

materia

Portos e Costas

unidade didáctica 3

Mecánica ondulatoria

Gregorio Iglesias Rodríguez e Rodrigo Carballo Sánchez
Departamento de Enxeñaría Agroforestal
Escola Politécnica Superior

titulación

Grao en Enxeñaría Civil



VICERREITORÍA DE EXTENSIÓN
UNIVERSITARIA, CULTURA E SOCIEDADE



unidade didáctica 3

Mecánica ondulatoria

Gregorio Iglesias Rodríguez e Rodrigo Carballo Sánchez
Departamento de Enxeñaría Agroforestal
Escola Politécnica Superior



© Universidade de Santiago de Compostela, 2011

Deseño

Unidixital

Edita

Vicerreitoría de Extensión Universitaria,
Cultura e Sociedade da
Universidade de Santiago de Compostela
Servizo de Publicacións
da Universidade de Santiago de Compostela

Imprime

Unidixital

Servizo de Edición Dixital da
Universidade de Santiago de Compostela

Dep. Legal: C 270-2011

ISBN 978-84-9887-565-2

ADVERTENCIA LEGAL: reservados todos os dereitos.
Queda prohibida a duplicación, total ou parcial desta
obra, en calquera forma ou por calquera medio (elec-
trónico, mecánico, gravación, fotocopia ou outros) sen
consentimento expreso por escrito dos editores.

MATERIA: Portos e Costas
TITULACIÓN: Enxeñaría Civil
PROGRAMA XERAL DO CURSO
Localización da presente unidade didáctica

Unidade I. Introducción á Enxeñaría de Portos e Costas

BLOQUE TEMÁTICO I: PROCESOS LITORAIS

Unidade II. Ondas de gravidade. Ondada

Unidade III. Mecánica Ondulatoria

Introdución

Propagación da ondada

Rotura da ondada

Modelización Numérica

Unidade IV. Marea e niveis do mar

Unidade V. Correntes litorais

Unidade VI. Transporte de sedimento

Unidade VII. Morfodinámica de praias

BLOQUE TEMÁTICO II: ACTUACIÓNS NO LITORAL

Unidade VIII. Actuacións na Costa

Unidade IX. Obras Portuarias

Unidade X. Xestión Integral da Zona Litoral

ÍNDICE

Presentación	7
Obxectivos	7
Os principios metodolóxicos	7
Os contidos básicos	8
1. Introducción	8
2. Propagación da ondada	10
2.1. Fundamentos	10
2.2. <i>Shoaling</i>	13
2.3. Refracción	14
2.4. Difracción	17
2.5. Refracción-difracción combinadas	19
3. Rotura da ondada	19
3.1. Rotura por forma	19
3.2. Rotura por fondo	20
4. Modelización Numérica	22
4.1. Modelos espectrais	22
4.2. Modelos non espectrais	22
Actividades propostas	24
Avaliación da UD	24
Bibliografía	25

PRESENTACIÓN

A presente Unidade Didáctica (en diante UD) é unha continuación da UD II na que se estudan os fundamentos da ondada. Ambas as unidades encádranse dentro do Bloque I da materia, onde se caracterizan os distintos procesos que determinan o deseño das actuacións litorais (Bloque II). Para o seu deseño, é esencial coñecer o clima marítimo ao que estarán sometidas; en particular, as condicións da ondada constitúen, na maioría dos casos, a solicitude máis importante.

Os datos de partida fan referencia xeralmente á área de profundidades indefinidas fronte ao punto de interese, situado na maioría das ocasións en profundidades reducidas. Non obstante, as características da ondada modifícanse no seu avance dende augas indefinidas ata a costa. Deste modo, o estudo da súa transformación constitúe un aspecto fundamental á hora de determinar as condicións da ondada nunha determinada zona do litoral.

Nesta unidade didáctica preséntanse os principios científicos básicos que determinan a transformación da ondada unha vez que abandona a condición de profundidades indefinidas. Agora ben, a representación axeitada destes procesos constitúe un problema matemático complexo. Por este motivo farase referencia aos distintos modelos numéricos que na actualidade se empregan con este fin.

OS OBXECTIVOS

O obxectivo xeral desta unidade didáctica é que o alumno coñeza os métodos analíticos e numéricos necesarios de modo que sexa capaz de caracterizar a ondada nunha determinada zona costeira. Con este fin fórmulanse os seguintes obxectivos específicos:

- Coñecer os distintos procesos que producen a transformación da ondada.
- Coñecer as bases de cálculo da modificación da ondada durante a súa propagación por un fondo de profundidade variable con ou sen a presenza de obstáculos.
- Coñecer as ferramentas máis avanzadas para a determinación da transformación da ondada.

OS PRINCIPIOS METODOLÓXICOS

A metodoloxía de ensino utilizado axustarase ás pautas do Espazo Europeo de Educación Superior (EEES), que computa as horas totais de traballo do alumno como a suma das horas presenciais e as horas non presenciais. O traballo non presencial inclúe toda unha serie de tarefas que os alumnos

realizarán fóra das horas lectivas e que teñen como finalidade a preparación e o estudo posterior das actividades realizadas nas sesións presenciais. A continuación, detállanse as distintas actividades que o alumno realizará ao longo do desenvolvemento da presente UD:

