$n_j = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2K_j h}{\sinh 2K_j h} \right) \quad (15a)$$

As variáveis dependentes do problema são ζ , U , V , que representam a elevação da superfície livre sobre o nível de referência e as velocidades das correntes integradas na vertical em um período de tempo nas direções x e y, respectivamente.

As outras variáveis da equação são:

$A_{jl}(x, y)$ = Amplitude para uma componente frequencial j e direcional l , em uma onda irregular;

h =Profundidade até o nível de referência;

H =Profundidade total;

j =Componente frequencial em uma onda irregular;

l =Componente direcional em uma onda irregular;

n =Relação da velocidade do grupo c_g em relação à velocidade de fase c ;

η_j =Relação da velocidade de grupo c_{gj} em relação à velocidade c_j do componente frequencial j ;

t =Tempo;

T =Período da onda;

S_{xx} =Tensor de radiação atuando no plano x ao longo do eixo x ;

S_{xy} =Tensor de radiação atuando sobre o plano y ao longo do eixo x ;

S_{yy} =Tensor de radiação atuando no plano y ao longo do eixo y ;

$\zeta(x,y,t)$ =Elevação da superfície livre a partir do nível médio do mar;

u =Velocidade instantânea na direção x ;

v =Velocidade instantânea na direção y ;

E =Energia de onda monocromática;

k =Número de onda;

k_j =Número de onda associado a componente frequencial j ;

\hat{e} =Ângulo do vetor número de onda com o eixo x ;

θ_{jl} =Ângulo do vetor número de onda com o eixo x para um componente frequencial j e direcional l ;

c =Coeficiente de Chézy;

\hat{a} =Viscosidade turbulenta "Eddy viscosity";

P =Pressão total (dinâmica mais estática);

P_0 =Pressão estática a partir do nível médio de referência;

H_T =Altura de onda;

g =Aceleração da gravidade;

\tilde{n} =Densidade do fluxo.

2.3. Discussão de parâmetros

Os dois parâmetros importantes que influenciam no movimento das correntes são: a rugosidade do fundo, expressada pelo número de Chézy, c ($m^{1/2}/s$) e a viscosidade turbulenta "Eddy viscosity", ϵ .

• *Rugosidade do fundo*

O termo de atrito é um termo consumidor de quantidade de movimento devido ao atrito do fluxo (interação onda - corrente) com o fundo. Um grande quantidade de modelos de rugosidade na zona de arrebentação foi apresentado na literatura, como é o caso de Longuet-Higgins (1970), Thornton (1970), Jonsson (1966), Grant e Madsen (1979), Tanaka e Shuto (1981), onde apresentam sistemas combinados de onda-corrente. O principal problema destas formulações, em nível numérico, é a dificuldade de sua calibração devido à quantidade de parâmetros que intervêm e a dificuldade em alguns casos para sua medição. Tanto no COPLA-MC quanto no COPLA-SP são utilizadas expressões análogas às do fluxo em rios e estuários; que neste tipo de modelos funcionaram apropriadamente:

Em x :

$$\frac{gU}{c^2H} (U^2 + V^2)^{1/2} \quad (17)$$

Em y :

$$\frac{gV}{c^2H} (U^2 + V^2)^{1/2} \quad (18)$$

Como pode ser observado, o termo de rugosidade depende da profundidade; para menor profundidade, maior resistência ao fluxo, consumindo maior quantidade de movimento, também depende das velocidades médias e de um coeficiente denominado de Chézy, c .

Coeficiente de atrito de Chézy (Modelo COPLA-MC)

Para o caso de correntes a partir de uma onda monocromática, foi implementada uma formulação de rugosidade constante ($c = \text{cte.}$) em todo o domínio de cálculo.

A faixa de variabilidade recomendada nas praias para este tipo de formulação de atrito com c está entre (5 e 20 $\text{m}^{1/2}/\text{s}$). Este é um valor muito menor que o típico em áreas de estuários e rios (30 a 50 $\text{m}^{1/2}/\text{s}$), devido ao grande atrito gerado pela onda.

O modelo avalia o coeficiente de rugosidade de Chézy, c ($\text{m}^{1/2}/\text{s}$) como uma função espacial e temporal da hidrodinâmica e das características dos sedimentos do fundo.

$$c(x, y, t) = 18 \log \left(\frac{12H}{K_{swc}} \right) \quad (18a)$$

onde x, y são as coordenadas espaciais no plano $t = \text{tempo}$, $H(x, y, t)$ é a profundidade total em metros e $K_{swc}(x, y, t)$ é a rugosidade efetiva em metros.

A rugosidade hidráulica representada por K_{swc} é um fluxo com fundo móvel, definido como:

$$K_{swc} = K_s + K_{sf} \quad (18b)$$

onde K_s : é a rugosidade associada ao tamanho dos sedimentos do fundo, rugosidade de Nikuradse (VAN RIJN (1993, 1984 a, b); HEY (1979); GLADKI (1975); KAMPHUIS (1974); EINSTEIN (1950)). E K_{sf} é a rugosidade associada às formas do leito, devido à interação onda - corrente (VAN RIJN (1993, 1984 a, b); YALIN (1972)).

Normalmente, em fluxos de corrente (fluxo em caudais, rios, etc.) sem a presença da onda, a rugosidade efetiva é uma ordem de magnitude menor

$(K_s \sim 0,1 K_{swc})$. Propõe-se no modelo com variação recomendada $(0,0 < K_{swc} \leq 2,0)$, definindo-se por padrão em áreas de praia com interação onda-corrente ($K_{swc} = 1,0$ m).

• **Viscosidade turbulenta**

Este parâmetro é utilizado para descrever a "turbulência" na zona de arrebentação. Assumindo que a turbulência nesta área é isotrópica, o termo de turbulência é escrito usualmente da seguinte forma:

Em x:

$$\varepsilon \left[\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \right] \quad (19)$$

Em y:

$$\varepsilon \left[\left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \right] \quad (20)$$

Esta expressão é baseada na analogia com o fluxo laminar, onde os tensores de cisalhamento são assumidos proporcionais ao gradiente da velocidade média.

A intensidade da turbulência causada pela quebra das ondas está distribuída em toda a zona de arrebentação. O conhecimento atual sobre a difusão da turbulência, no entanto, não é suficiente e uma discussão em detalhe relacionada a este parâmetro é impossível hoje em dia. Muitas expressões têm sido propostas para ε ; Bowen (1969), Thornton (1970), Longuet-Higgins (1979). Sawaragi (1992) apresenta um resumo de formulações feitas para este parâmetro em correntes de praias, mas nenhuma delas deixa de ser mais que uma hipótese.

A turbulência, da mesma forma que o atrito, é consumidora de quantidade de movimento e começa a ser mais importante que o termo de atrito para maiores profundidades, na ordem do tamanho dos elementos da malha.

Neste modelo é permitido, da mesma forma que com c , definir ε como uma constante em toda a malha.

Como pode ser visto nas equações (19) e (20), o termo de turbulência relaciona de alguma forma as velocidades médias (U, V) com o tamanho de malha ($\Delta x, \Delta y$) e o parâmetro de viscosidade turbulenta, \hat{a} .

É definida como área recomendada para ε ;

$$\varepsilon_{min} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{max} \quad (20a)$$

onde:

$$\varepsilon_{max} = \frac{\Delta s^2}{8\Delta t} \text{ com } \Delta s = \text{mínimo} (\Delta x, \Delta y) \quad (20b)$$

Para obter uma ordem de magnitude de \hat{a} , pode ser aplicada a seguinte relação empírica:

$$\varepsilon_{min} = \frac{\varepsilon_{max}}{10} \quad (20c)$$

onde K_2 é um parâmetro entre [1,5~2,5] e U é a velocidade média na zona de arrebenção.

$$\varepsilon = K_2 \Delta x U \quad (21)$$

Adotando $K_2 \sim 2$ e $U \sim 0,5$ m/s, obtém-se que $\hat{a} \sim \Delta x$, o qual é uma ordem de magnitude adequada para definir a viscosidade turbulenta na zona de arrebenção. Um valor típico para ε em praias varia entre 15 e 25, que são tamanhos típicos das malhas na zona de arrebenção.

**CAPÍTULO 3: FORMULAÇÃO NUMÉRICA DO
PROBLEMA**

3. Formulação Numérica do Problema

3.1. Introdução

No presente capítulo é descrita a resolução numérica do problema, cujas equações foram apresentadas no capítulo anterior. Na segunda seção é comentado sobre a discretização do domínio; na terceira, sobre as condições iniciais; na quarta seção são tratadas as condições de contorno; na quinta é comentado o método numérico com que são resolvidas as equações, e nas duas últimas seções é tratada a implementação numérica das condições de contorno e a estabilidade numérica do modelo.

3.2. Discretização do domínio

Para a aplicação do modelo para um caso geral na praia, as equações apresentadas no capítulo anterior são resolvidas mediante um método de diferenças finitas sobre uma malha retangular.

A resolução numérica das equações necessita transformar o domínio contínuo em um domínio discreto, formado por uma malha mais ou menos densa de pontos ou nós nos quais se definem cada uma das variáveis que intervêm no problema.

Dado que os modelos COPLA-MC e COPLA-SP utilizam as saídas de onda dos modelos OLUCA-MC e OLUCA-SP, as malhas com a batimetria são as mesmas. Na Figura 1 é apresentado um esquema da malha de referência, com a orientação do sistema de eixos de referência e dimensionamento.

3.3. Condições iniciais

As condições iniciais são a sobrelevação da água e as velocidades nas direções x e y no domínio do modelo para o instante $t = 0$.

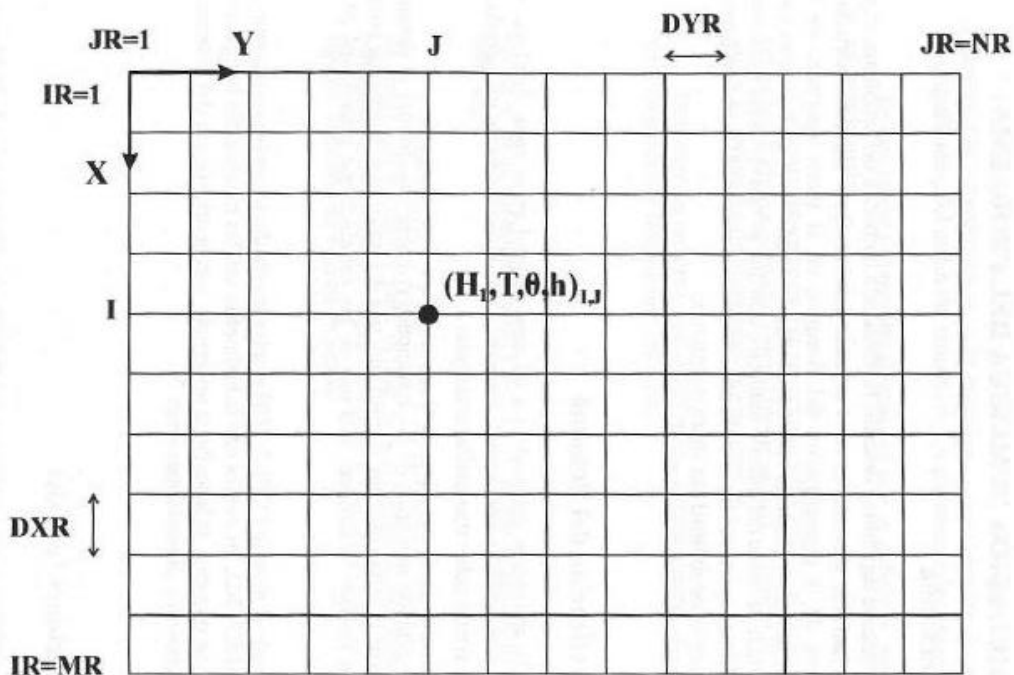


Figura 1 – Malha de referência com os dados de entrada ao COPLA (MC/SP) (altura de onda H_1 , período de onda T , direção da onda θ , profundidade da água, h).

$$\begin{aligned} \eta_{t=0} &= \eta_0(x, y) \\ U_{t=0} &= U_0(x, y) \\ V_{t=0} &= V_0(x, y) \end{aligned} \tag{22}$$

No entanto, as funções ζ_0 , U_0 e V_0 normalmente não são conhecidas, por isso habitualmente estas funções são assumidas como zero.

A partir desta condição em repouso, são aplicados a cada um dos pontos da malha os tensores de radiação devido à quebra da onda, e o sistema precisa de um tempo para obter uma solução estável, onde U , V e ζ tendem a ser constantes ao longo do tempo.

Para o caso do modelo COPLA-MC, as condições iniciais são obtidas a partir dos arquivos de saída do programa OLUCA-MC (AABBOUT.DAT e AABBIN.DAT). Quanto ao modelo COPLA-SP, os arquivos de entrada são lidos a partir dos arquivos de saída do modelo OLUCA-SP (AABBOUT.DAT, AABBIN.DAT e AABBRAD.DAT). Onde, a partir da execução dos programas OLUCA-MC e OLUCA-SP sobre uma

malha com a batimetria, e os parâmetros iniciais da onda em águas profundas (caso monocromático: altura de onda, direção, período e nível de maré; caso espectral: espectro frequencial TMA e direcional, em um nível de maré), são obtidos em cada um dos pontos da malha os parâmetros de entrada para o COPLA-MC e COPLA-SP, que são: (1) as alturas de onda propagadas, (2) a direção, (3) o período de onda, e (4) a profundidade da água, tal e como é mostrada na Figura 1.

A partir destes valores de onda, o modelo COPLA-MC avalia os gradientes dos tensores de radiação. Por outro lado, o modelo COPLA-SP lê estes valores diretamente como saída do OLUCA-SP.

3.4. Condições de contorno

As equações (1), (2) e (3) têm que ser completas com condições apropriadas de contorno. Do um ponto de vista físico, torna-se necessário definir as seguintes condições de contorno:

- › No fundo
- › Na superfície livre
- › Na linha da costa
- › Em mar aberto
- › Laterais (abertas e fechadas).

Na Figura 2 aparece um esquema da malha de cálculo das ondas e o sistema de correntes, onde também é mostrado o sistema de referência dos eixos e o esquema adotado de condições de contorno para o cálculo das correntes.

• **Condição de contorno no fundo**

Existe uma condição de fricção de fundo, a qual é considerada através do coeficiente de Chézy (Equações 17 e 18).

A batimetria deve cumprir uma relação de declividade máxima 1:3 para que sejam cumpridas as hipóteses do modelo de correntes em praias. A batimetria

corresponde às profundidades em cada um dos nós da malha e é uma entrada ao programa de propagação da onda. Os programas COPLA-(MC/SP) lêem a batimetria diretamente do arquivo de saída dos programas OLUCA-(MC/SP).

- **Condição de contorno na superfície livre**

Como condição de contorno de tensão normal na superfície livre, nas equações (1) e (2) presume-se uma pressão atmosférica constante em todo o domínio do modelo.

- **Condição de contorno na linha da costa**

O contorno na costa pode corresponder a áreas de praia ou de costão rochoso; nas duas situações se assume uma condição de reflexão total. Isto significa que a componente de velocidade normal à linha da costa é nula, enquanto que na componente tangencial não é imposta nenhuma condição. A condição de linha da costa é definida nas últimas linhas em X , onde é recomendado que seja localizada a área da praia (Figura 2).

- **Condição de contorno em mar aberto**

O contorno para o mar aberto é uma linha fictícia que separa o domínio do modelo do resto do mar (Figura 2). É evidente então que, para uma correta simulação, é necessário conhecer as características hidrodinâmicas deste contorno, seja em termos de velocidades, seja em níveis. Foi utilizada uma condição de contorno do nível médio nulo ($\zeta(t) = 0$) do tipo absorvente, que permite que a onda refletida no interior do domínio fluido possa sair do mesmo. Sendo evitados assim os problemas numéricos (não convergência da solução, *overflow*, etc.) produzidos pela sucessiva superposição das ondas incidentes e refletidas. O impor ($\zeta(t) = 0$) implica que este contorno deve estar o suficientemente afastado da zona de quebra (gradientes dos tensores de radiação praticamente nulos).

• Condições de contorno laterais

Existem dois tipos: abertos e fechados. Os abertos são os que permitem um intercâmbio do fluxo, com o qual as velocidades e elevação do nível médio não se impõem como nulas ($U \neq 0$, $V \neq 0$ e $\zeta \neq 0$). Adicionalmente, é aplicada uma condição absorvente que permite sair às ondas longas geradas dentro do domínio. Por outro lado, nos contornos fechados se impõe uma condição de reflexão, com velocidade normal nula ($V = 0$) (ver as condições de contorno laterais no esquema da Figura 2).