- 1) **Clases expositivas.** Consistirán na presentación e desenvolvemento dos contidos teóricos fundamentais da materia que se realizará mediante clases en grupos grandes e de carácter principalmente maxistral. Os alumnos, ademais de asistiren e aproveitaren as explicacións realizadas durante o desenvolvemento das clases, deberán dedicar un determinado tempo á preparación previa dos contidos que se tratarán en clase, así como ao seu estudo posterior. Co fin de fomentar o traballo diario do alumno, dentro desta UD prográmase un control "tipo test".
- 2) **Seminarios interactivos.** Os seminarios están concibidos como un conxunto de actividades nos que a participación do alumnado é parte fundamental. Durante o seu desenvolvemento, os alumnos resolverán exercicios e problemas, fundamentalmente en grupos, que lles permitan poñer a punto e aplicar de forma práctica os coñecementos teóricos derivados das clases expositivas. Do mesmo xeito, tamén se formularán cuestións de difícil comprensión que deberán ser resoltas polo alumnado. Para o desenvolvemento axeitado dos seminarios será precisa a preparación previa dos contidos que se tratarán en cada unha das sesións. Con este fin, tanto os boletíns de exercicios e problemas como as cuestións serán facilitadas coa suficiente antelación.
- 3) **Prácticas.** Mostraranse ao alumno as diferentes partes das que consta un estudo de clima marítimo, así como a forma de proceder para a súa elaboración. Vinculadas ás practicas propónse un actividade de grupo (ver apartado correspondente).
- 4) **Titorías en grupo e individuais.** Atenderase o alumnado para discutir, comentar, aclarar e resolver cuestións concretas en relación as súas tarefas dentro da unidade didáctica. As titorías tamén permitirán ao profesor realizar un seguimento do traballo desenvolvido, así como verificar o correcto funcionamento dos grupos durante os seminarios interactivos e nas actividade propostas.

OS CONTIDOS BÁSICOS

1. Introducción

A ondada xérase en alta mar, como consecuencia da acción do vento sobre a superficie dos océanos. Ao abandonar a zona de xeración este propágase cara á costa. No seu avance, e unha vez que abandona a condición de profundidades indefinidas, o fondo do mar comeza a interaccionar coa onda e, polo tanto, a modificar as súas características (Figura 1).

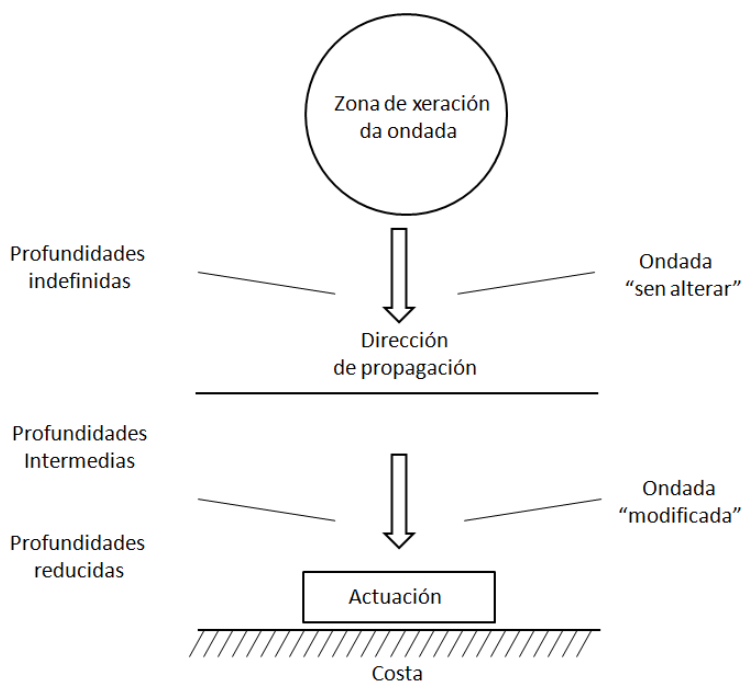


Figura 1. Esquema xeral do proceso de transformación da ondata.

Os procesos que poden afectar a unha onda a medida que se propaga dende augas profundas a augas superficiais son:

- 1) Procesos de Propagación: *shoaling*, refracción e difracción.
- 2) Mecanismos Sumidoiro: disipación debido a fricción, percolación e rotura.
- 3) Mecanismos Fonte: crecemento por vento.
- 4) Interaccións: interacción entre ondas, interacción onda-corrente.

Os tres primeiros procesos son os denominados **procesos de propagación**. Debido a eles prodúcese a converxencia ou diverxencia das ondas debido á configuración do fondo do mar, provocando que a enerxía se concentre ou disperse nunha determinada zona. Os tres seguintes son mecanismos sumidoiro, xa que disipan a enerxía das ondas. Pola contra, o vento é unha fonte externa que transmite enerxía á ondata. Por último, a interacción entre ondas leva asociada unha transferencia de enerxía entre elas, mentres que a presenza de correntes pode afectar tanto á propagación das ondas coma á disipación de enerxía.

2. Propagación da ondada

2.1. Fundamentos

A Teoría máis sinxela á hora de describir a propagación da ondada débese a Airy (1845). Segundo esta Teoría, tamén coñecida como *Teoría de Pequena Amplitude ou Teoría Lineal*, a superficie libre dunha onda que se propaga na dirección positiva do eixe x (Figura 2) pódese representar como:

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (1)$$

Onde H é a altura de onda, σ a frecuencia angular, k o número de onda e t o tempo.

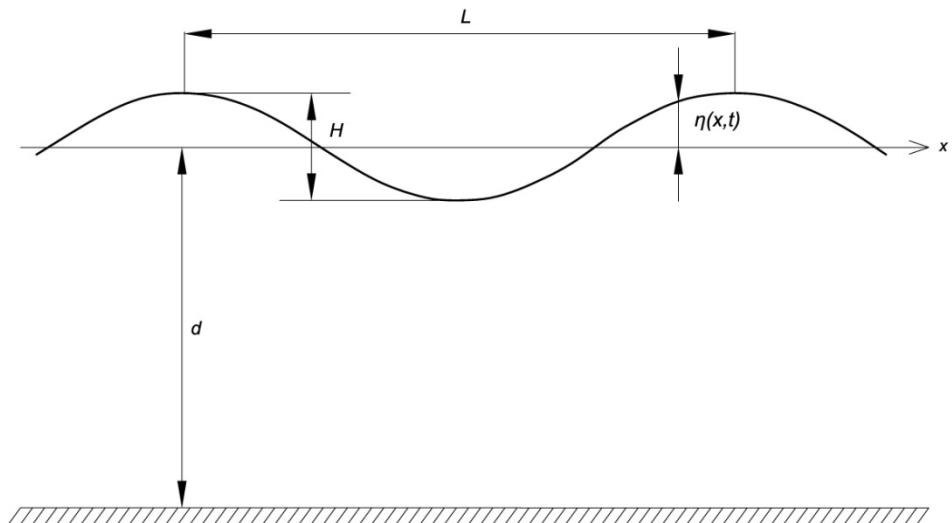


Figura 2. Parámetros característicos dunha onda.