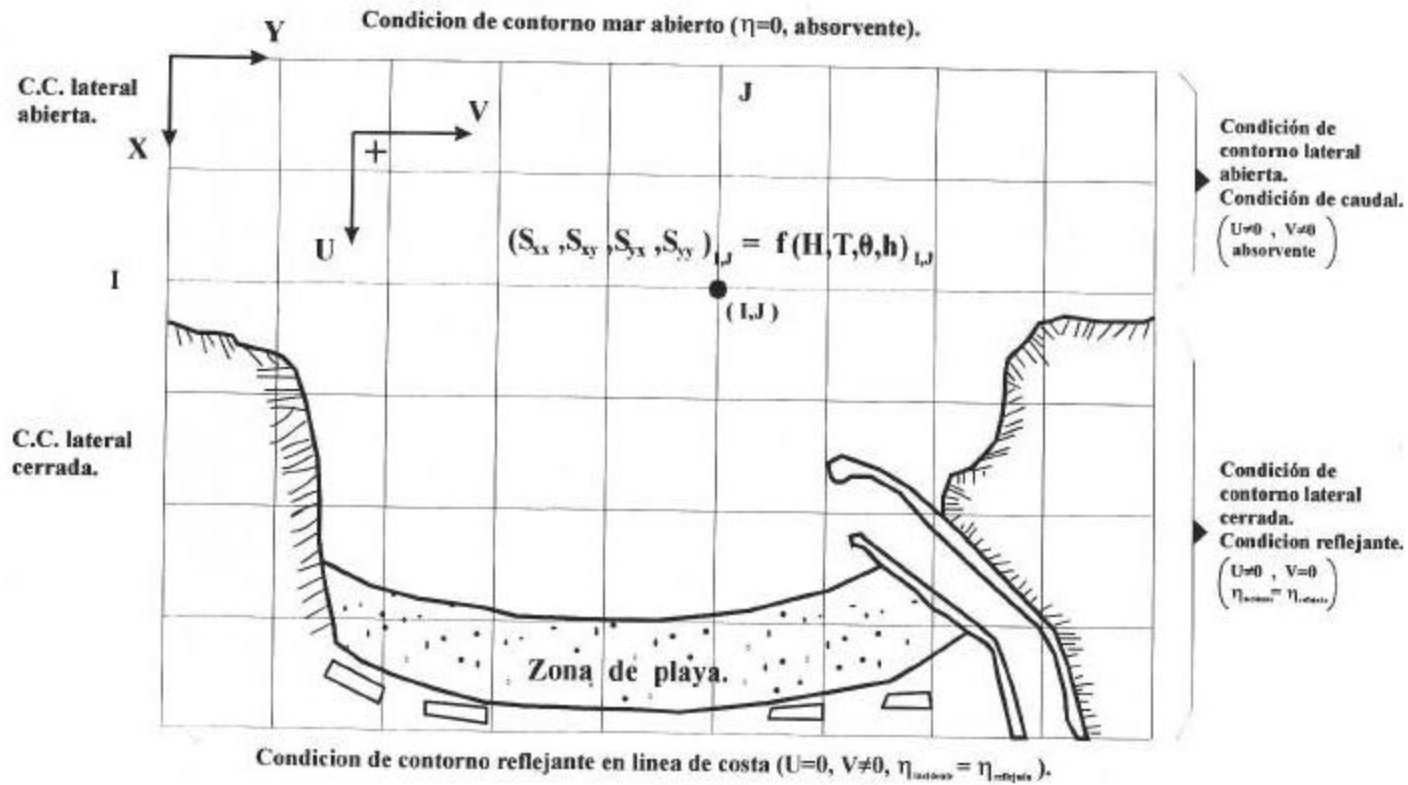


Figura 2 – Esquema geral das condições de contorno.

3.5. Método de resolução

- **Técnica de solução numérica**

Para resolver o sistema de equações bidimensionais de movimento (1), (2) e (3), é utilizado um método implícito de direção alternada usado por Leendertse (1970). As equações lineares do movimento podem ser escritas em forma de matriz e o método para sua resolução utiliza um esquema centrado com dois níveis de tempo, resultando em uma aproximação de segunda ordem em espaço e tempo. O primeiro passo no procedimento computacional consiste em uma varredura da malha no eixo x para, posteriormente, fazer uma varredura no eixo y. Uma vez concluídas as duas varreduras, avança-se meio período de tempo, repetindo-se o processo mais uma vez até completar todo o período de tempo. O método de resolução é muito eficiente.

Uma possível discretização segundo este método é descrito a seguir. O esquema de diferenças finitas no espaço é apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 – Esquema das diferenças finitas no espaço

j+1	ç	U	ç	U	ç
j+1/2	V	h	V	h	V
j	ç	U	ç	U	ç
j-1/2	V	h	V	h	V
j-1	ç	U	ç	U	ç
	i-1	i-1/2	i	i+1/2	i+1

Na Figura 3 é apresentada outra representação da Tabela 1, através de caudais definidas como:

$$Q = (\eta + h)V \tag{23}$$

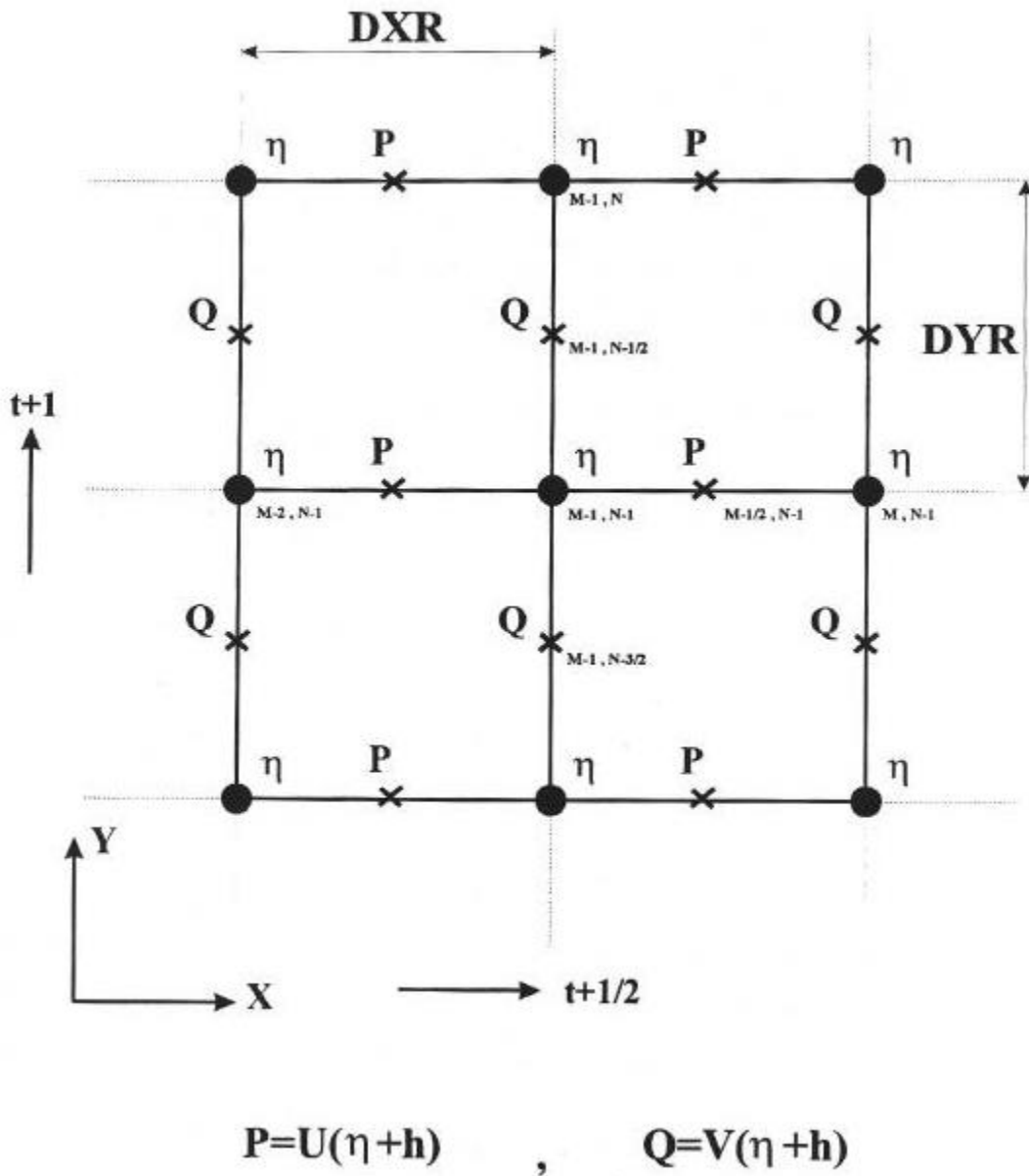


Figura 3 – Representação gráfica do esquema numérico do cálculo de correntes e nível médio.

$$P = (\eta + h)U \tag{24}$$

A solução no tempo é obtida na seguinte ordem:

Em t → se conhecem U, V, ζ .

Em $t + \Delta t/2$ → se resolve U, ζ implicitamente, e V explicitamente.

Em $t + \Delta t$ → se resolve V, ζ implicitamente, e U explicitamente.

As expressões numéricas das equações (1), (2) e (3) sem incluir termos turbulentos, para a passagem de t para $t+\Delta t$ em alguns pontos da Figura 3 são da seguinte forma:

a. Passagem até $t+\Delta t/2$

Equação da quantidade de movimento no ponto ($i = M-1/2, j = N-1$):

$$P_{i,j}^{t+\Delta t/2} = P_{i,j}^t - \Delta t \left\{ P^t \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\overline{D_x}} \right)^t + \overline{Q}^t \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P}{\overline{D_x}} \right)^t + g \overline{D_x} \frac{\partial}{\partial x} (\eta)^{t+\Delta t/2} + \frac{g P^{t+\Delta t/2} \sqrt{(P^t)^2 + (\overline{Q}^t)^2}}{C_x^2 (\overline{D_x}^t)^2} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\delta S_{xx}}{\delta x} + \frac{\delta S_{xy}}{\delta y} \right) \right\}$$

onde:

$$D = h + \zeta$$

$$P = DU$$

$$Q = DV$$

$$\overline{D_x} = \frac{1}{4} (D_{i+\frac{1}{2},j} + D_{i-\frac{1}{2},j})$$

$$\overline{Q} = \frac{1}{4} (Q_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + Q_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + Q_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + Q_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}})$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{\overline{D_x}} \right)^t = \frac{1}{2\Delta x} \left[\left(\frac{P}{\overline{D_x}} \right)_{i+1,j}^t - \left(\frac{P}{\overline{D_x}} \right)_{i-1,j}^t \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{P}{\overline{D_x}} \right)^t = \frac{1}{2\Delta y} \left[\left(\frac{P}{\overline{D_x}} \right)_{i,j+1}^t - \left(\frac{P}{\overline{D_x}} \right)_{i,j-1}^t \right]$$

$$\frac{\partial \eta^{t+\frac{1}{2}}}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} \left[\eta_{i+\frac{1}{2},j}^{t+\frac{1}{2}} - \eta_{i-\frac{1}{2},j}^{t+\frac{1}{2}} \right]$$

$$\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} \left[(S_{xx})_{i+\frac{1}{2},j} - (S_{xx})_{i-\frac{1}{2},j} \right]$$

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial y} = \frac{1}{4\Delta y} \left[(S_{xy})_{i+\frac{1}{2},j+1} - (S_{xy})_{i+\frac{1}{2},j-1} + (S_{xy})_{i-\frac{1}{2},j+1} - (S_{xy})_{i-\frac{1}{2},j-1} \right]$$

Equação de continuidade para o ponto ($i = M-1, j = N-1$):

$$\eta^{t+\frac{1}{2}} = \eta^t - \frac{\Delta t}{2} \left\{ \frac{\partial P^{t+\frac{1}{2}}}{\partial x} + \frac{\partial Q^t}{\partial y} \right\} \quad (26)$$

onde:

$$\frac{\partial Q^t}{\partial y} = \frac{1}{\Delta y} (Q^t_{i,j+\frac{1}{2}} - Q^t_{i,j-\frac{1}{2}})$$

$$\frac{\partial P^{t+\frac{1}{2}}}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta x} (P^{t+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j} - P^{t+\frac{1}{2}}_{i-\frac{1}{2},j} + P^t_{i+\frac{1}{2},j} - P^t_{i-\frac{1}{2},j})$$

b. Instante ($t + \Delta t$)

Equação de quantidade de movimento no ponto ($i = M-1, j = N-1/2$):

$$Q^t_{i,j} = Q^t_{i,j} - \Delta t \left\{ \overline{P^{t+\frac{1}{2}}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{\overline{D_y}} \right)^t + Q^t \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q}{\overline{D_y}} \right)^t + g \overline{D_y} \frac{\partial}{\partial y} (\eta)^{t+1} + \frac{g Q^{t+1} \sqrt{\left(\overline{P^{t+\frac{1}{2}}} \right)^2 + (Q^t)^2}}{C_y^2 (\overline{D_y}^2)^t} + \frac{1}{g} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \right\} \quad (27)$$

onde:

$$\overline{D_y} = \frac{1}{2} (D_{i,j+\frac{1}{2}} + D_{i,j-\frac{1}{2}})$$

$$\bar{P} = \frac{1}{4} \left(P_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + P_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + P_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + P_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \right)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q}{D_y} \right)^t = \frac{1}{2\Delta x} \left[\left(\frac{Q}{D_y} \right)^t_{i+1,j} - \left(\frac{Q}{D_y} \right)^t_{i-1,j} \right]$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q}{D_y} \right)^t = \frac{1}{2\Delta y} \left[\left(\frac{Q}{D_y} \right)^t_{i,j+1} - \left(\frac{Q}{D_y} \right)^t_{i,j-1} \right]$$

$$\frac{\partial \eta^{t+1}}{\partial y} = \frac{1}{\Delta y} \left[\eta_{i,j+\frac{1}{2}}^{t+1} - \eta_{i,j-\frac{1}{2}}^{t+1} \right]$$

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} = \frac{1}{4\Delta x} \left[(S_{xy})_{i+1,j+\frac{1}{2}} - (S_{xy})_{i-1,j+\frac{1}{2}} + (S_{xy})_{i+1,j-\frac{1}{2}} - (S_{xy})_{i-1,j-\frac{1}{2}} \right]$$

$$\frac{\partial S_{yy}}{\partial x} = \frac{1}{\Delta y} \left[(S_{yy})_{i,j+\frac{1}{2}} - (S_{yy})_{i,j-\frac{1}{2}} \right]$$

Equação de continuidade no ponto ($i = M-1, j = N-1$):

$$\eta^{t+1} = \eta^{t+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{2} \left\{ \frac{\partial P^{t+\frac{1}{2}}}{\partial x} + \frac{\partial Q^{t+1}}{\partial y} \right\} \quad (28)$$

onde:

$$\frac{\partial Q^{t+1}}{\partial y} = \frac{1}{\Delta y} (Q_{i,j+\frac{1}{2}}^{t+1} - Q_{i,j-\frac{1}{2}}^{t+1})$$

$$\frac{\partial P^{t+\frac{1}{2}}}{\partial x} = \frac{1}{2\Delta x} (P_{i+\frac{1}{2},j}^{t+\frac{1}{2}} - P_{i-\frac{1}{2},j}^{t+\frac{1}{2}} + P_{i+\frac{1}{2},j}^t - P_{i-\frac{1}{2},j}^t)$$

A aplicação da equação apropriada a uma fileira ou coluna da malha transforma o sistema em um sistema de equações lineares, cujo coeficiente matricial é tridiagonal. Os problemas das matrizes tridiagonais podem ser solucionados diretamente, sem a necessidade de inverter as matrizes.

À medida em que é resolvida cada passo de tempo, vão sendo obtidos os valores da velocidade (U , V) e de superfície livre (ζ) em cada um dos pontos da malha. O resultado final é o campo de velocidades e níveis para cada ponto ao longo do tempo.

3.6. Implementação numérica de condições de contorno

Tal como mencionado anteriormente, a malha de cálculo para o programa de correntes é a mesma malha de cálculo da propagação de ondas, com MR linhas em x e NR colunas em y (Figura 4). Devido ao fato de que o cálculo dos gradientes dos tensores de radiação utiliza um esquema centrado de diferenças finitas, somente são obtidos resultados de velocidades (U , V) e elevação média do mar (ζ) na malha de pontos representada na Figura 4, malha com dimensões $(MR-2)$ em x e $(NR-2)$ em y .

• *Condição de contorno em mar aberto*

Como se supõe que esse contorno seja suficientemente afastado da área onde as ondas se quebram, presume-se que os gradientes dos tensores de radiação sejam praticamente nulos, com o que se observa que:

$$\eta_{1,j} = 0 \quad \forall j[1, \dots, NR - 2] \quad (29)$$

• *Condição de contorno na linha da costa*

O modelo supõe que todos os pontos da última linha em $(I = MR-2)$ são pontos da costa com reflexão total (Figura 4). Com o qual, qualquer espaço aberto deixado pelo usuário nesta última linha, o programa supõe que é terra. A condição de reflexão total em um contorno fechado da última linha é definido como:

$$\eta_{MR-2,J} = 0 \quad \forall J[1, \dots, NR - 2] \quad (30)$$

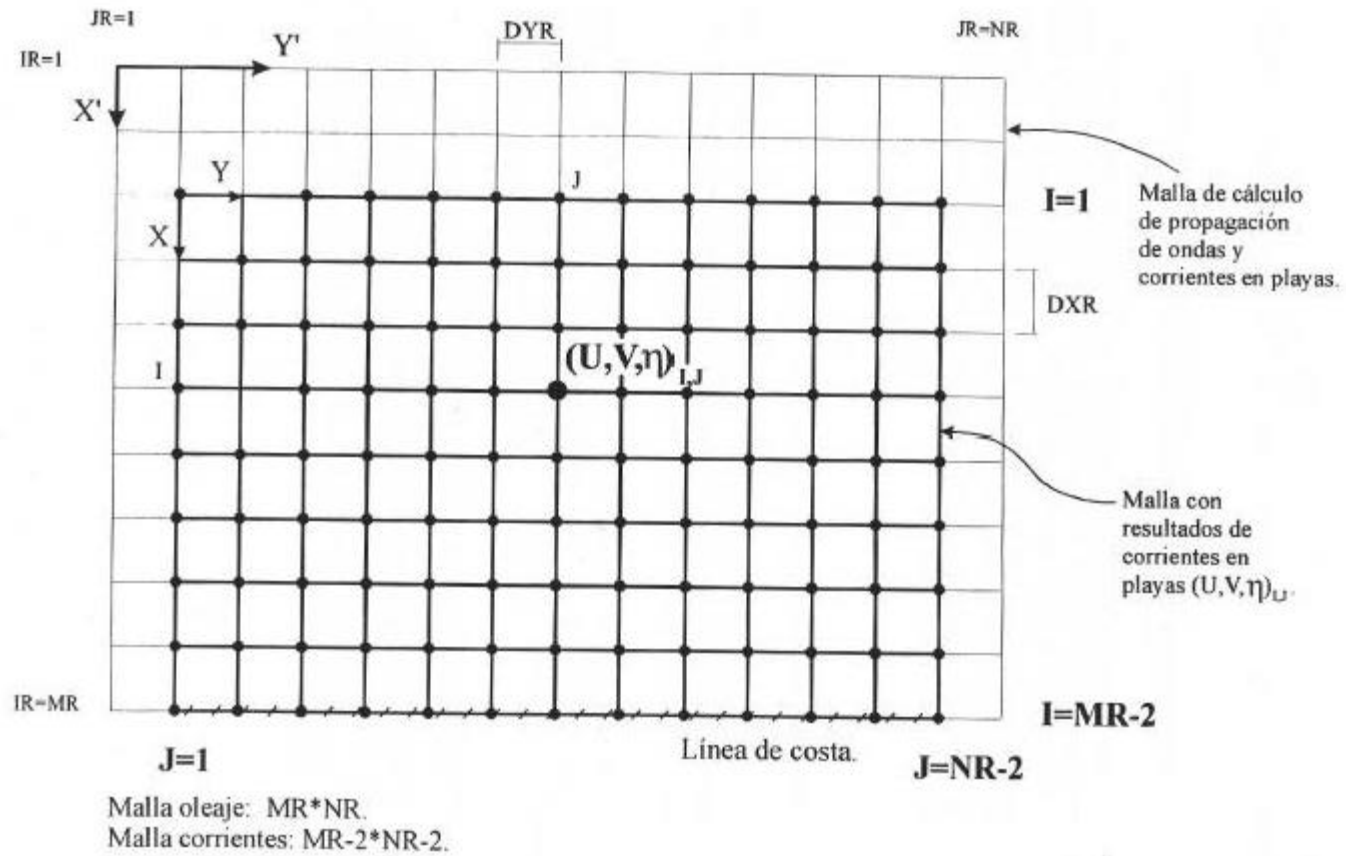


Figura 4 – Malha de resultados para a propagação de onda OLUCA-(MC/SP) e as correntes por quebra COPLA-(MC/SP).

• **Condição de contorno lateral**

Fechada:

Qualquer elemento de contorno lateral fechado (ver a Figura 2) deve incluir nós de terra na malha de resultados (malha de pontos na Figura 4). Se o contorno fechado só for localizado nas colunas $JR = 1$ e/ou $JR = NR$, o modelo é representado nos resultados como um contorno lateral aberto

A condição que é aplicada para este contorno fechado é de reflexão total:

$$V_{i,1} = 0 \quad \forall i[1, \dots, MR - 2] \quad (31)$$

$$V_{i,NR-2} = 0 \quad \forall i[1, \dots, MR - 2] \quad (32)$$

Aberta:

É imposta uma condição de caudal e absorvente, definida como:

$$V_{i,1}^{t+1} = V_{i,2}^t \quad \forall i[1, \dots, MR - 3] \quad (33)$$

$$V_{i,NR-2}^{t+1} = V_{i,NR-3}^t \quad \forall i[1, \dots, MR - 3] \quad (34)$$

3.7. Estabilidade numérica do modelo

• **Discretização temporal, Δt .**

O intervalo de tempo para os cálculos deve cumprir a relação de estabilidade de Courant, definida pela seguinte expressão:

$$\Delta t = \frac{cU\Delta x}{\sqrt{gD} + U} \quad (35)$$

onde:

Δt = Intervalo de tempo de cálculo;

Δx = Discretização espacial do tamanho da malha (DXR, DYR);

D = Profundidade máxima do domínio;

U = Ordem de magnitude da velocidade média esperada;

cU = Número de Courant, onde $cU = 10$ quando não são levadas em conta os termos não lineares, $cU = 2$ com termos não lineares;

g = Aceleração da gravidade.

• **Discretização espacial, DXR e DYR**

Este parâmetro é selecionado anteriormente como limitante do modelo de propagação de onda, o qual necessita definir, pelo menos, 10 pontos ao longo do comprimento da onda propagada.

Para resolver o sistema, uma estimativa do tamanho dos elementos da malha pode ser obtida mediante a relação:

$$DXR = \frac{L}{10} \propto \frac{\sqrt{ghT}}{10} \quad (36)$$

Onde T é um período de onda médio e h uma profundidade média da área de estudo.

Para maior detalhe, ver na seção “tamanhos de malha” no “Manual de Referência do OLUCA” (IH CANTABRIA – MMA, 2017a,b).

3.8. Arquivos de entrada e saída do programa COPLA – (MC/SP)

Os casos de execução são identificados por uma palavra [CHAVE] de quatro caracteres alfanuméricos:

Arquivos de entrada

[chave]out.dat: Arquivo de saída tanto do programa de propagação de onda OLUCA-MC, quanto do OLUCA-SP. Os quais incluem a batimetria, altura de onda, direções, tamanho de malha, DXR, DYR. Ainda que a estrutura destes dois arquivos seja diferente para cada versão de OLUCA, seu conteúdo é muito similar.

[chave]dat: Arquivo com a informação da malha e coeficientes de calibração:

- › Intervalo de tempo em segundos;
- › Coeficiente de atrito de Chézy;
- › Tempo de duração da execução;
- › Viscosidade turbulenta;
- › Opção de termos não lineares
- › Geração de arquivos de evolução de U, V, ζ no tempo, de diferentes pontos da malha, para verificar que o sistema alcance um estado de equilíbrio.

Um exemplo deste arquivo é mostrado na Figura 5.

[chave]rad.dat. Este arquivo só serve como entrada para o modelo COPLA-SP, contém os tensores de radiação obtidos a partir da onda irregular.

EJEMPLO DEL FICHERO DE DATOS PARA CORRIENTES EN LA PLAYA

```

*
*
*
* FICHERO DE DATOS PARA CORRIENTES EN LA PLAYA
*
* F (2F10.3,3I5)
* IT = INTERVALO DE TIEMPO
* ROZA = RUGOSIDAD DE CHEZY --> 1/Mannig
* NT = NUMERO DE ESCRITURAS EN FICHERO
* REPE = NUMERO DE ITERACIONES ENTRE LAS ESCRITURAS
* IESDAO = NUMERO DE REPE'S HASTA LA PRIMERA ESCRITURA
*
* EN TOTAL LAS ITERACIONES SON --> ((NT-1)*REPE + IESDAO*REPE)
* HAY QUE CUMPLIR LA CONDICION --> (NN >= (NT-1)*REPE + IESDAO*REPE)
*
* IT ROZA NT REPE IESDAO
* *****.#####.#####.#####
* 1.500 15.000 1 150 1
*
* EDDY = FACTOR EDDY VISCOSITY
* CORI = FACTOR DE CORIOLIS
* NINTER= NUMERO ITERACIONES EN TERMINOS NO LINEALES
* F (2F10.3,I5)
* EDDY CORI NINTER
* 30.000 0.000 3
*
* IANL = TERMINOS NO LINEALES (SI = 1)
* IAGUA = INUNDACION DE CELDAS (SI = 1)
* ISLIP = CONTORNOS SIN FRICCION (SI = 1)
* F (3I5)
* IANL IAGUA ISLIP
* 1 0 0
*
*
* COORDENADAS DE PUNTOS DONDE SE DESEE TENER UN FICHERO EN EL TIEMPO
* DE SUPERFICIE LIBRE (ETA), VELOCIDAD (U), VELOCIDAD (V).
* F (15 )
* *NUMERO DE PUNTOS (MAXIMO 10 PUNTOS)
* 3
* F (2I5)
* *DAR LAS COORDENADAS EN (I,J) DE CADA PUNTO
* I J
* 15 30
* 30 30
* 40 30

```

Figura 5 – Exemplo do arquivo de dado [chave].dat para correntes em praias.

Arquivos de saída**• Modelo COPLA-MC**

[chave]vel.001: Arquivo com as velocidades médias calculadas no tempo e na vertical. (U,V), em cada um dos nós da malha, em um instante determinado de tempo.

[chave]sup.001: Arquivo com os valores do nível médio (ζ).

H.dat: Arquivo com a evolução temporal do nível médio (η), em diferentes pontos do domínio.

U.dat: Arquivo com a evolução temporal de velocidades (U), em diferentes pontos do domínio.

V.dat: Arquivo com a evolução temporal de velocidades (V), em diferentes pontos do domínio.

• Modelo COPLA-SP

[chave]uvh.001: Arquivo com as velocidades médias (U,V) e o nível médio (η).

[chave]H.dat: Arquivo com a evolução temporal do nível médio (η), em diferentes pontos do domínio.

[chave]U.dat: Arquivo com a evolução temporal da velocidade (U), em diferentes pontos do domínio.

[chave]V.dat: Arquivo com a evolução temporal da velocidade (V), em diferentes pontos do domínio.

**CAPÍTULO 4: ESTRUTURA DO CÓDIGO DO
PROGRAMA**

4. Estrutura do Código do Programa

4.1. Introdução

Os programas COPLA-MC e COPLA-SP foram desenvolvidos pelo Grupo de Engenharia Oceanográfica e de Costas da Universidade de Cantabria. Estes programas foram aplicados e comparados em diferentes estudos de Engenharia Litoral desde 1992, obtendo-se bons resultados. Adiante, quando se refere ao programa COPLA, faz-se menção aos dois modelos.

A resolução de um problema geral de correntes em praias necessita seguir o seguinte processo:

Em primeiro lugar, executar o correspondente programa OLUCA-(MC ou SP) com o objetivo de obter o campo de onda propagado (H, T, ϵ, h) na área de estudo.

Posteriormente, a partir destes dados de onda e batimetria, o COPLA lê isto como dados de entrada no programa.

No caso do COPLA-MC, este calcula os tensores de radiação em cada um dos nós da malha e avalia os gradientes desses tensores para uma malha mais reduzida (ver Figura 4). Por outro lado, o COPLA-SP lê para essa malha reduzida, os tensores já calculados a partir do OLUCA-SP.

Finalmente, eles solucionam numericamente as equações de quantidade de movimento e continuidade, incorporando os tensores de radiação como elementos matrizes do sistema.

Os dados de saída do programa são as velocidades médias (U, V) e a elevação do nível médio do mar, ζ , em cada um dos pontos da malha reduzida.

4.2. Descrição de sub-rotinas

Os “Modelos de Correntes em Praias” (COPLA) estão estruturados em um Programa Principal e 16 Sub-rotinas, sem chamar programas ou pacotes externos (na Figura 6 são apresentados esquemas gerais da estrutura do programa).

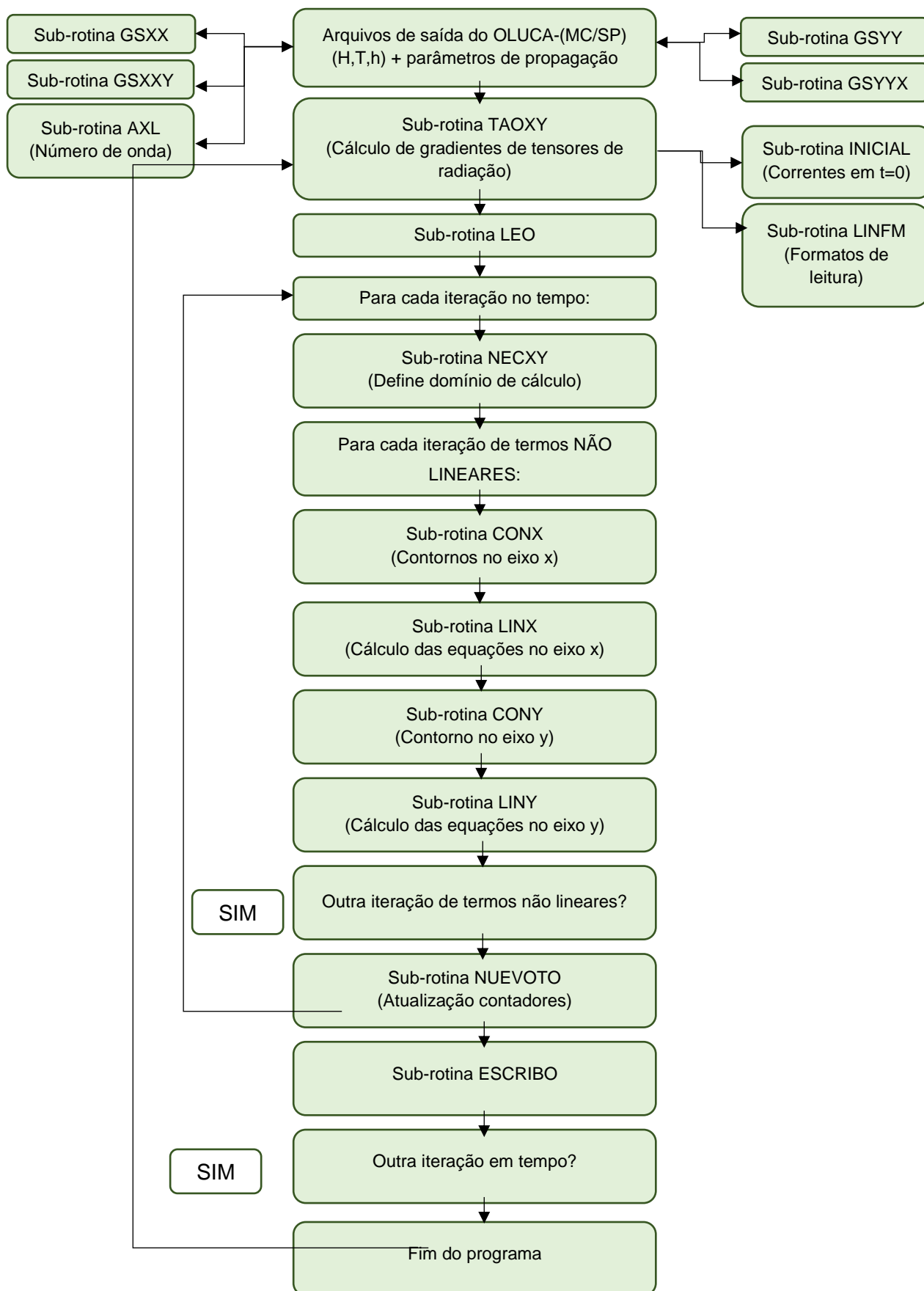


Figura 6 – Copla-(MC/SP): Esquema global dos programas

O programa está codificado em FORTRAN77, sendo aceito por qualquer compilador que leia tal linguagem.

1. Sub-rotina TAOXY

- É chamada no Programa Principal.
- Lê os arquivos de saída do OLUCA-MC.
- Calcula os tensores de radiação.
- Calcula os gradientes dos tensores de radiação.
- Chama as sub-rotinas: GSXX, GSXXY, GSYX, GSYYX.
- Chama a função: AXL.

2. Sub-rotina LEO

- É chamada no Programa Principal.
- Lê o arquivo com parâmetros de fluxo e de execução de correntes.
- Inicializa as variáveis de contorno.
- Chama as sub-rotinas: INICIAL e LINFM.

3. Sub-rotina NECXY

- É chamada no Programa Principal.
- Determina a área espacial de cálculo, definindo áreas de água e terra.

4. Sub-rotina CONX

- É chamada a partir do Programa Principal.
- Define o tipo de contorno na primeira e última linha em x.

5. Sub-rotina LINX

- É chamada a partir do Programa Principal.
- Resolve numericamente as equações (1), (2) e (3) para as linhas em x , no tempo $t+\Delta t/2$, sendo o cálculo de U e ζ implícito e o cálculo de V explícito.

6. Sub-rotina CONY

- É chamada a partir do Programa Principal.
- Define o tipo de contorno na primeira e última linha em y .

7. Sub-rotina LINY

- Esta sub-rotina é chamada a partir do Programa Principal.
- Resolve numericamente as equações (1), (2) e (3), para as linhas em y no tempo $t+\Delta t$, sendo o cálculo de V e ζ implícito e o cálculo de U explícito.

8. Sub-rotina NUEVOTO

- Esta sub-rotina é chamada a partir do Programa Principal.
- Atualiza as quantidades temporais do programa.

9. Sub-rotina ESCRIBO

- É chamada a partir do Programa Principal.
- Escreve os resultados de U, V e ζ em cada iteração de tempo em arquivos de saída.

10. Sub-rotinas GSXX, GSXXY, GSYY e GSYYX

-
- Estas sub-rotinas são chamadas a partir de **TAOXY**.
 - Calculam os gradientes dos tensores de radiação com base nos dados de ondas e batimetria em cada ponto da malha.

11. Função AXL

- É chamada a partir de **TAOXY**.
- Calcula o número de onda $K = 2\pi/L$, onde L é o comprimento de onda em cada ponto da malha, $L = f(H1, T, h)$.

12. Sub-rotina INICIAL (não atua no programa)

- Sua chamada é feita a partir de **LEO**.
- Permite chamar em um tempo $t=0$, um campo de correntes inicial em cada ponto da malha.

13. Sub-rotina LINFM

- É chamada desde **LEO**.
- Lê linhas de comentários e as diferencia dos dados no arquivo com os parâmetros de execução das correntes.

CAPÍTULO 5: APLICAÇÕES DO MODELO
COPLA MC/SP

5. Aplicações do Modelo COPLA MC/SP

Os modelos COPLA-MC e COPLA-SP foram validados a partir de casos teóricos e medições em praias realizadas pelo Grupo de Engenharia Oceanográfica e de Costas da Universidade da Cantabria. Para efeitos deste Manual, os modelos foram aplicados em quatro casos teóricos com batimetria reta e paralela: (1) ondas incidindo normais à batimetria, (2) ondas incidindo a $\theta = 30^\circ$, (3) fundo com batimetria em forma de uma cunha e (4) batimetria de uma praia de enseada em equilíbrio estático. O modelo também foi aplicado a dois casos de praias: a Praia de Puntal (Santander) e a Praia de Plentzia (Vizcaya).

5.1. Casos teóricos

Batimetria reta e paralela

A partir de uma praia com declividade uniforme 1/20 (Figura 7) foi propagada uma onda monocromática com altura $H = 5,0 \text{ m}$, com período de $T = 18 \text{ s}$, discretização espacial $DXR = D YR = 100 \text{ m}$, com incidência normal e a 30° em relação ao eixo de propagação.