No caso de que a onda se propague en dirección oblicua á costa, considerando un sistema de coordenadas cartesianas (x,y) , a superficie libre pódese representar como:

$$\eta(x,y,t) = \frac{H}{2} \cos(k \cos \theta x + k \sin \theta y - \sigma t) \quad (2)$$

onde θ é o ángulo de incidencia entre o tren de ondas e o eixe x (Figura 3).

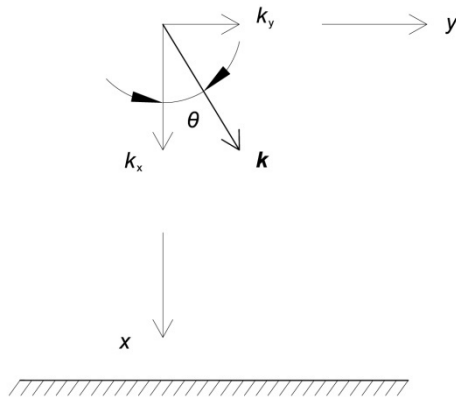


Figura 3. Definición do vector número de onda e do sistema de referencia.

Pódese definir o vector número de onda como $\mathbf{k} = (k_x, k_y) = (k \cos \theta, k \sin \theta)$, cuxa dirección denota a dirección de propagación e o seu módulo é o número de onda, $k = 2\pi/L$. A lonxitude de onda, L , pódese obter a partir da relación de dispersión:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd) = L_0 \tanh(kd) \quad (3)$$

onde L_0 é a lonxitude de onda en profundidades indefinidas, T é o período da onda, g é a aceleración da gravidade e d , a profundidade.

Defínese a función escalar de fase como:

$$\Omega(x, y, t) = (k \cos \theta x + k \sin \theta y - \sigma t) \quad (4)$$

O lugar xeométrico dos puntos que cumpren $\Omega = cte$ coñécese como *fronte de onda*.

O vector número de onda \mathbf{k} pódese expresar como:

$$\mathbf{k} = \nabla \Omega \quad (5)$$

A curva tanxente en cada punto ao vector número de onda denomínase *raio* ou *ortogonal* e representa a traxectoria seguida pola onda.

A frecuencia angular pódese determinar a partir da función escalar de fase como:

$$\sigma = -\frac{\partial \Omega}{\partial t} \quad (6)$$

Das expresións (4), (5) e (6) obtense **Ecuación de Conservación do Número de Onda**:

$$\frac{\partial \mathbf{k}}{\partial t} + \nabla \sigma = 0 \quad (7)$$

Esta ecuación indica que calquera variación temporal no vector número de onda ten que ser compensada cun cambio espacial na frecuencia angular. Se asumimos unha ondada estacionaria, entón $\nabla \sigma = 0$, ou o que é o mesmo, o período da onda mantense constante na propagación.

No caso dunha ondada estacionaria, e supoñendo que non existe disipación nin a presenza dunha corrente, pódese expresar a **Ecuación de Conservación do Fluxo de Enerxía** como:

$$\nabla \cdot (E \mathbf{C}_g) = 0 \quad (8)$$

O termo $E \mathbf{C}_g$ é o fluxo de enerxía, \mathbf{P} , sendo E a densidade de enerxía:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (9)$$

onde ρ é a densidade da auga do mar e \mathbf{C}_g o vector velocidade de grupo, cuxa dirección é a de propagación da ondada e o seu módulo é:

$$C_g = nC \quad (10)$$

A celeridade de fase, C , pódese expresar como:

$$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kd) \quad (11)$$

e n é:

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \quad (12)$$

Durante o proceso de propagación vanse producir unha serie de modificacións na altura, lonxitude e celeridade de onda, así como na súa dirección de propagación. De modo xeral, a medida que a profundidade diminúe, a lonxitude de onda tamén diminúe como consecuencia da relación de dispersión (3). Posto que o período permanece constante ao longo da propagación, a celeridade de fase diminúe.

A continuación trátanse os principios físicos relevantes na propagación da ondada dende profundidades indefinidas ata profundidades reducidas: *shoaling*, refracción e difracción.

2.2. Shoaling

O *shoaling* fai referencia ás modificacións nas características da ondada cando esta se aproxima de forma perpendicular á costa. Para o seu estudo imos empregar a hipótese de conservación do fluxo de enerxía (8). Posto que o fluxo de enerxía permanece constante, tense:

$$P = EC_g = cte \quad (13)$$

$$E_0 C_{g0} = EC_g = cte \quad (14)$$

A partir da ecuación da densidade de enerxía (9) pódese relacionar a altura de onda H nun determinado punto de interese coa altura de onda en profundidades indefinidas H_0 :

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_g}} = K_s \quad (15)$$

onde K_s é coñecido como o coeficiente de *shoaling*. Este coeficiente toma valor de 1.0 en profundidades indefinidas, diminúe coa profundidade ata 0.91 e aumenta ata infinito a medida que esta tende a cero (Figura 4). O incremento da altura de onda está limitado polas condicións de rotura que se discutirán no apartado 3.