• Incidência normal das ondas

Para o caso de incidência normal, são observados nas Figuras 8a e 8b os resultados de propagação da onda; (a) na amplitude e direção da onda, representada por vetores cuja magnitude equivale à altura de onda e à sua direção à da frente do nó e (b) altura máxima de onda. Pode-se observar no diagrama de setas a onda quebrando e depois se dissipando até a linha da costa, com as frentes retas e paralelas à praia.

RESULTADOS DE BATIMETRIA

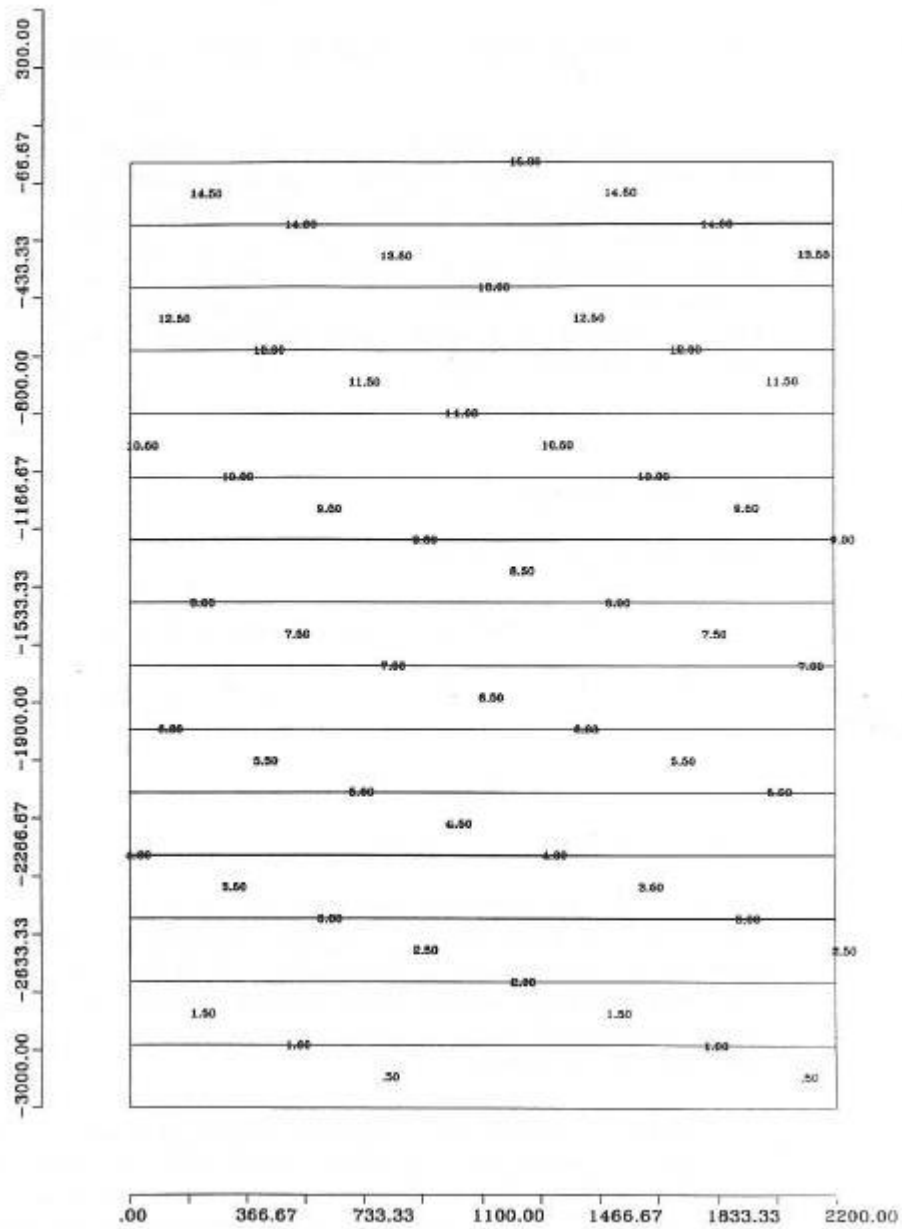
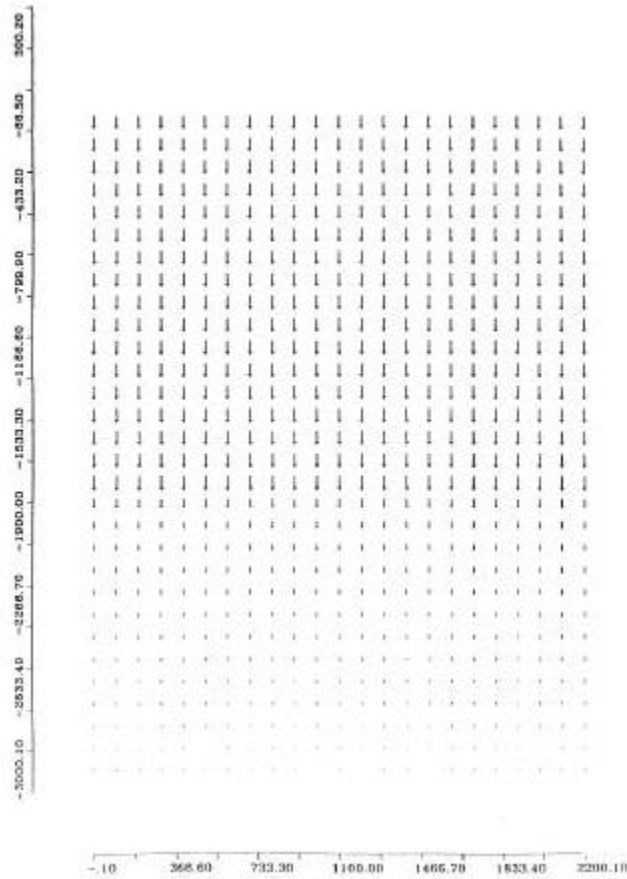


Figura 7 – Batimetria reta e paralela (m=1/20).

(b) Amplitude e Direção de onda



(a) Altura máxima de onda

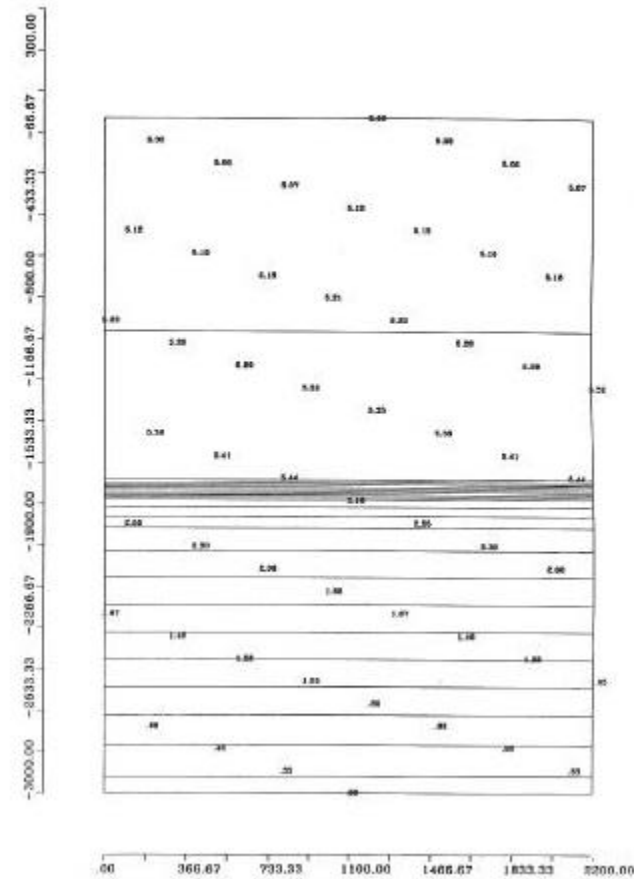


Figura 8 – Propagação de onda ($\theta=0$, $H=5,0$ m, $T=18$ s).

Na Figura 9 são representados os resultados do programa COPLA-MC, onde na Figura 9a aparece o campo de velocidades que é nulo, como era de se esperar. Na Figura 9b a sobrelevação do nível médio ao longo de um perfil de praia. Esta última compara o nível médio calculado com o modelo numérico e um nível médio teórico avaliado por Longuet-Higgins e Stewart (1964), baseado na teoria linear:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = -k \frac{\partial h}{\partial x}$$

Com:

$$\frac{1}{1 + \frac{8}{3\gamma^2}}$$

Cuja solução é da forma:

$$\eta = k(h_b - h) + \bar{\eta}_b$$

Onde h_b e η_b são a profundidade estática e a variação do nível médio do mar dinâmico no ponto de quebra.

O modelo de Longuet-Higgins supõe uma lei linear da diminuição da altura de onda na zona de arrebatamento ($H = \tilde{a}h$). Por isso, na Figura 9c aparece uma linha reta. No modelo de propagação de onda, conforme explicado na seção 2.4 do “Manual de Referência do OLUCA-MC” (IH CANTABRIA – MMA, 2017a), o modelo de dissipação é exponencial, razão pela qual há uma diferença da forma das curvas, mas em termos gerais o “*setup*” na praia é da mesmo ordem ($\bar{\eta} = 0,23 \text{ m}$) nos dois.

• ***Incidência oblíqua das ondas***

Para este caso são aplicados os modelos associados à onda irregular (OLUCA-SP e COPLA-SP), com uma incidência média do espectro direcional ($\epsilon_0 = 30^\circ$). Os resultados da propagação de onda podem ser vistos na Figura 10a e 10b. Quanto ao campo de correntes, foram executados quatro casos, a fim de comparar os efeitos da mudança na rugosidade ($K_{swc} = 2,0$, $K_{swc} = 0,5$) com viscosidade turbulenta ($\tilde{a} = 0$), e foi efetuada uma análise de sensibilidade com mudança de viscosidade turbulenta ($\tilde{a} = 5$ e $\tilde{a} = 15$), com rugosidade constante $K_{swc} = 0,5$.

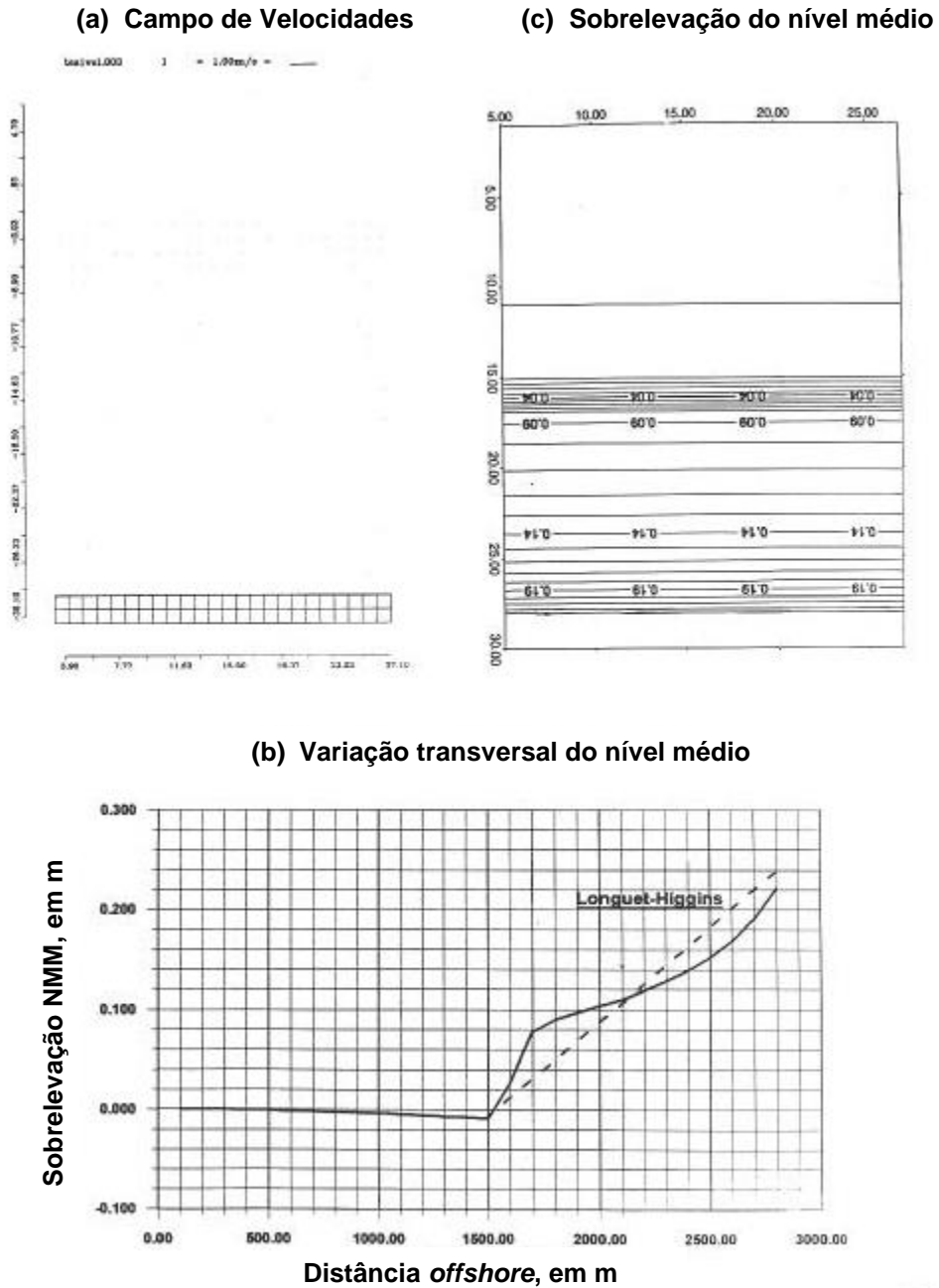
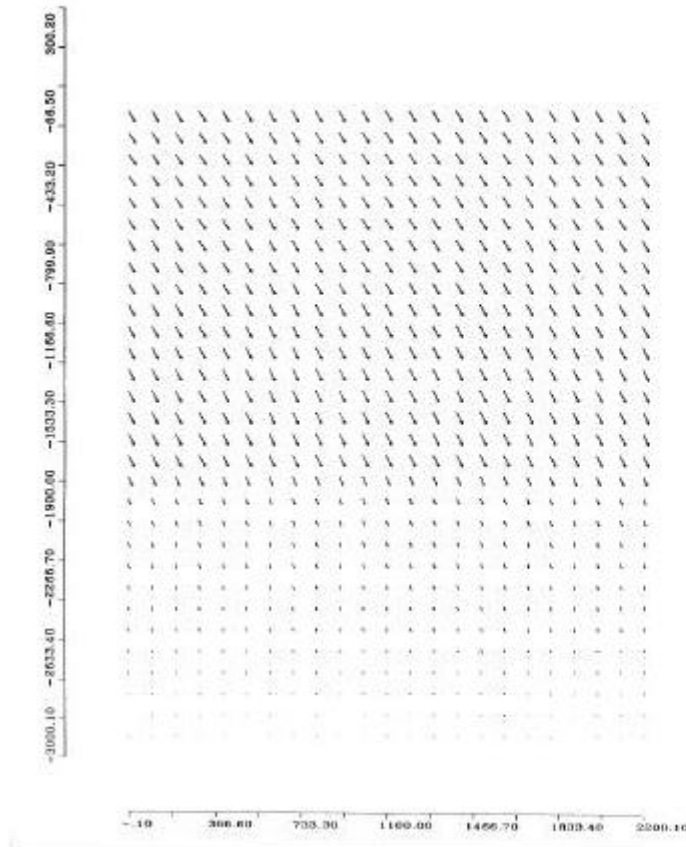


Figura 9 – Campo de correntes (onda normal). (a) campo de velocidade, (b) sobrelevação do nível médio, (c) variação transversal do nível médio.

(a) Amplitude e Direção de onda



(b) Altura máxima de onda

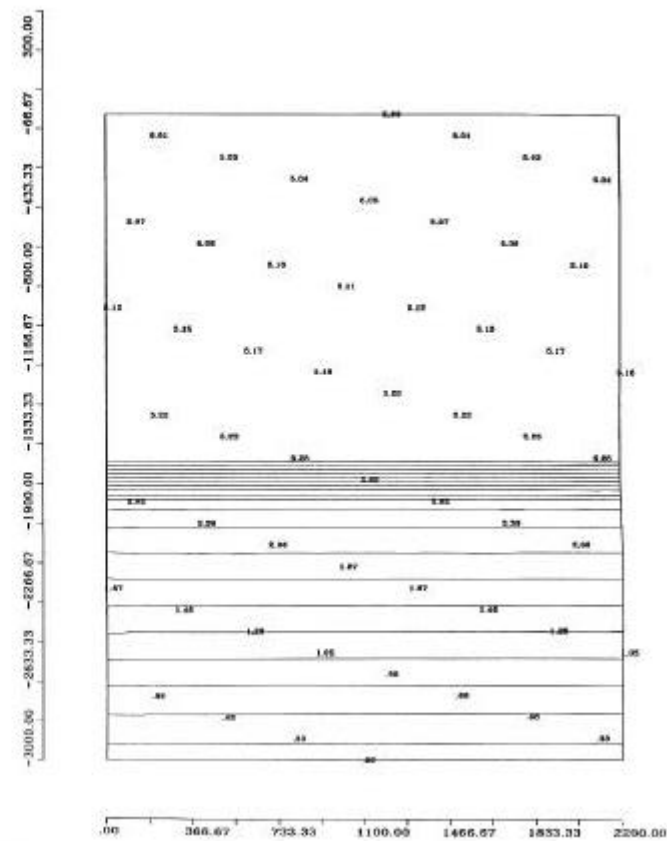


Figura 10 - Propagação de onda irregular em fundo plano ($\theta_0=30$, $H_s=5,0$ m, $T_p = 18$ s). (a) amplitude e direção da onda, (b) altura da onda significativa.

Nas Figuras 11a e 11b é observado o campo de correntes para dois atritos diferentes, onde se vê como o aumento do atrito (menor Chézy) diminui a magnitude das velocidades. Na Figura 13a são comparados os perfis transversais de velocidade sem viscosidade turbulenta (modelo numérico), segundo a teoria de Longuet-Higgins.

É observada a diferença de velocidades devido ao atrito e como as curvas do modelo numérico diminuem inicialmente mais rapidamente devido ao modelo de dissipação na zona de arrebentação do OLUCA-SP, mas as velocidades são da mesma ordem de magnitude.

Para os casos de variação da viscosidade turbulenta, nas Figuras 12a e 12b é observado no campo de onda que as magnitudes da velocidade são quase as mesmas, mas na Figura 13b é verificado como a viscosidade turbulenta, ao ser maior, distribui o fluxo transversalmente, como é de se esperar. Esta é uma das razões pela qual é recomendado primeiro calibrar o coeficiente de atrito, visto que este influencia mais nas magnitudes das velocidades devido às baixas profundidades, e depois ajustar a distribuição espacial de velocidades com a viscosidade turbulenta.

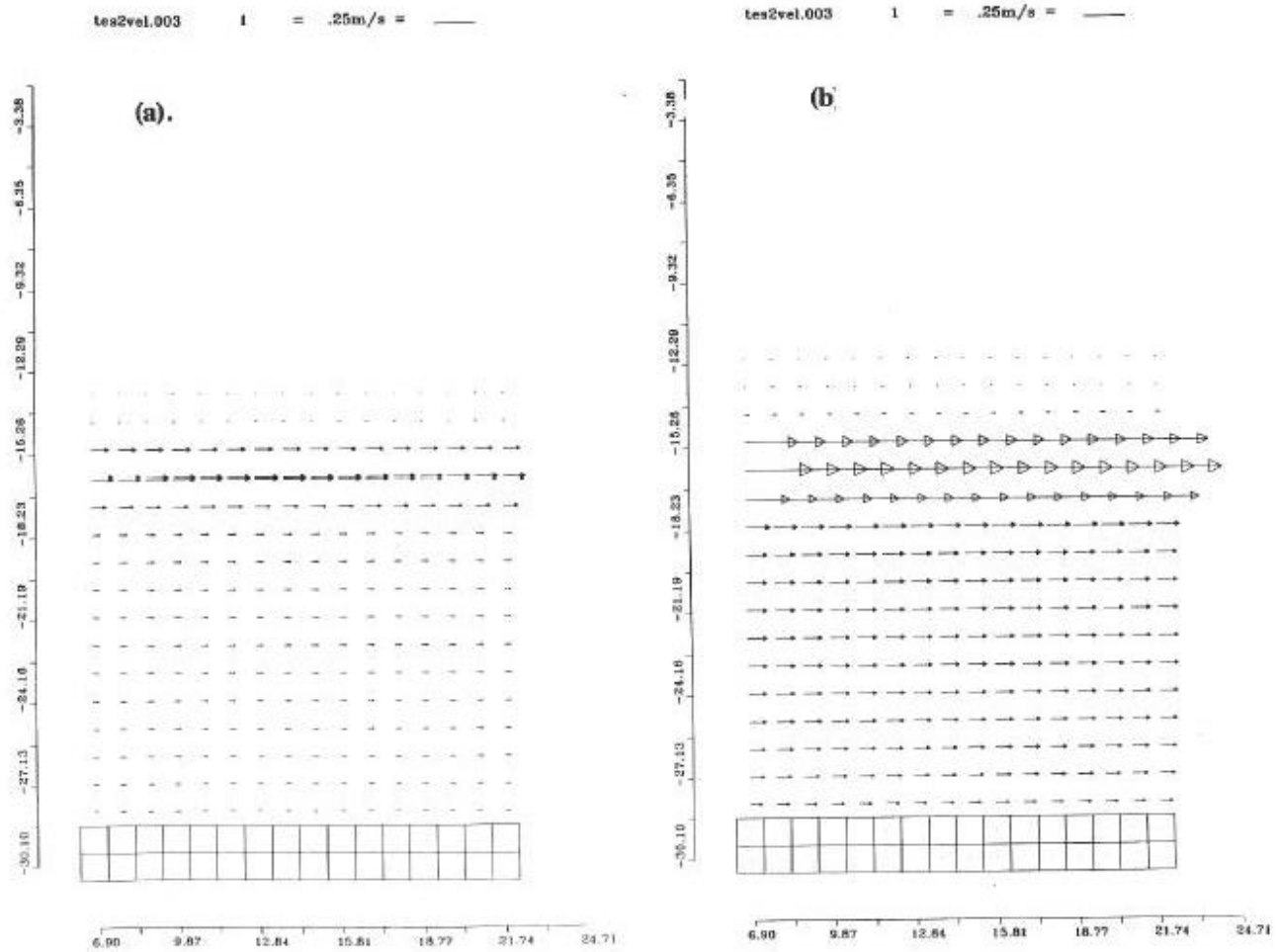


Figura 11 - Campo de velocidades ($\epsilon = 0$, $\theta_0 = 30^\circ$). (a) $K_{swc} = 2,0$ (b) $K_{swc} = 0,5$.

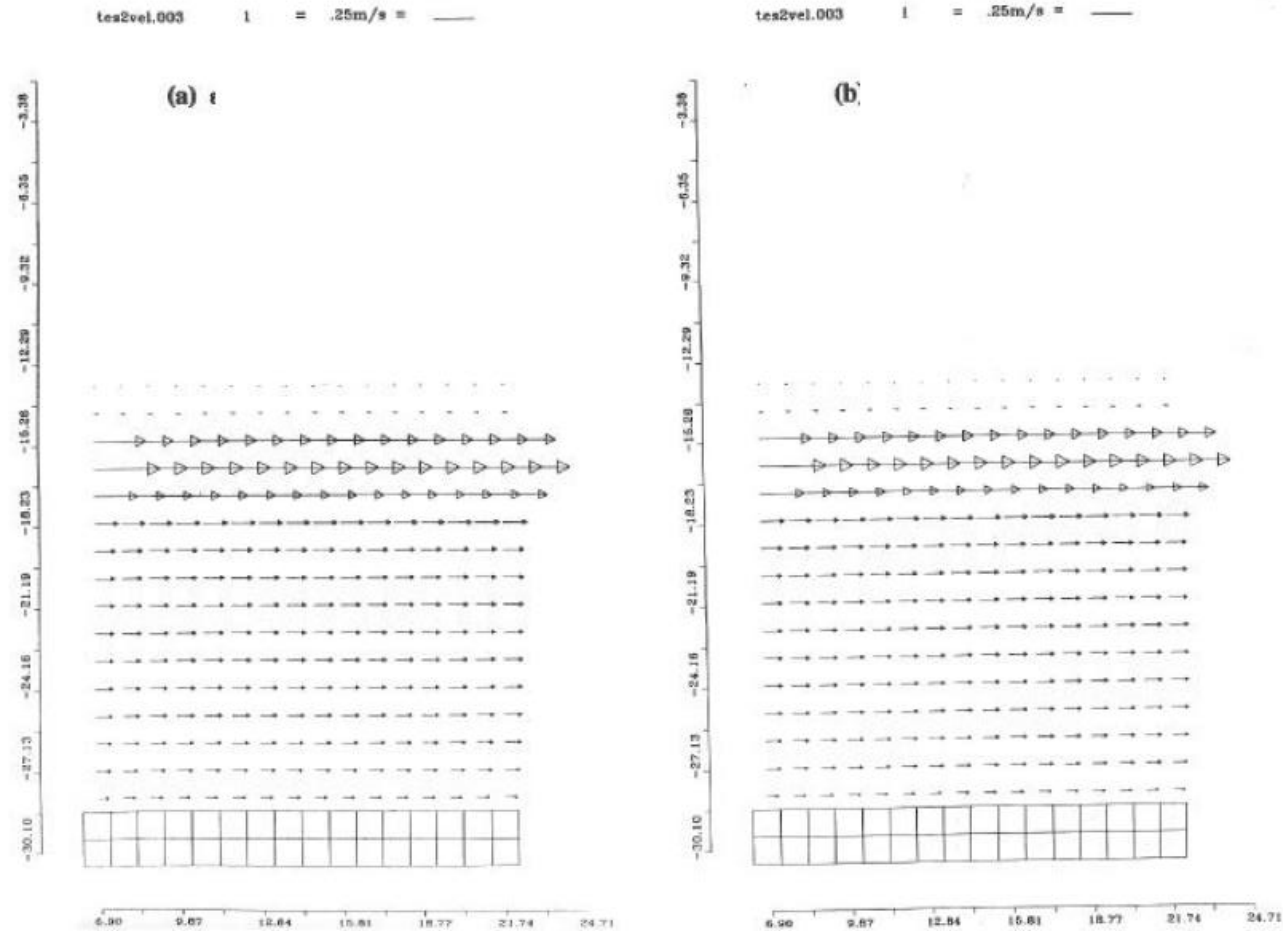
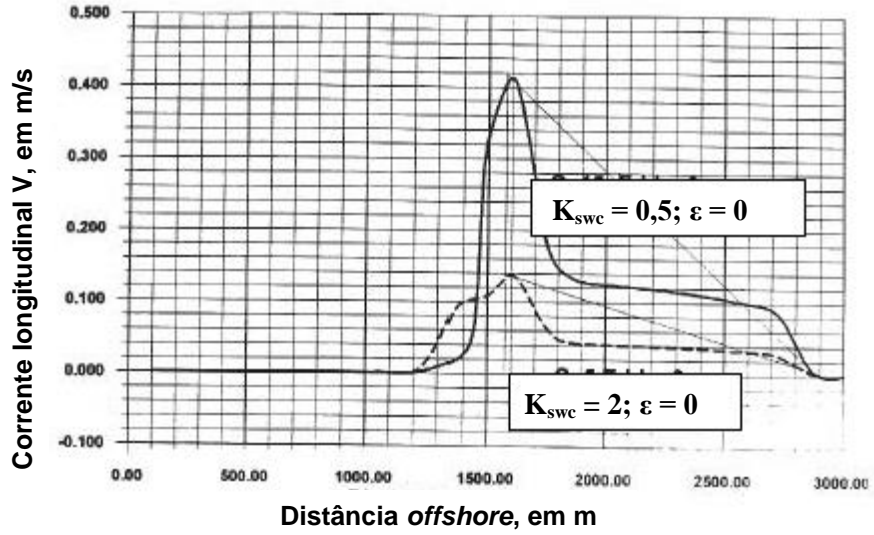


Figura 12 – Campo de velocidade ($K_{swc} = 0,5$, $\theta_0 = 30^\circ$). (a) $\epsilon = 5$, (b) $\epsilon = 15$.

(b) Variação transversal de velocidades

$C = 5, C = 15. \epsilon = 0$



(a) Variação transversal de velocidades

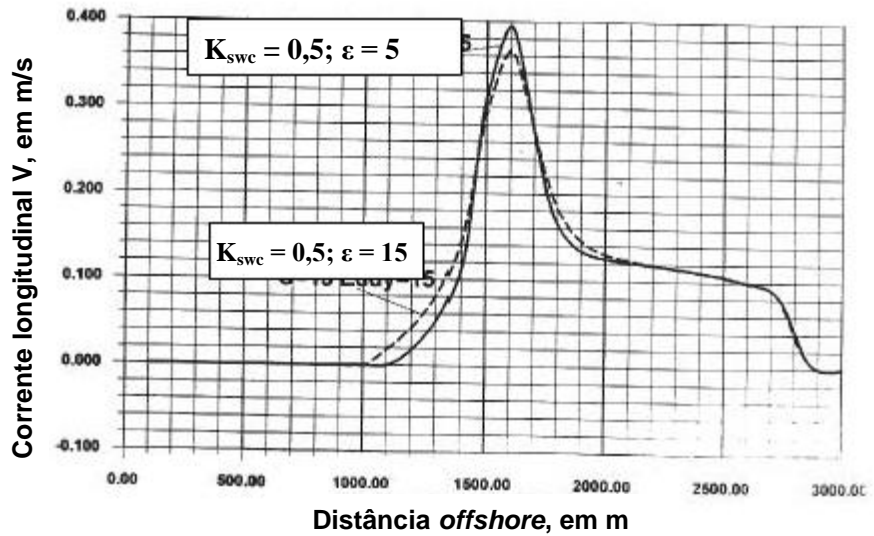


Figura 13 – Variação transversal de velocidades. (a) $\epsilon = 0, K_{swc} = 2,0, K_{swc} = 0,5$; (b) $K_{swc} = 0,5, \epsilon = 5, \epsilon = 15$.

Caso de uma cunha

Este caso foi executado com a mesma onda do caso anterior, com incidência normal e a batimetria de uma saliência (ver Figura 14a) que induz uma refração da onda, como é observada nos diagramas de amplitude e direção (Figura 14b), altura de onda significativa (Figura 15a) e superfície livre (Figura 15b) (resultados do modelo OLUCA-SP).

Nas Figuras 16a e 16b aparecem os resultados do modelo COPLA-SP, onde é verificado o sistema de correntes associado à onda, na Figura 16a, as correntes que divergem na cunha e na Figura 16b, as sobrelevações do nível médio concentradas na parte superior da cunha.

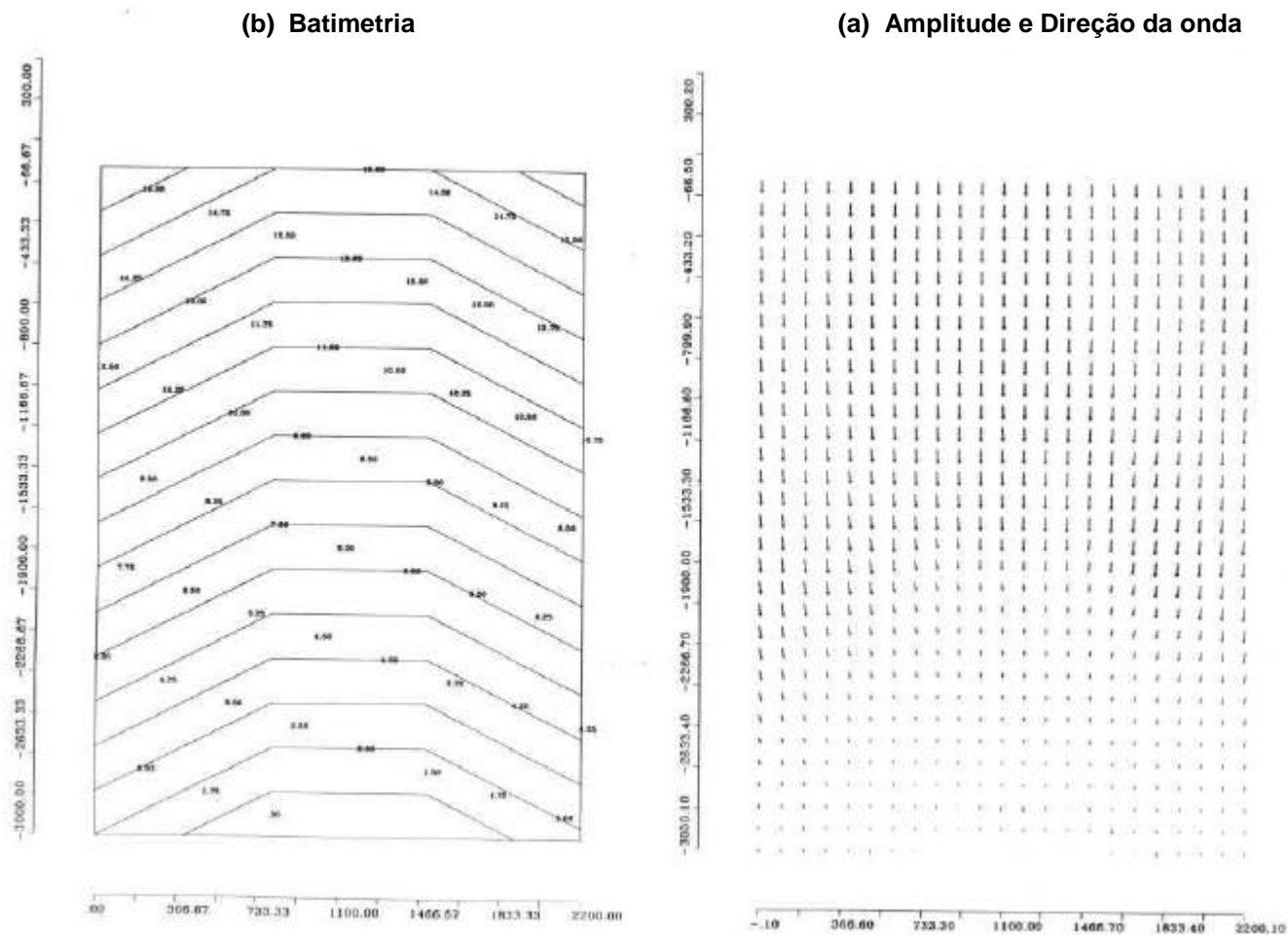


Figura 14 – Propagação de onda em uma cunha ($\theta = 0^\circ$, $H_s = 5,0$ m, $T_p = 18$ s). (a) batimetria, (b) amplitude e direção da onda.