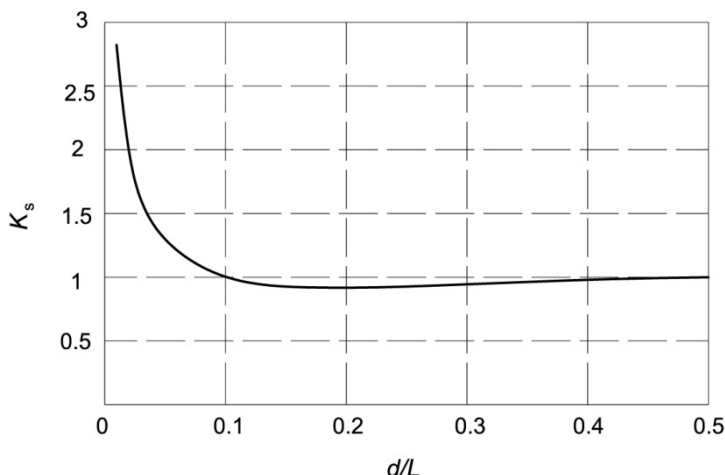


Figura 4. Coeficiente de *shoaling*.

2.3. Refracción

Cando a ondada se aproxima de forma oblicua á costa, ademais de *shoaling* prodúcese refracción. Este proceso fai referencia ao cambio na dirección de propagación da ondada, de tal xeito que as fronteas tenden a poñerse paralelas ás liñas batimétricas.

Debido a que as ondas posúen unha incidencia oblicua, ao longo da fronte vai existir unha variación na profundidade. A velocidade de propagación da onda é función da profundidade (11), incrementándose ao longo da fronte dende a zona máis superficial cara á zona máis profunda. Como resultado, a fronte xira e tende a orientarse de forma paralela ás liñas batimétricas (Figura 5).

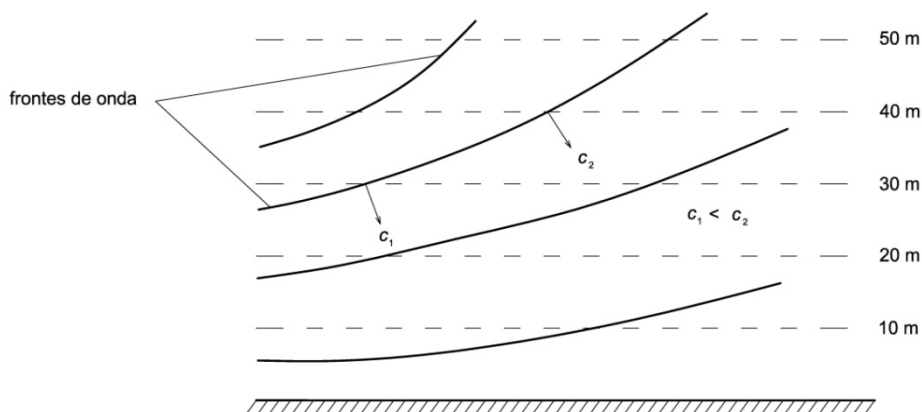


Figura 5. Ondada con incidencia oblicua. Variación da profundidade ao longo das fronteas de onda.

Para determinar o cambio de dirección abonda con recorrer á expresión (5). Posto que o vector número de onda \mathbf{k} é o gradiente dun escalar, tense:

$$\nabla \times \mathbf{k} = 0 \quad (16)$$

En coordenadas cartesianas, a ecuación (16) convértese en:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial y}(k \cos \theta) = 0 \quad (17)$$

No caso simplificado dunha costa con liñas batimétricas rectas e paralelas, a ecuación (17) redúcese a:

$$\frac{d}{dx}(k \sin \theta) = 0 \quad (18)$$

Se asumimos unha ondada estacionaria tense que $k=2\pi/L=2\pi/(CT)=cte/C$. A ecuación (18) redúcese entón a:

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{\sin\theta}{C}\right)=0 \quad \text{ou} \quad \frac{\sin\theta}{C}=cte \quad (19)$$

Do mesmo xeito, pódese relacionar a dirección de propagación en profundidades indefinidas e a unha profundidade arbitraria:

$$\frac{\sin\theta}{C}=\frac{\sin\theta_0}{C_0} \quad (20)$$

Esta identidade coñécese como a **Lei de Snell**, e indica que a medida que a celeridade de fase diminúe conforme se reduce a profundidade, θ tamén diminúe. Polo tanto, as fronteas tenden a orientarse de forma paralela ás liñas batimétricas. Como resultado do proceso de refracción, producírase a converxencia e diverxencia da ondada. Desta forma, a ondada tenderá a concentrar a súa enerxía en cabos e a reducir a súa intensidade en golfos (Figura 6).

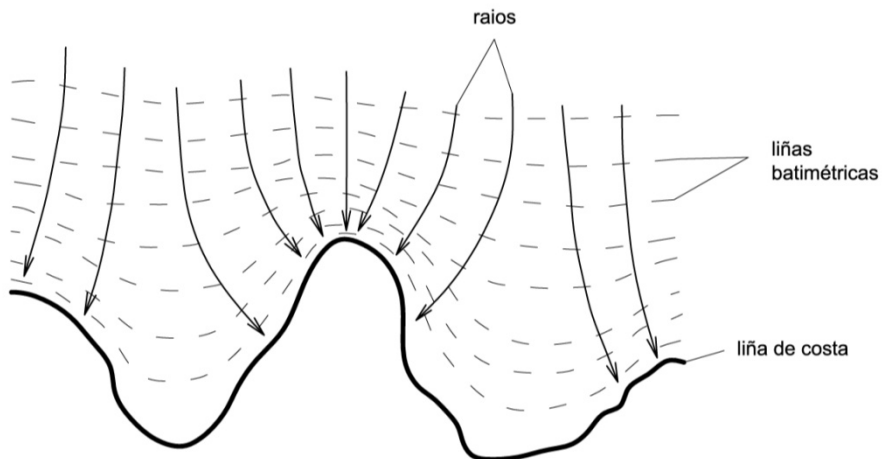


Figura 6. Converxencia e diverxencia da ondada debido a refracción.

A variación de altura de onda ao longo dos raios pódese determinar a través da hipótese de conservación do fluxo de enerxía (8). Asumindo que non hai transferencia lateral de enerxía ao longo da fronte de onda, o fluxo de enerxía entre dous raios separados unha distancia b (Figura 7) permanece constante:

$$Pb = EC_g b = cte \quad (21)$$

$$E_0 C_{g0} b_0 = EC_g b \quad (22)$$

Se se emprega de novo a ecuación da densidade de enerxía (9) e se substitúe en (22) obtense:

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_g}} \sqrt{\frac{b_0}{b}} = K_s K_r \quad (23)$$

onde

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} \quad (24)$$

é o coeficiente de refracción. No caso idealizado con batimetría recta e paralela (Figura 7):

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} = \sqrt{\frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}} \quad (25)$$

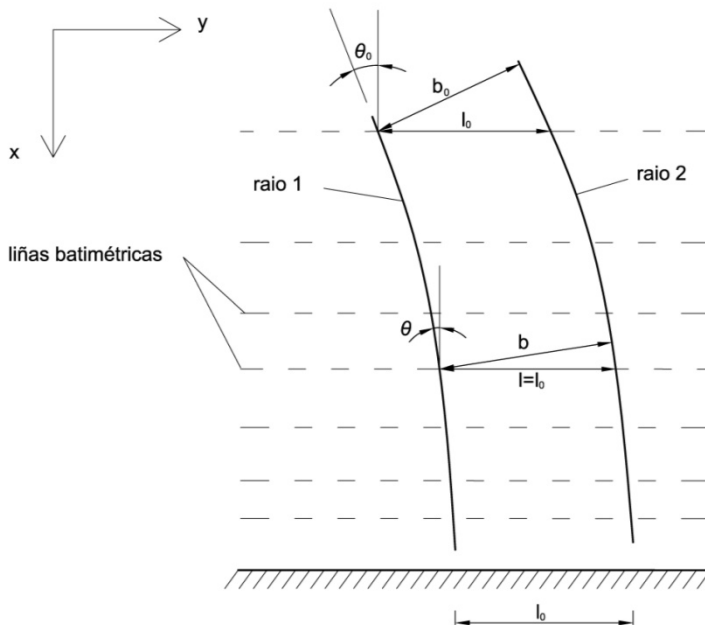


Figura 7. Características dos raios durante a refracción sobre batimetría idealizada.

2.4. Difracción

A difracción da ondada é o fenómeno polo cal a enerxía se transmite lateralmente ao longo da fronte da onda (ou o que é o mesmo, a través dos raios). A análise deste proceso resulta de gran importancia á hora de deseñar determinadas actuacións no litoral, como é o caso dun porto. Neste caso, un dos factores principais que se debe considerar son as condicións de ondada no seu interior. Unha vez que a ondada atravesa a bocana, esta pode verse afectada polo *shoaling* ou a refracción; non obstante, o proceso dominante que determina as condicións de axitación é habitualmente a difracción.

Este fenómenoponse de manifesto na súa forma máis destacada cando un tren de ondas resulta interrompido por un obstáculo natural ou artificial: dique, baía, cabo... (Figura 8). Se non existise unha cesión lateral de enerxía, as ondas superarían o extremo do obstáculo sen experimentar ningún tipo de modificación, deixando na zona a sotavento unha superficie de auga totalmente en calma.

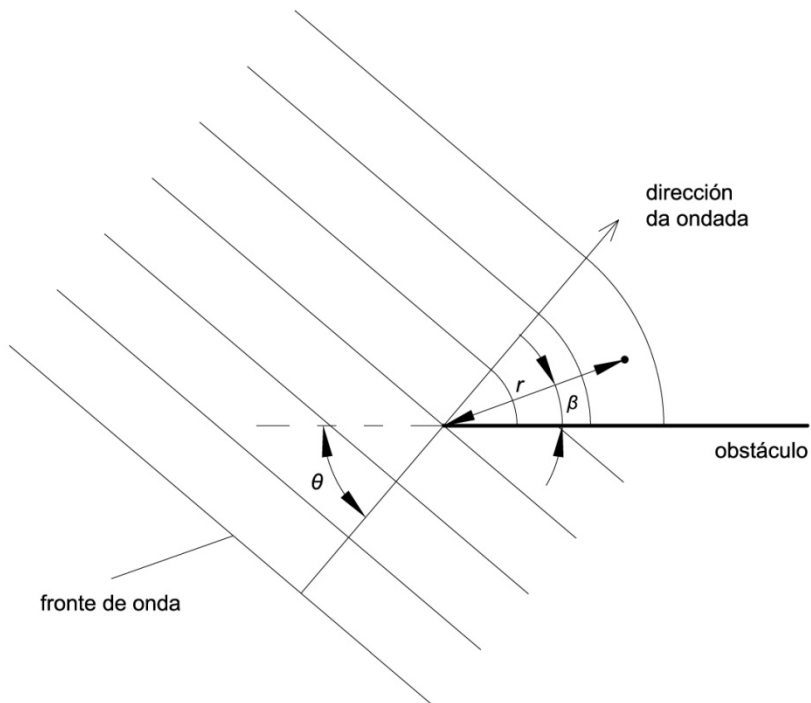


Figura 8. Difracción da ondada nas proximidades dun obstáculo

A figura 8 mostra un tren de ondas que se aproxima a un obstáculo semi-infinito e impermeable nunha zona con profundidade constante (é dicir, non existe refracción nin *shoaling*). Unha parte da ondada golpea o

obstáculo sendo parcialmente reflectido e parcialmente disipado. A parte que supera o extremo do obstáculo difrátase. O extremo do obstáculo actúa como foco emisor, de modo que as fronteiras da ondada difractada formarán arcos circulares concéntricos con altura de onda decrecente ao longo deles.

Pódese definir un coeficiente de difracción:

$$K_d = \frac{H_d}{H_i} \tag{26}$$

onde H_d é a altura de onda difractada nun punto da zona de resguardo e H_i a altura de onda incidente no extremo do obstáculo. Se definimos r como a distancia radial entre o extremo do obstáculo e un punto de interese na zona de resguardo e β o ángulo entre o obstáculo e o vector de posición radial, tense que para unha ondada cun ángulo θ de incidencia respecto do obstáculo, entón $k'=f(r/L, \beta, \theta)$. Polo tanto, para un determinada localización na zona de resguardo, o coeficiente de difracción é función do período e a dirección da ondada incidente.