(b) Altura máxima de onda

(a) Superfície livre

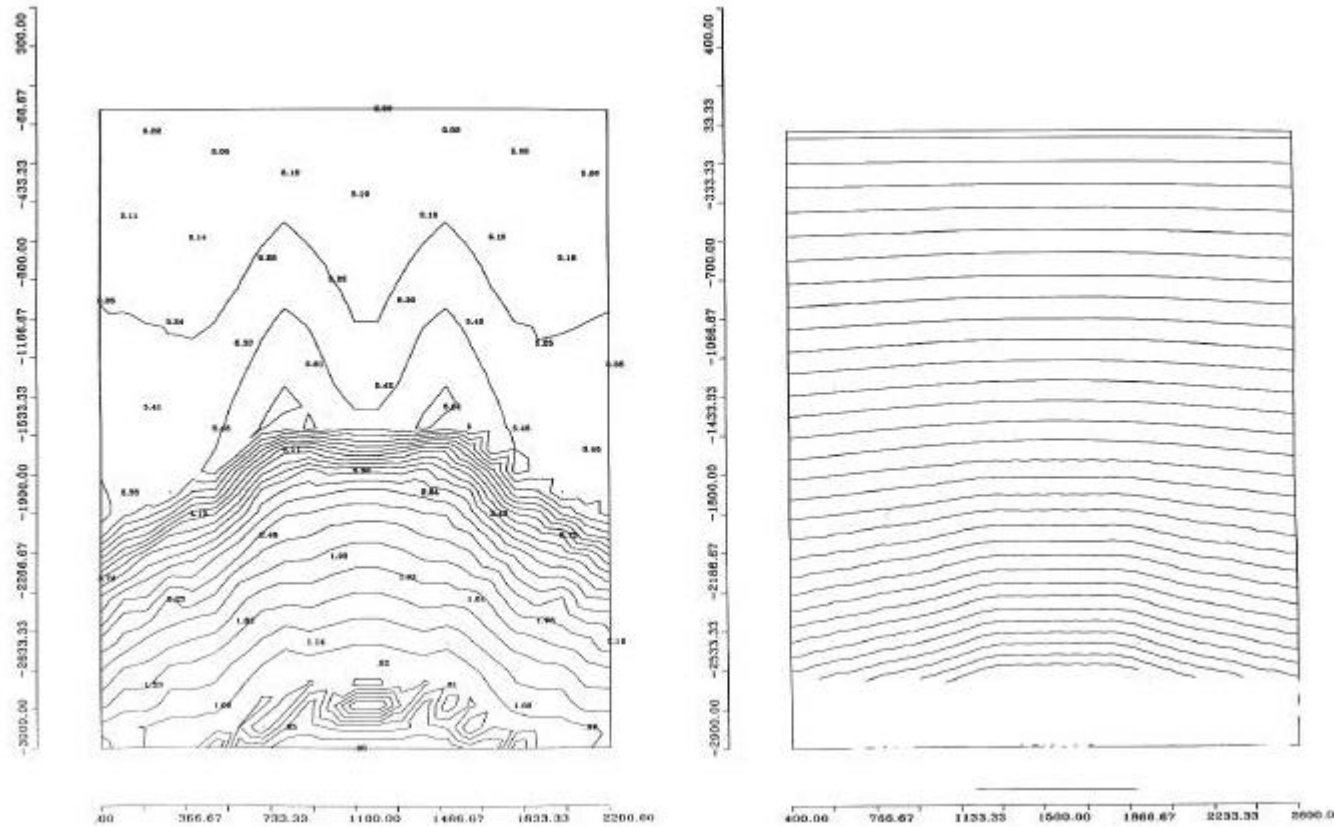


Figura 15 – Propagação de onda em uma cunha ($\theta = 0^\circ$, $H_s = 5,0$ m, $T_p = 18$ s). (a) altura de onda significativa, (b) superfície livre (uma componente).

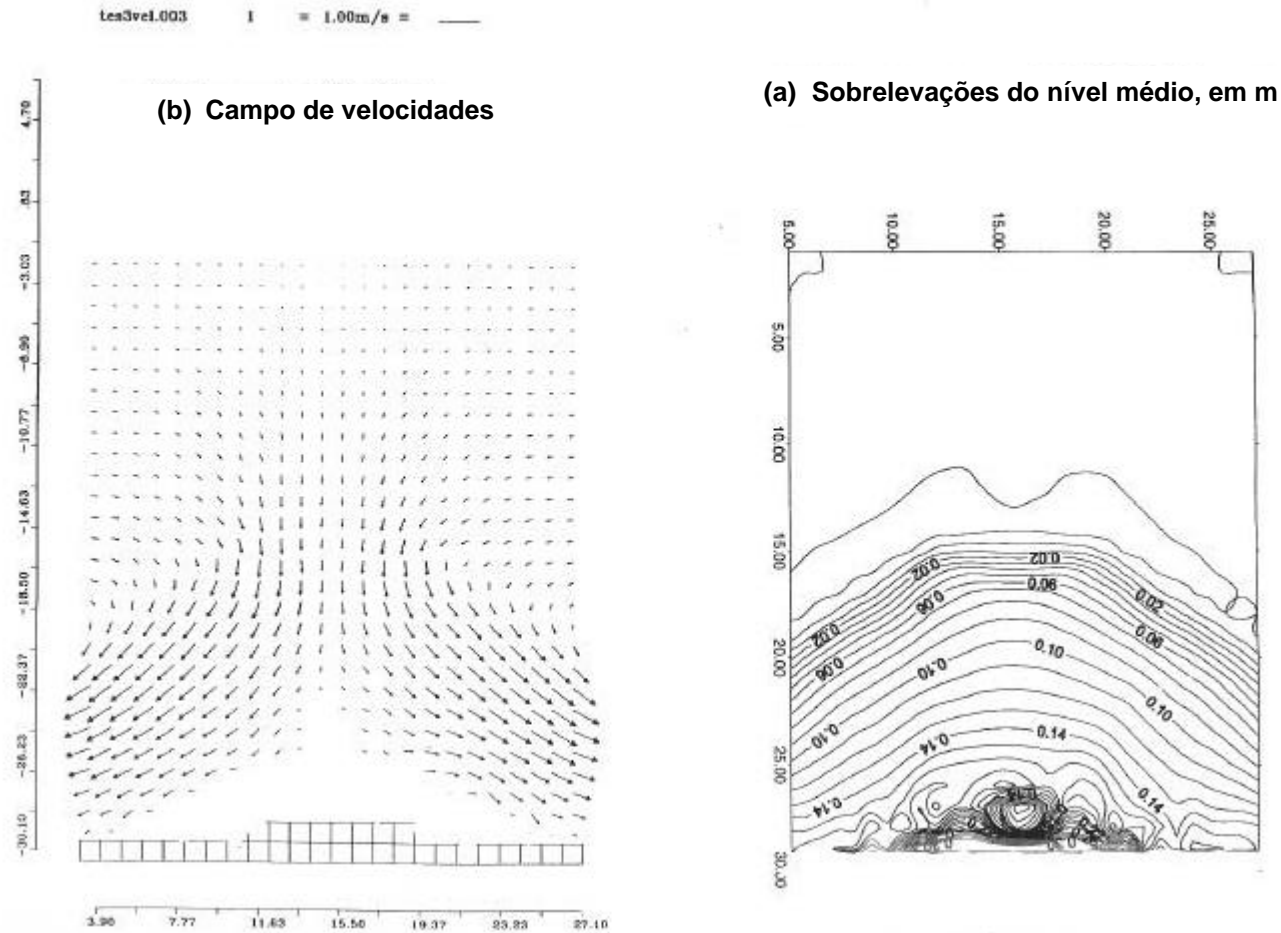


Figura 16 – Campo de velocidades na cunha. (a) sistemas de correntes, (b) sobrelevações do nível médio.

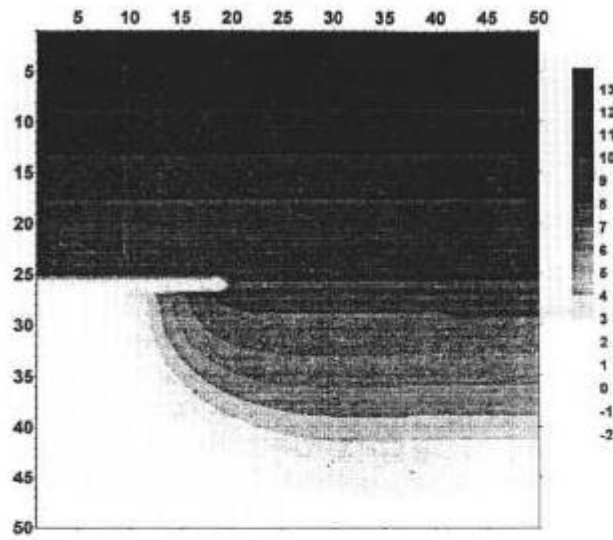
Caso de uma praia em equilíbrio estático

A partir do modelo empírico de uma praia em equilíbrio estático (GONZÁLEZ, 1995), foi definida a forma em planta da praia com um $\hat{\alpha}_{min} = 48^\circ$ ($\hat{\alpha} = 42^\circ$) e $R_0 = 297$ m. O perfil de equilíbrio de Dean com $A = 0,23$ (ver a batimetria na Figura 17^a). A forma desta praia é denominada como uma praia de enseada em equilíbrio estático. Neste tipo de praia existe um balanço entre as correntes devido à obliquidade das ondas e as correntes geradas pelos gradientes de altura de onda, sendo praticamente nulo o sistema de correntes longitudinais.

Será propagada uma onda monocromática com altura de onda $H = 5,0$ m, período $T = 10$ s, direção $\theta = 0^\circ$ e tamanho da malha $DXR = DXY = 10$ metros. Os resultados da propagação são observados na Figura 17b, gradientes de altura de onda longitudinal geradas pelo dique. Na Figura 18b apresenta-se a superfície livre da onda, onde é verificado como as frentes não são totalmente paralelas à praia atrás do dique.

O programa COPLA-MC foi executado com um $c=15$ e $\hat{\alpha}=30$, com o qual se obteve o padrão de correntes da Figura 19. Como era de se esperar, o sistema de correntes é praticamente nulo, exceto na ponta do dique, por efeitos locais da quebra das ondas na estrutura.

(a) Batimetria



(b) Altura máxima de onda

$H = 5.0 \text{ m}, T = 10 \text{ s}, \theta = 0^\circ$

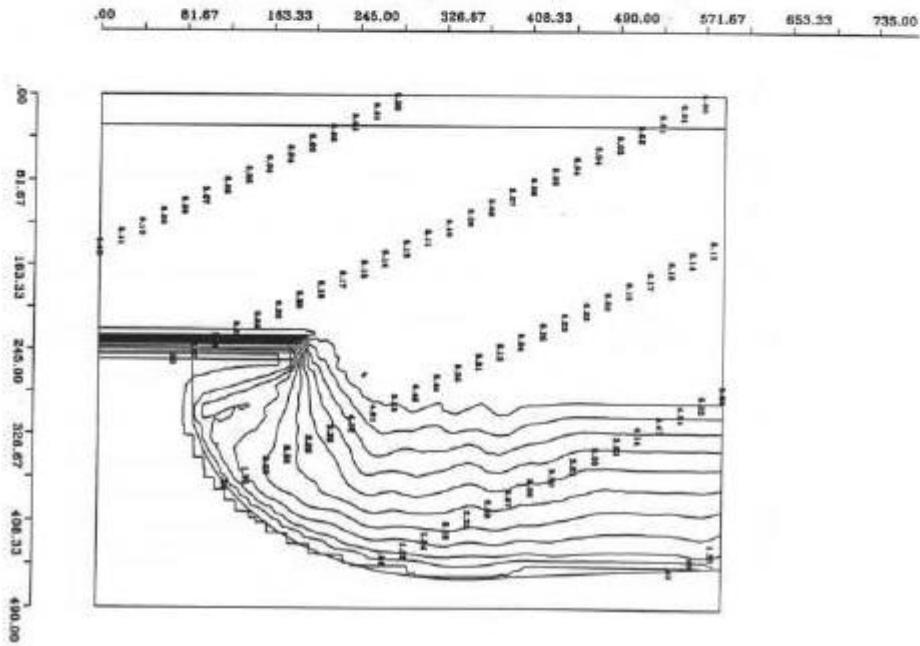
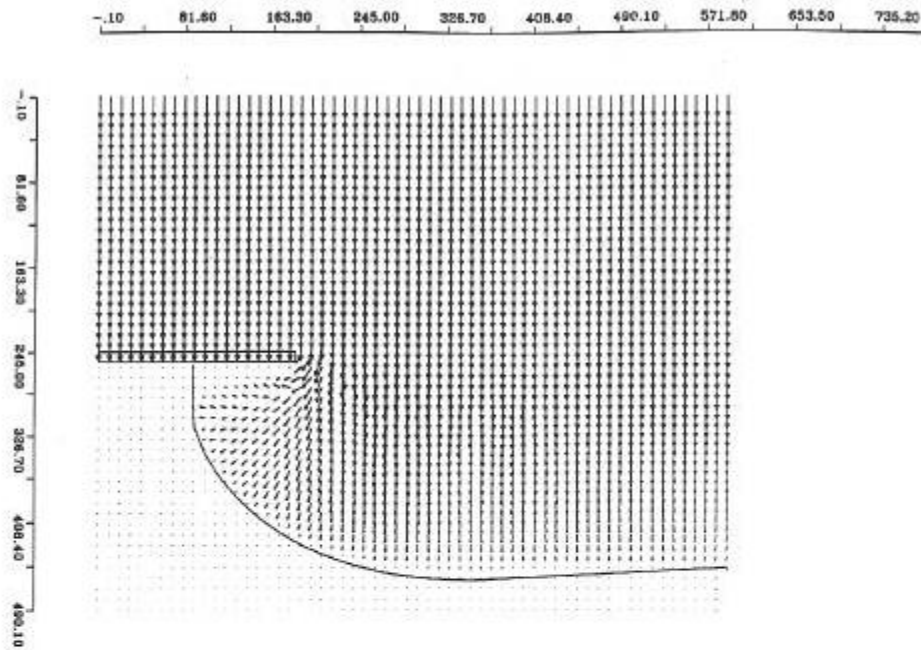


Figura 17 – Praia em equilíbrio estático. $\alpha_{\min} = 48^\circ$, $R_0 = 297 \text{ m}$, $A = 0,23$, $\Delta x = 10 \text{ m}$.

(a) Gradientes de altura e direção de onda



(b) Superfície livre

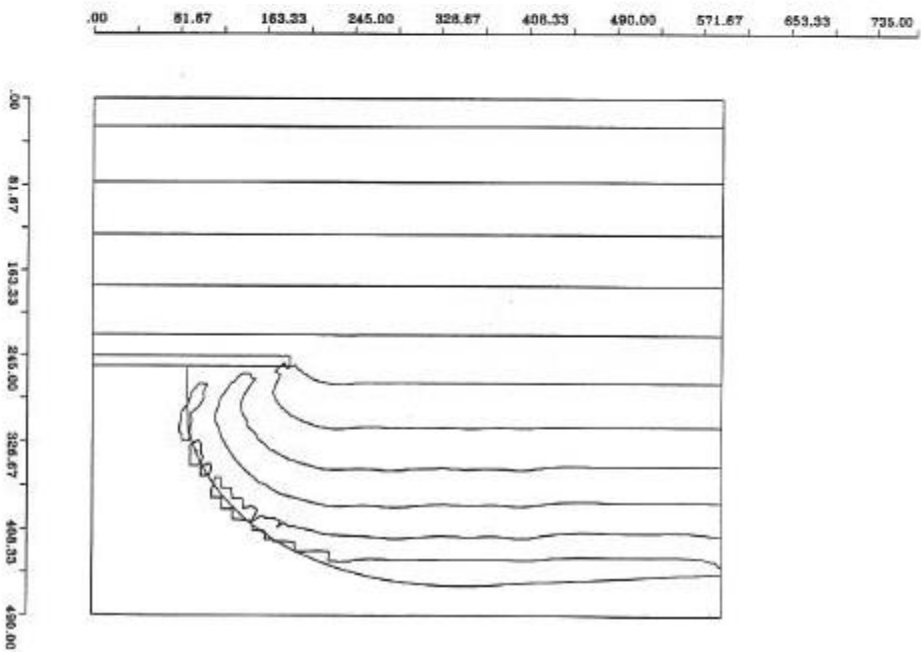


Figura 18 – Propagação da onda. $H = 5,0$ m, $T = 10$ s, $\theta = 0^\circ$.

tesivel.001 1 cm = 1.67m/s = _____

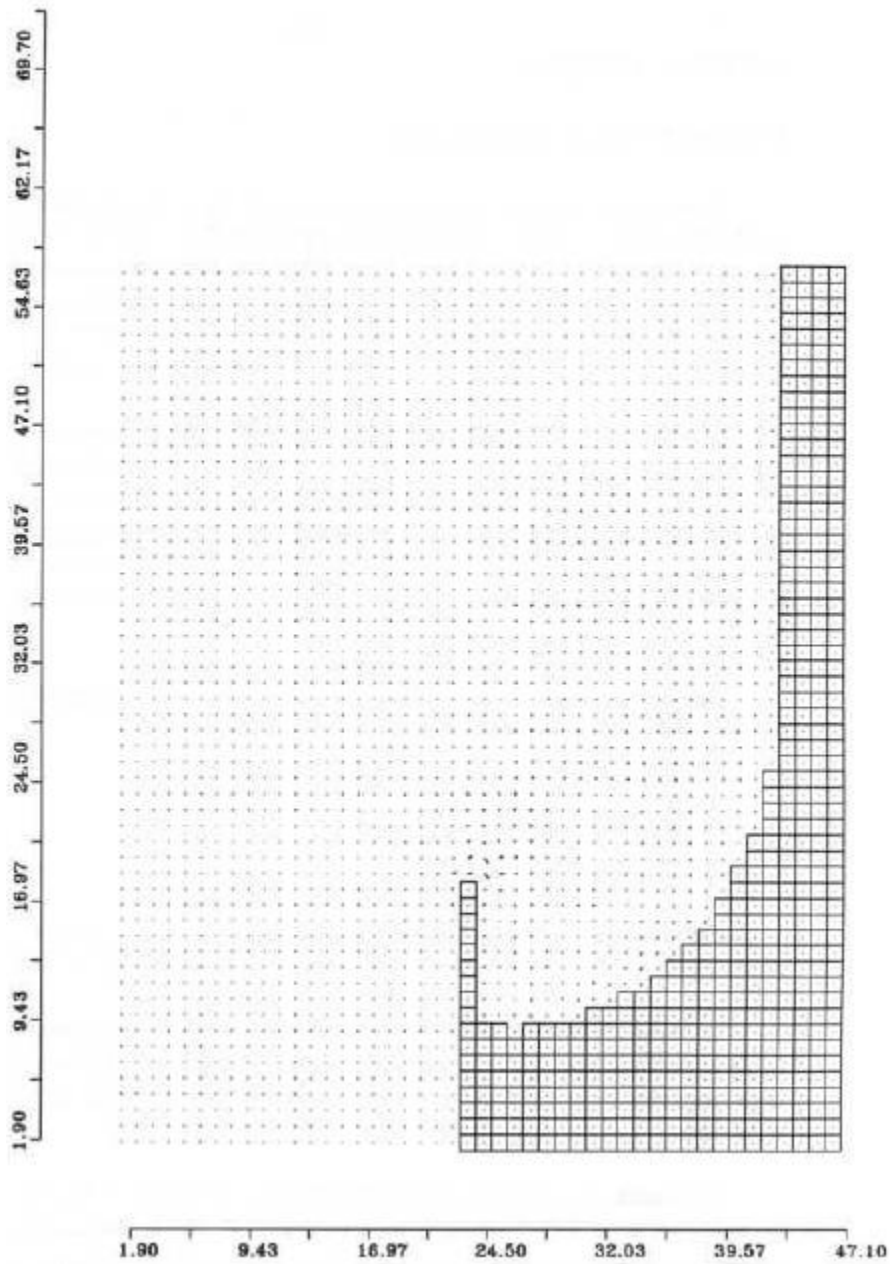


Figura 19 – Campo de velocidades. Praia em equilíbrio. $C = 15$, $\Sigma = 20$, $H = 5,0$, $T = 10$ s, $\theta = 0^\circ$.

5.2. Casos Práticos

Praia de Puntal (Santander)

Este caso foi executado com uma onda monocromática de altura $H = 5,0$ m, período $T = 8$ s, incidência DIR = NNW, discretização espacial $DXR = DYR = 20$ m, com a batimetria que é mostrada na Figura 20. Pode ser observado nas Figuras 21a e 21b na propagação (diagrama de setas de amplitudes-direções e a superfície livre) o efeito de cruzamento de frentes devido à interferência da Ilha de Mouro, a qual gera gradientes de altura de onda ao longo da praia.

O modelo de propagação COPLA-MC foi executado com alguns parâmetros calibrados com medições em campo de $c = 15$ e $\varepsilon = 25$. Na Figura 22 é observado o padrão de correntes, o qual gera um sistema celular com correntes de retorno, que correspondem às formas irregulares apresentadas na batimetria de Puntal (ver detalhe com correntes na Punta, Figuras 23a e 23b, do modelo e uma fotografia aérea onde é mostrada a configuração irregular da praia devido à essas correntes).

Este comportamento da onda e as correntes tem sido comprovado a partir de campanhas de campo realizadas em tal praia.

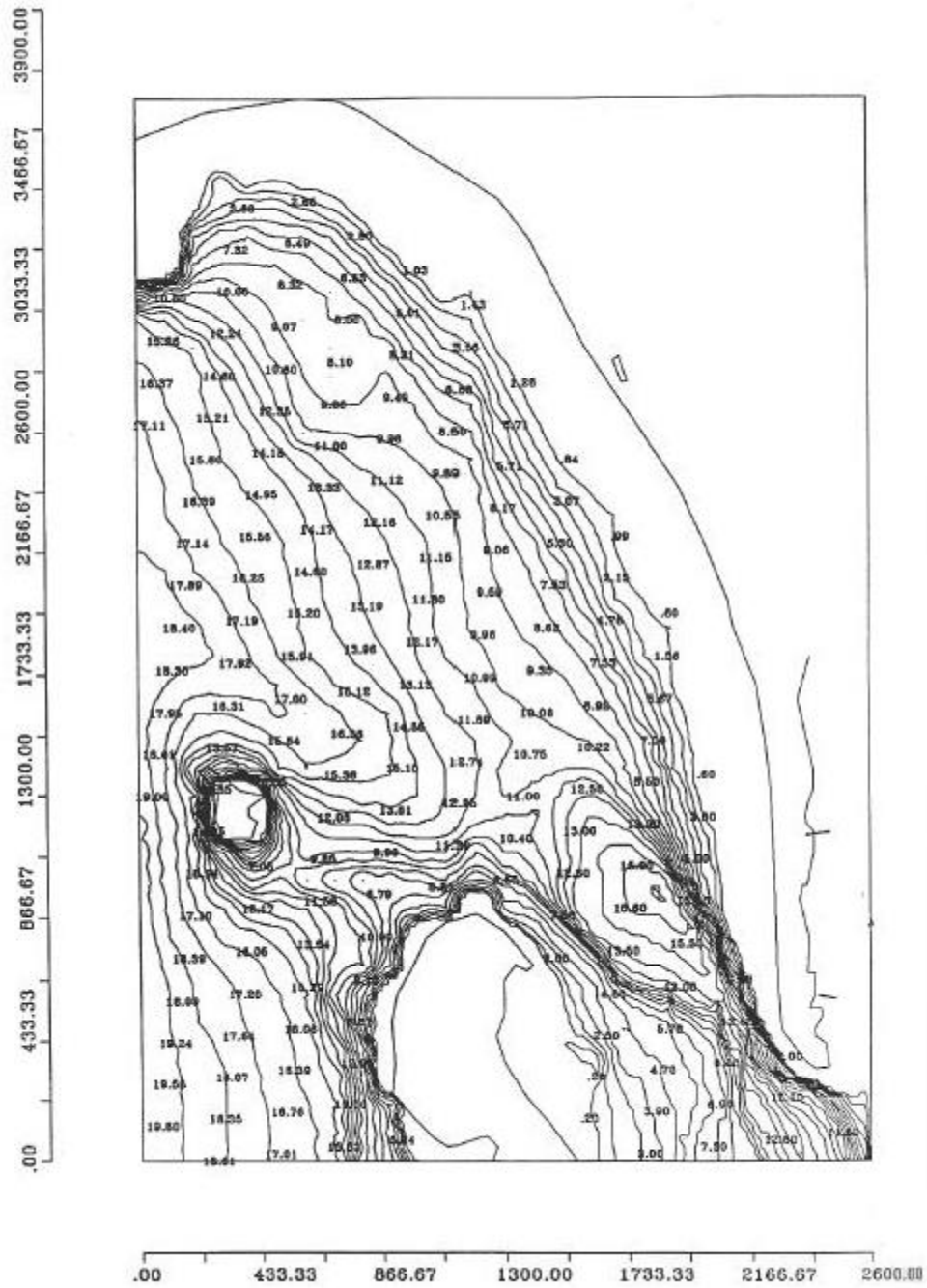
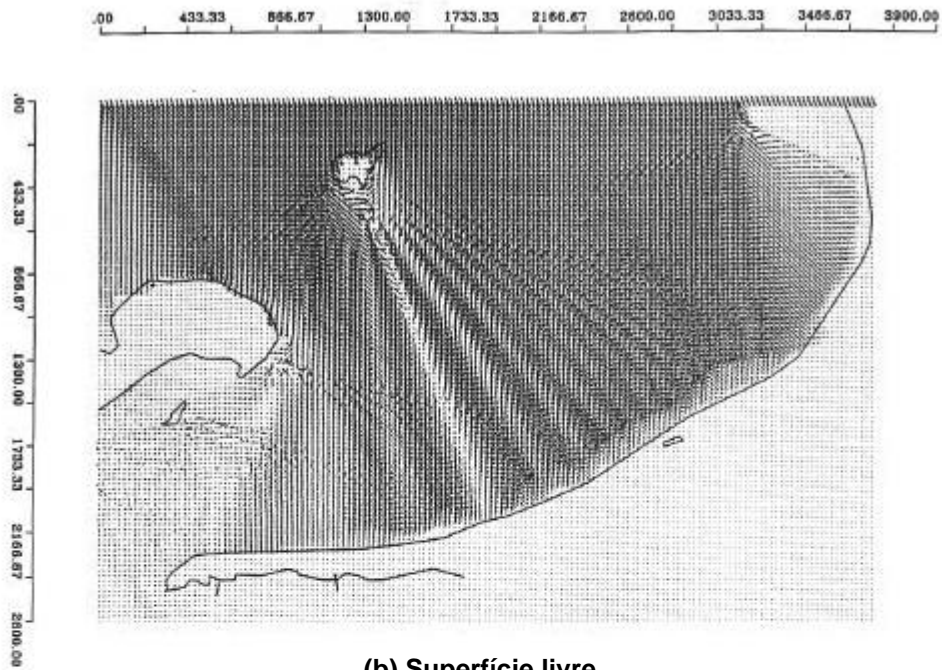


Figura 20 – Batimetria praia de Puntal.

(a) Gradientes de altura e direção de onda



(b) Superfície livre

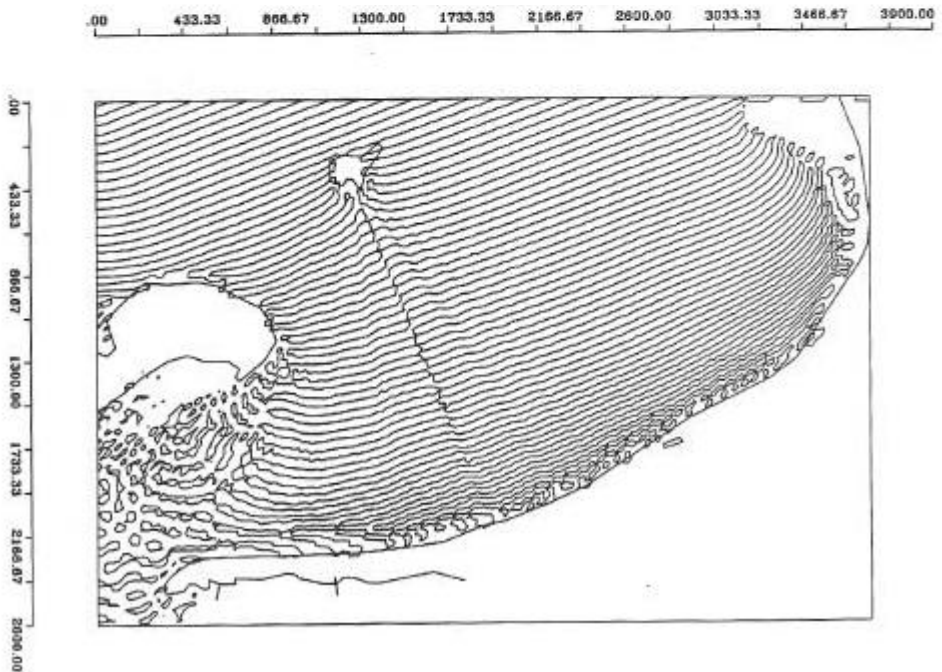


Figura 21 – Propagação da onda (Puntal). $H = 5,0$ m, $T = 8$ s, DIR = NNW.

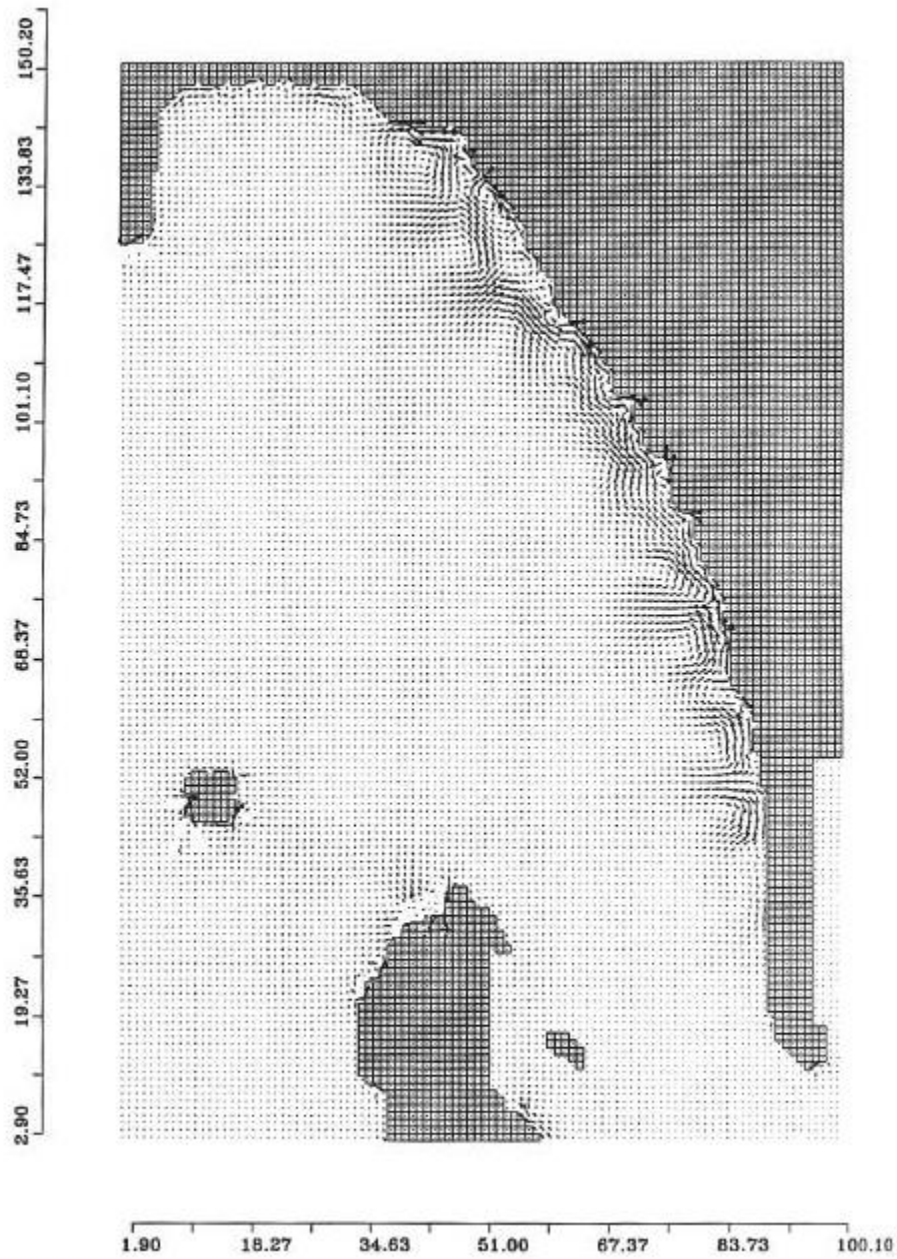
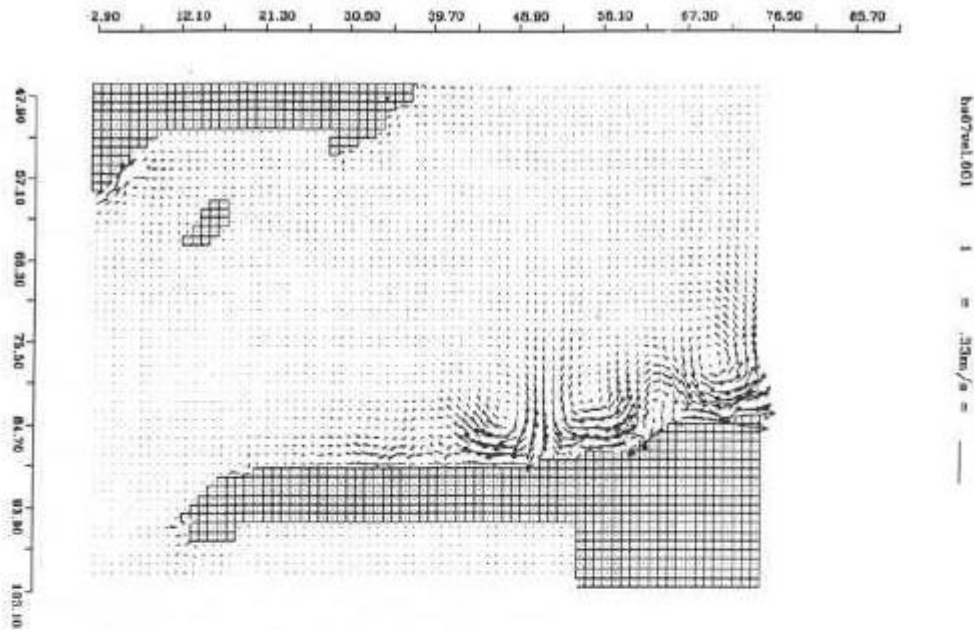


Figura 22 – Campo de correntes devido à onda (El Puntal). Onda: $H = 5,0$ m, $T = 8$ s, DIR = NNW.
Correntes: $C = 15$, $\Sigma = 25$.

(a) Campo de velocidades



(b) Fotografia aérea de Puntal

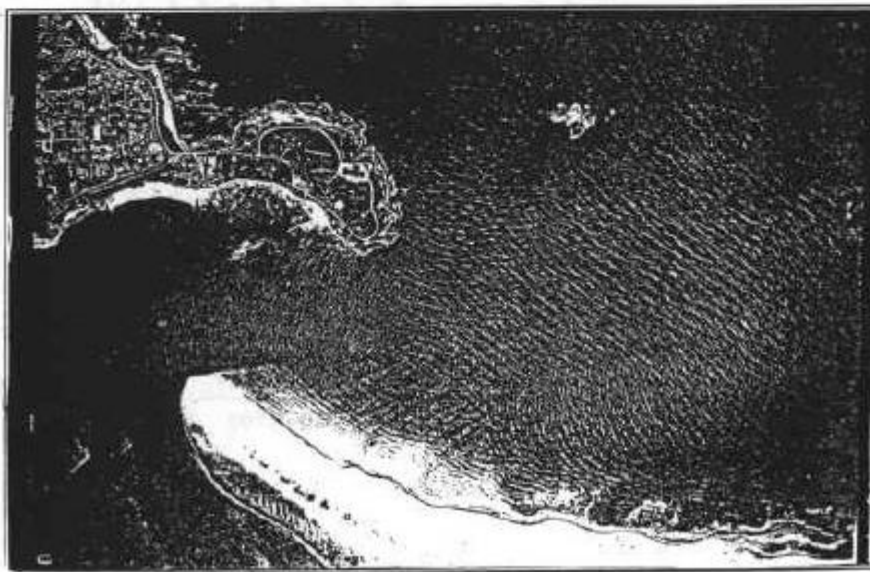


Figura 23 – Efeito das correntes na praia de Puntal.