Para a solución deste problema Penny e Price (1952) mostraron que no caso de considerar a difracción de ondas que inciden sobre un obstáculo semi-infinito, ríxido e impermeable, podíase aplicar a solución de Sommerfeld (1896) para a difracción da luz que pasa a través dun cristal. Wiegel (1962) presentou os resultados desta formulación por medio de diagramas para ángulos θ entre 15° e 180° en intervalos de 15° (Figura 9).

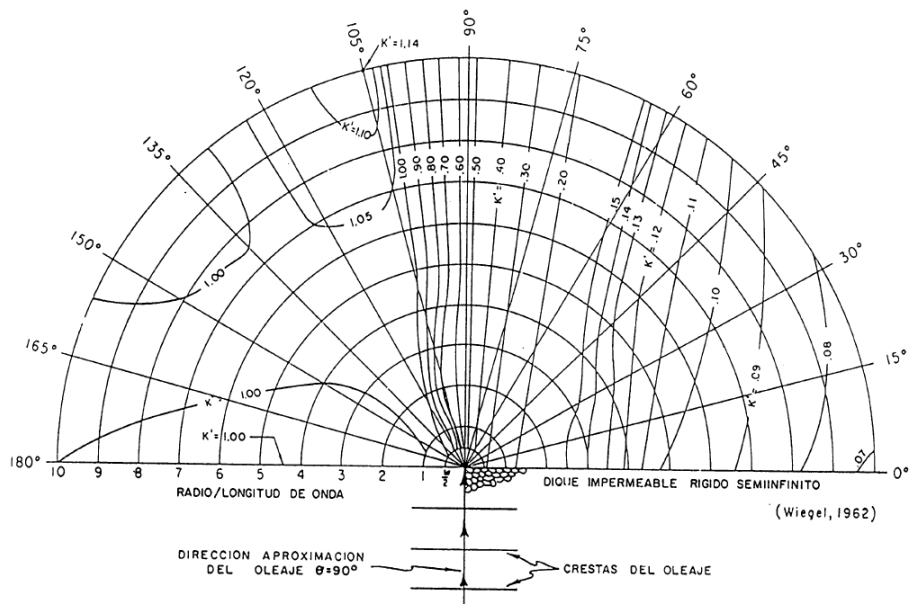


Figura 9. Diagrama de difracción da ondada con $\theta = 90^\circ$.

2.5. Refracción-difracción combinadas

Os procesos de refracción e difracción normalmente acontecen simultaneamente. Ao non existir unha situación de difracción pura, a refracción provocará que as fronte de onda non sexan paralelas. No caso de existir un obstáculo na propagación da ondada, a refracción afectará, polo tanto, á zona de sombra, de modo que as fronte non serán círculos perfectos. Trátase, sen dúbida, dunha situación de resolución complexa e non se disporán de gráficas xerais para a súa resolución (cada fondo tería a súa).

Sen dúbida, o gran avance realizado para a modelización de ambos os dous fenómenos débese a Berkhoff (1972). A súa **ecuación de pendente suave** (*mild slope equation*) describe os efectos combinados da refracción, o *shoaling* e a difracción de ondas de gravidade periódicas, considerando as posibles reflexións da onda incidente, e coa única restrición de que as pendentes do fondo sexan suaves. Esta ecuación pódese expresar en función do potencial de velocidades, Φ , como:

$$\nabla \cdot (\mathbf{C}\mathbf{C}_g \nabla \Phi) + k^2 (\mathbf{C}\mathbf{C}_g \Phi) = 0 \quad (27)$$

Trátase dunha ecuación elíptica resultado de integrar a ecuación de Laplace en profundidade, ignorando no proceso os termos de orde elevada no gradiente de profundidade e os efectos non lineais. A partir da ecuación de Berkhoff deducíronse numerosas variantes e aproximacións. No apartado 4.2 preséntanse os distintos modelos que a resolven.

3. Rotura da ondada

A rotura pode ser por forma ou por fondo.

3.1. Rotura por forma

A rotura do perfil dunha onda prodúcese, principalmente, pola **inestabilidade do peralte** (H/L). O peralte máximo dunha onda de gravidade é (Miche, 1944):

$$\left(\frac{H_b}{L_0} \right)_{\max} = 0.142 \tanh(kd) \quad (28)$$

onde H_b é a altura de onda no punto de rotura. Se a rotura acontece en profundidades indefinidas, a ecuación (28) convértese en $H_b/L_0=0.142$.

3.2. Rotura por fondo

Á hora de levar a cabo unha actuación no litoral é moi importante analizar o condicionante da rotura polo fondo. Isto é debido a que moitas destas actuacións sitúanse a pouca profundidade e polo tanto, atópanse "protexidas" por un fondo que provoca a rotura das ondas de altura superior a certo valor.

Na *Teoría de Onda Solitaria* (McCowan, 1894; Munk, 1949) o criterio de rotura é:

$$\frac{H_b}{d_b} = 0.78 \quad (29)$$

sendo d_b a profundidade de rotura.

Ó criterio de Goda (1970) é:

$$\frac{H_b}{d_b} = 0.17 \frac{L_0}{d_b} \left[1 - e^{-\left\{ \frac{1.5\pi d_b (1+15m^{4/3})}{L_0} \right\}} \right] \quad (30)$$

Estes criterios pódense empregar xunto coas expresións dos procesos de propagación descritas previamente co fin de determinar as características da onda en rotura e o punto (a profundidade) de rotura.

A forma coa que rompe unha onda por redución da profundidade pódese determinar a través do **número de Iribarren**, I_r , que é función da pendente media do talude, m , e do peralte da onda:

$$I_r = \frac{m}{\sqrt{H_b/L_0}} \quad (31)$$

Segundo este número, existen catro tipos de rotura da ondada (Táboa 1, Figura 10).

Táboa 1. Tipos de rotura en función do número de Iribarren.

I_r	Tipo
<0.5	Descristamento
0.5-2.5	Voluta
2.5-3	Colapso
>3	Oscilación

A rotura en **descristamento** ten lugar principalmente en praias con pendente suave, que a miúdo se denominan praias disipativas. Caracterízase pola aparición de espuma e turbulencia na crista da onda. Normalmente este tipo de rotura comeza a certa distancia da costa, abrangendo unha ampla zona na que a enerxía da onda se disipa de forma gradual. Pola contra, a rotura en **voluta** é un proceso moito máis brusco que se sitúa nunha franxa reducida. Este tipo de rotura prodúcese sobre fondos con pendente relativamente pronunciada e caracterízase porque a crista, que avanza máis rápido que a propia onda, xira sobre si mesma e forma unha voluta. Os dous últimos tipos de rotura prodúcense sobre fondos con pendente pronunciada. As praias onde se producen denomínanse a miúdo praias reflexantes, sendo tamén habituais sobre diques en talude. A rotura en **oscilación** caracterízase porque a onda avanza, deformándose e alisándose co fondo ao tempo que se produce a súa reflexión parcial. Finalmente, a rotura en **colapso** está a medio camiño entre as roturas en voluta e oscilación.

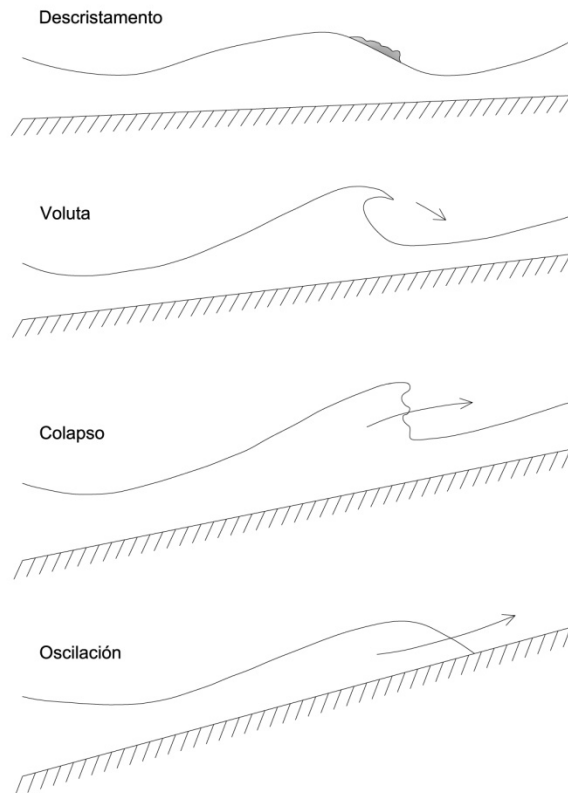


Figura 10. Tipos de rotura da ondada.

4. Modelización numérica

Os modelos de ondada pódense clasificar en **espectrais e non espectrais** (Iglesias, 2001).

4.1. Modelos espectrais

Os modelos espectrais describen a variación no tempo e no espazo da **función de densidade espectral**, a partir dun balance de enerxía ou de acción de onda.

Na súa representación espectral, a ondada está formada por infinitas compoñentes, caracterizadas cada unha delas por unha certa dirección, frecuencia e fase. A función de densidade espectral representa o reparto de enerxía entre as distintas frecuencias e direccións. O feito de empregar a función de densidade espectral para representar a ondada supón renunciar a resolver a fase de cada unha das infinitas ondas compoñentes e asumir unha serie de hipóteses respecto da distribución das fases. A función de densidade espectral pode referirse á enerxía, á acción de onda ou á varianza da superficie libre. No caso de que se pretenda ter en conta a interacción onda-corrente é moi útil empregar a acción de onda, xa que en presenza de correntes esta si se conserva mentres que a enerxía non. A principal limitación dos modelos espectrais é que non permiten representar variacións rápidas da ondada (en poucas lonxitudes de onda), como as que resultan da interacción con estruturas. Nestes casos de difracción forte é necesario empregar modelos non espectrais.

Dentro dos modelos de dominio público destaca o modelo *SWAN*, que permite analizar tanto a xeración como a transformación da ondada. Este modelo pódese aplicar en profundidades reducidas xa que, conservando os termos fonte, engade os de disipación por fricción e por rotura da onda por fondo.

4.2. Modelos non espectrais

Os modelos non espectrais son aqueles que non se fundamentan na función de densidade espectral e na ecuación de balance de enerxía, senón en ecuacións relacionadas directamente co estado instantáneo do movemento. Dentro dos modelos non espectrais diferenciaremos os seguintes tipos: (i) de raios; (ii) derivados da ecuación de pendente suave; (iii) de Boussinesq; (iv) Navier-Stokes.

Os **modelos de raios** son as primeiras ferramentas que se empregaron para calcular a propagación da ondada, sendo habitual o seu emprego ata hai poucos anos. Están baseados na teoría da óptica xeométrica ou aproximación de refracción e consideran unicamente os fenómenos de refracción e *shoaling*. Posto que non teñen en conta a difracción, son inadecuados en moitas situacións e fóronse abandonando a favor de modelos máis complexos que teñen en conta tamén este proceso.

Hai uns anos desenvolveuse un modelo de raios baseado na ecuación de pendente suave (Iglesias, 2001; Iglesias & Negro, 2003). Trátase dun modelo máis complexo que os modelos de raios convencionais, que ten en conta a difracción (ademais da refracción e o *shoaling*).

Os **modelos baseados na ecuación de pendente suave** son, sen dúbida, os máis usados hoxe en día. En función da súa natureza cabe distinguir modelos elípticos, parabólicos e hiperbólicos. Posto que a ecuación de pendente suave na súa forma completa é elíptica, para resolvela é necesario formular condicións de contorno ao longo de toda a curva que encerra o dominio de cálculo, ademais de ter que resolverse de forma simultánea en todos os puntos do dominio. Na maioría das aplicacións prácticas, isto implica recursos computacionais moi elevados. Os modelos elípticos son adecuados para calcular a axitación en dársenas e, en xeral, para tratar situacións nas que a reflexión xoga un papel importante.