Praia de Plentzia (Vizcaya)

Este caso foi efetuado com uma onda irregular de altura $H_s=4,0$ m, período de pico $T_p= 18$ s, direção $\theta = NW$, discretização do tamanho de malhas $DXR = DYR = 25$ m.

Na Figura 24 aparece a batimetria deste caso. É apresentada na Figura 25a a superfície livre de uma componente e Figura 25b a altura de onda significativa, onde o principal efeito na propagação é a difração da onda gerada pelos diques de San Valentín e Astondo (resultados do modelo OLUCA-SP).

O modelo de correntes foi efetuado com um $K_{swc} = 1,0$ e $\varepsilon = 25$. Na Figura 26 é apresentado o sistema de correntes associado às ondas, que mostra correntes na área protegida próxima ao estuário da ordem de 0,4 m/s, área na qual a praia, de acordo com o seu processo histórico, se encontra em desequilíbrio, tanto pela interação com o estuário quanto pelos processos de erosão que teve.

O sistema de correntes representa a área de instabilidade, onde o modelo de praia em equilíbrio estático não conseguiu se ajustar. O resto da praia se encontra praticamente em equilíbrio, tal e como é mostrado nos dois modelos.

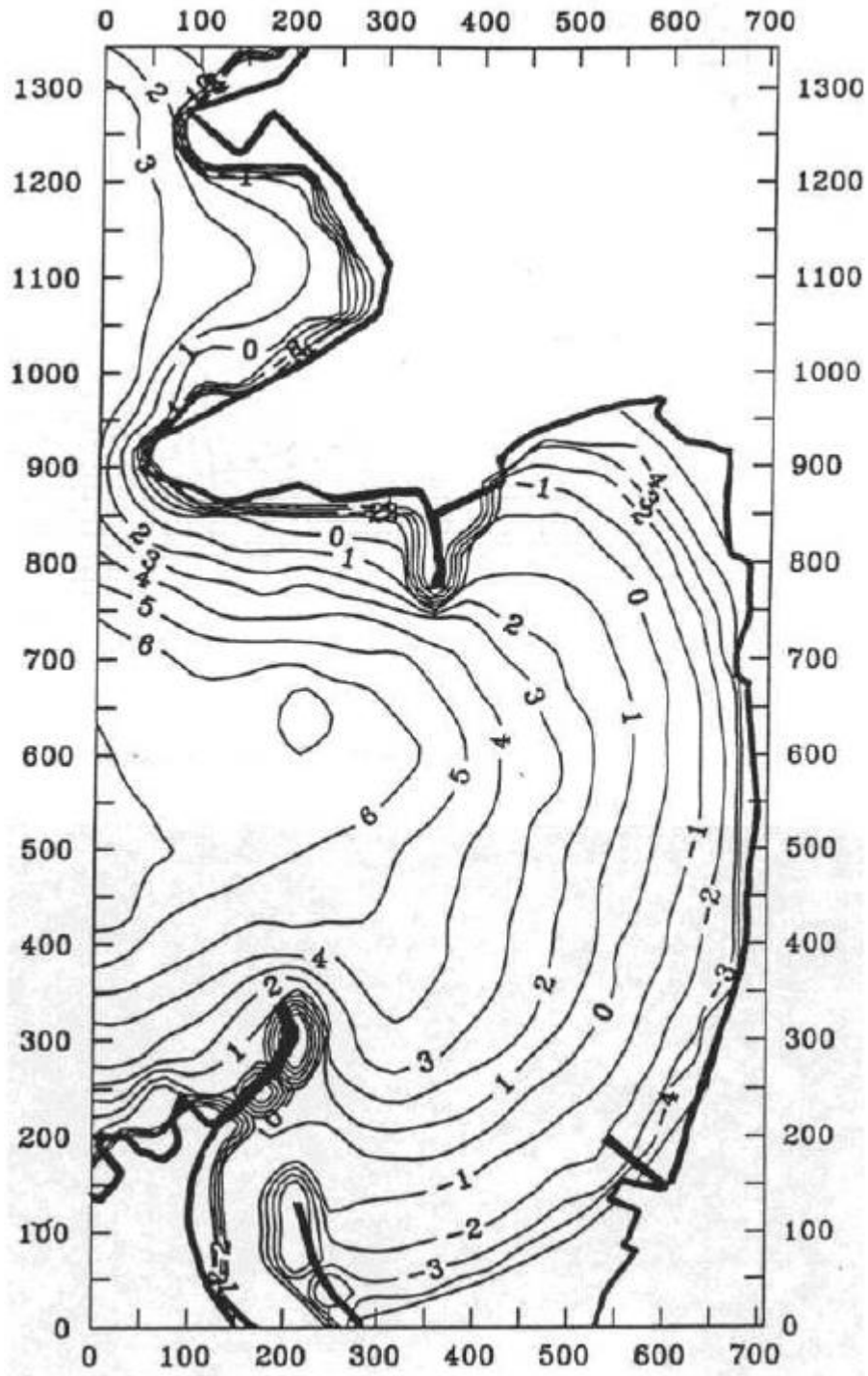


Figura 24 – Batimetria da praia de Plentzia (Vizcaya).

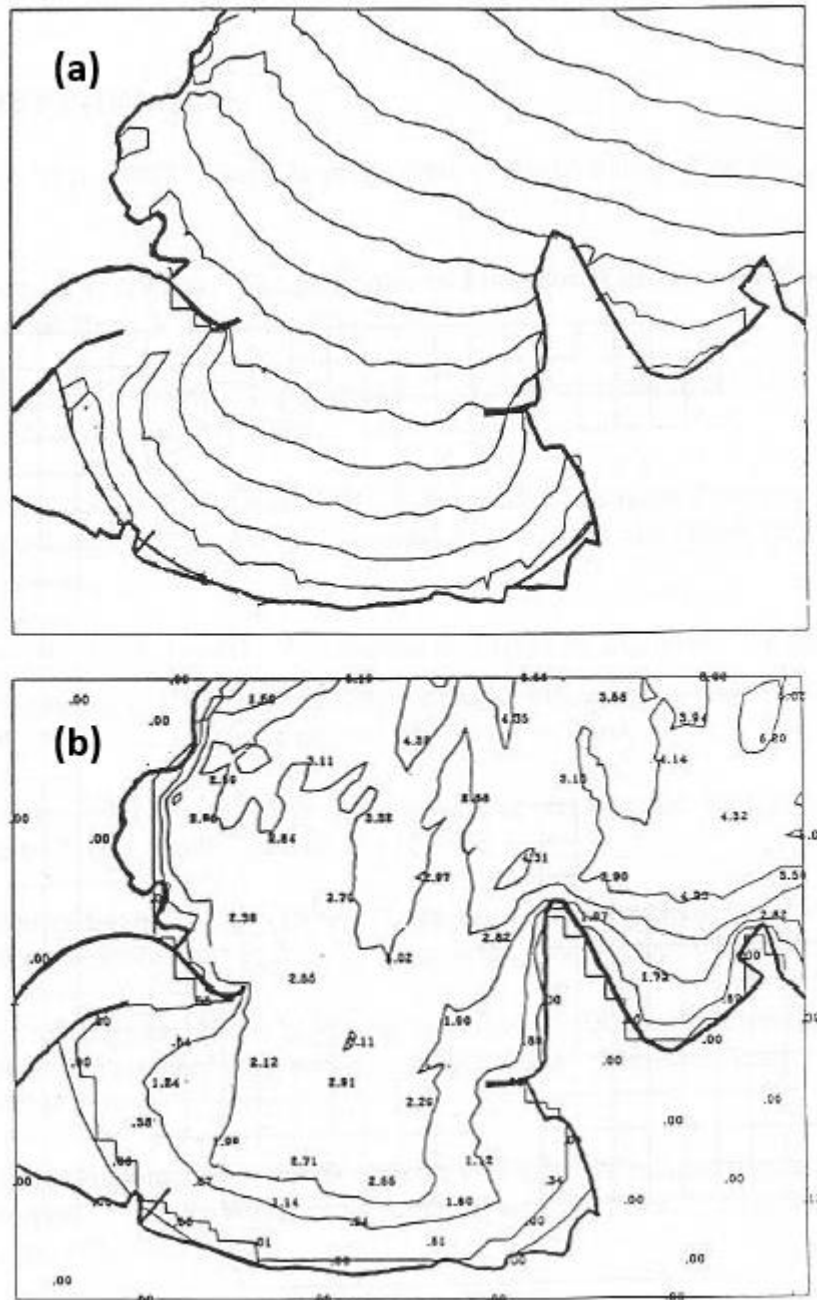


Figura 25 – Propagação de onda. Plentzia (Vizcaya). (a) Superfície livre (uma componente) $T_p = 18$ s, NW, $H_s = 4$ m. (b) Altura de onda significativa. Isolinhas de altura de onda significativa.

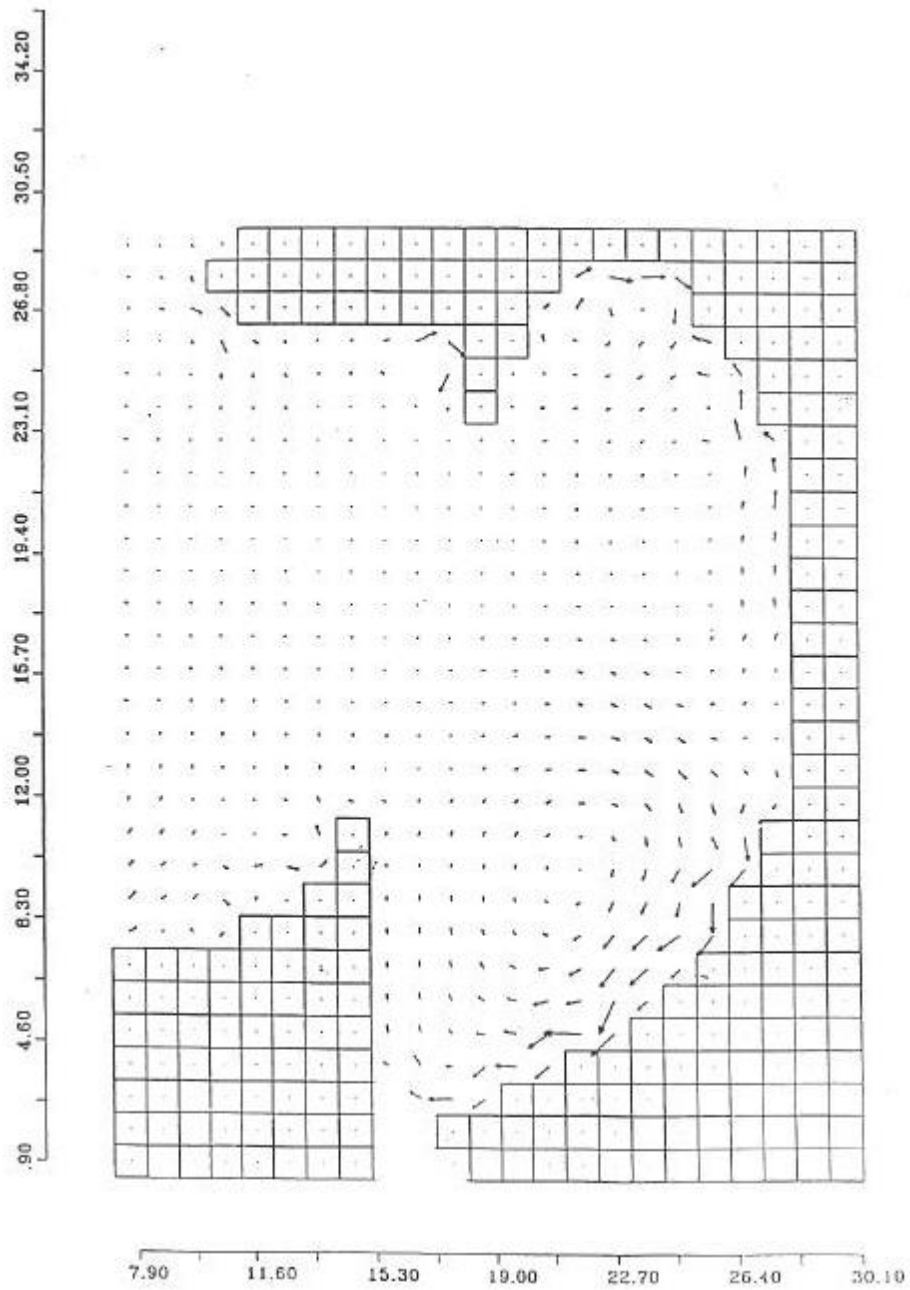


Figura 26 – Correntes na praia de Plentzia. $T_p = 18$ s, NW, $H_s = 5$ m.

REFERÊNCIAS

- BASCO, D.R. Surf-Zone Currents. **Coastal Engineering**, v.7, p. 331-357, 1983.
- BOWEN, A.J. The generation of Longshore Currents on a Plane Beach. **Journal of Marine Research**, v. 27, p. 206-215, 1969a.
- BOWEN, A.J. Rip Currents, 1: Technical Investigations. **Journal of Geophysical Research**, v. 83, p. 1913-1920, 1969b.
- DALLY, W., e DEAN, R.G. Suspended Sediment Transport and Beach Profile Solution. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, v. 110, n. 1, p 15 – 33, 1984.
- DE VRIEND, H.J. e STIVE, M.J.F. Quasi-3D modelling of nearshore currents. **Coastal Engineering**, v.11, n.5/6, p. 565-601, 1987.
- EINSTEIN, H.A. The Bed Load Function For Sediment Transport in open Channel Flow. Dept. Agriculture Soil Conservation, Washington (D.C.), **Technical Bulletin**, n.1026, 1950.
- GLADKI, H. Discussion of Determination of Sand Roughness for Fixed Beds. **Journal of Hydraulic Research**, v. 13, n. 2, 1975.
- GONZÁLEZ, E.M. **Morfología de Playas en Equilibrio. Planta y Perfil (Tese)**. Universidad de Cantabria, Espanha, 1995.
- GRANT, W.D. e MADSEN, O.S. Combined Wave and Current Interaction with Rough Bottom. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, p. 1797-1808, 1979.
- HEY, R. D. Flow Resistance in Gravel Bed Rivers. **Journal of the Hydraulics Division**, ASCE, v. 105, n. HY4, 1979.
- IH CANTABRIA – MMA. **Sistema de Modelagem Costeira, SMC – Brasil: Manual de Referência – Modelo de Propagação de Ondas Monocromáticas em Praias (OLUCA - MC)**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2017a.
- IH CANTABRIA – MMA. **Sistema de Modelagem Costeira, SMC – Brasil: Manual de Referência – Modelo de Propagação de Ondas Espectrais em Praias (OLUCA - SP)**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2017b.
- IH CANTABRIA – MMA. **Sistema de Modelagem Costeira, SMC – Brasil: Manual de Referência – Modelo de Erosão/Sedimentação de Praias (EROS)**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2017c.
- JOHNSON, I.G. **Shore Processes and Shoreline Development**. New York: John Wiley & Sons, Facsimile, 1919, 589p.
- JONSSON, I.G. Wave Boundary Layer and Function Factors. In: Coastal Engineering Conference, 10. **Proceedings...**1966, ASCE, p. 127-148.
- KAMPHUIS, J. W. Determination of Sand Roughness for Fixed Beds. **Journal of Hydraulic Research**, v. 12, n. 2, 1974.
- LEENDERTSE, J.J. A water-quality simulation for well-mixed estuaries and coastal seas. Principles of Computation, Report N°708, v.2, 1970.

- LONGUET-HIGGINS, M.S. e STEWART, R.W. Radiation Stress and Mass Transport in Gravity Waves, with Application to 'Surf Beat'. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 13, p. 481-504, 1962.
- LONGUET-HIGGINS, M.S. e STEWART, R.W. Radiation Stresses in Water Waves - A Physical Discussion with Applications. **Deep-Sea Research**, v. 11, p. 529-562, 1964.
- LONGUET-HIGGINS, M.S. Longshore Currents Generated by Obliquely Incident Sea Waves. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, p. 6778-6801, 1970.
- SAWARAGI, T. Detached Breakwaters. In: International Conference on Coastal Engineering, 23, Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures. **Proceedings...** 1992, Veneza.
- SHEPARD, F.P. e INMAN, D.L. Nearshore Circulation Related to Bottom Topography and Wave Refraction. **Trans. American Geophysical Union**, v. 3, n. 2, p. 196-212, 1950.
- STIVE, M.J.F. e BATTJES, J.A. *A Model for Offshore Sediment Transport*. In: International Coastal Engineering Conference, 19. **Proceedings...**1984, ASCE, p. 1420-1436.
- TANAKA, H. e SHUTO. Function Coefficient for a Wave-Current Coexistent System. **Coastal Engineering**, v. 24, p. 105-128, 1981.
- THORNTON, E.B. Variation of Longshore Current across the Surf Zone. In: Coastal Engineering Conference, 12. **Proceedings...** 1970, ASCE, p. 291-308.
- VAN RIJN, L.C. Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. **Journal of the Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 110, n.10, p 1431-1456, 1984a.
- VAN RIJN, L.C. Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport. **Journal of the Hydraulics Engineering**, ASCE, v. 110, n.11, p 1613-1641, 1984b.
- VAN RIJN L.C. **Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal seas**. University of Utrecht, Delft Hydraulics, Holanda, 2 ed., 1993.
- YALIN, M.S. **Mechanics of Sediment Transport**. Pergamon Press, Braunschweig, Alemanha, 1972.