Co fin de reducir o custo computacional, recorreuse a unha **aproximación parabólica** segundo a que se supón que a compoñente reflectida da onda se pode desprezar. Grazas a iso, non son necesarias condicións de contorno augas abaixo, nin tampouco a resolución simultánea do campo de ondas en todo o dominio, é dicir, pódese calcular avanzando dende augas profundas cara á costa. A principal limitación dos modelos parabólicos consiste en que unicamente son aplicables en caso de non existir obstáculos que provoquen a reflexión do tren incidente.

Por último, os **modelos hiperbólicos** representan unha aproximación da ecuación de pendente suave na cal, a diferenza dos modelos anteriores, figura o tempo. Estes modelos son quizais os menos estendidos, algo debido seguramente ás dificultades que presentan á hora de implementar as condicións de contorno, ademais de ser modelos que computacionalmente non son demasiado eficientes.

Entre os modelos dispoñibles que resollen a ecuación de pendente suave destaca o modelo elíptico *CGWAVE* e os de aproximación parabólica *REF-DIF* e *RCPWAVE*.

Os **modelos baseados nas ecuacións de Boussinesq** resollen as ecuacións de conservación formuladas na variable instantánea do desprazamento vertical da superficie e do campo de velocidades horizontal no dominio do tempo. Estes modelos teñen probablemente un brillante futuro pola súa capacidade para reproducir fenómenos non lineais como a xeración de harmónicos. Son os máis axeitados para o estudo da transformación da ondada e os grupos de ondas en profundidades moi superficiais e na zona de rompentes. Entre os modelos de tipo Boussinesq de dominio público destacan o *FUNWAVE* da Universidade de Delaware e o modelo *COULWAVE* da Universidade de Cornell.

Finalmente, é necesario mencionar os **modelos que resollen as ecuacións de Navier-Stokes** promediadas segundo Reynolds (RANS). A pesar do aumento no potencial de cálculo durante os últimos anos, a principal limitación destes modelos é, sen dúbida, o custo computacional.

ACTIVIDADES PROPOSTAS

Ao longo do desenvolvemento da UD iranse propoñendo diferentes boletíns de exercicios e problemas. Algúns deles serán resoltos de forma individual, mentres que os de maior complexidade resolveranse en grupos durante os seminarios interactivos. Dos boletíns propostos, certos problemas e exercicios de interese terán que ser entregados á finalización das sesións de seminario, ou ben nos prazos que no seu momento se determinen.

Por outra banda, vinculado ás prácticas realizadas, propónse un traballo de grupo. Este consistirá na elaboración dun estudo de clima marítimo dunha zona costeira concreta, a través do cal se poidan determinar as condicións da ondada para o deseño dunha actuación no litoral. Este estudo deberá ser presentado e defendido nas sesións de clases expositivas, sendo precisa a participación de todos os compoñentes do grupo.

AVALIACIÓN DA UNIDADE DIDÁCTICA

A avaliación desta UD farase no conxunto da materia. Recorrerase a un sistema de avaliación continua no que se terán en consideración diferentes aspectos relacionados non só cos coñecementos finais adquiridos senón tamén co propio proceso de aprendizaxe. Os diferentes aspectos que se avaliarán, os criterios e instrumentos que se empregarán, así como o seu valor na cualificación final do alumno recóllense na Táboa 2.

Táboa 2. Aspectos, criterios e instrumentos de avaliación.

Aspectos	Criterios	Instrumento	Valor (%)
Clases expositivas	<ul style="list-style-type: none">- Asistencia- Coñecementos teóricos	<ul style="list-style-type: none">- Folla de sinaturas- Control	20
Seminarios Interactivos	<ul style="list-style-type: none">- Asistencia- Participación- Capacidade de traballo en grupo- Formulación e resolución de exercicios e problemas	<ul style="list-style-type: none">- Folla de sinaturas- Observacións e anotacións- Entrega de problemas e exercicios	20
Prácticas	<ul style="list-style-type: none">- Asistencia- Aproveitamento das prácticas	<ul style="list-style-type: none">- Folla de sinaturas- Observacións e anotacións- Entrega e defensa de actividade proposta	20
Exame	<ul style="list-style-type: none">- Coñecementos teóricos- Formulación e resolución de exercicios e problemas	<ul style="list-style-type: none">- Proba escrita	40

BIBLIOGRAFÍA

- DEAN, R. G. E DALRYMPLE, R. A. (1991): *Water Waves Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific.
- DINGEMANS, M. W. (1997): *Water Wave Propagation over Uneven Bottoms (2 vol.)*. World Scientific.
- IGLESIAS, G. E NEGRO, V. (2003): *An Engineering Approach to Wave Propagation*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water and Maritime Engineering, 156 (2), pp. 165-174.
- IGLESIAS, G. (2001): *Modelo Rayo-Frente de Refracción-Difracción Combinada. Caracterización Físico-Matemática de la Refracción-Difracción*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- KAMPHUIS, J. W. (2000): *Introduction to Coastal Engineering and Management*. World Scientific.
- KINSMAN, B. W. (2002): *Wind Waves*. Dover Publications.
- MASSEL, S. R. (1989): *Hydrodynamics of Coastal Zones*. Elsevier.
- MEI, C. C. (1989): *The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*. World Scientific.
- PHILLIPS, O. M. (1977): *The Dynamics of the Upper Ocean*. Cambridge University Press.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2000). *Coastal Engineering Manual (6 vol.)*. Washington, D.C.
Disponible en:
<http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>



Unha colección orientada a editar materiais docentes de calidade e pensada para apoiar o traballo de profesores e alumnos de todas as materias e titulacións da universidade



SERVIZO DE NORMALIZACIÓN
LINGÜÍSTICA

