



APLICAÇÃO DE UM CANAL NUMÉRICO DE ONDAS AO ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO DE ESTRUTURAS MARÍTIMAS.

T.C.A. Oliveira¹, D. González-Marco¹, A. Sánchez-Arcilla¹, X. Gironella¹,
M. A. Celigueta², E. Oñate²

¹Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya, c/Jordi Girona 1-3, Campus Nord ed. D1, 08034 Barcelona, e-mail: tiago.oliveira@upc.edu

²Centre Internacional de Mètodes Numèrics en l'Enginyeria (CIMNE), Universitat Politècnica de Catalunya, c/Jordi Girona 1-3, Campus Nord ed. C1, 08034 Barcelona.

RESUMO

Neste trabalho a geração e a propagação de ondas num canal numérico é analisada. A geração de ondas regulares através de três geradores (*flap*, pistão e cunha) é testada, usando-se para o efeito o modelo PLIM que utiliza as formulações de Particle Finite element Method (PFEM). As potencialidades de aplicação do modelo PLIM ao estudo do comportamento hidráulico de estruturas costeiras são demonstradas, recorrendo para tal à simulação numérica de um ensaio em modelo físico de um quebra-mar submerso e à determinação de forças provocadas por uma onda num caixotão.

1 INTRODUÇÃO

Um canal numérico de ondas capaz de simular os processos físicos presentes na interação onda-estrutura poderá ser uma ferramenta útil quando utilizada na resolução de alguns dos problemas de Engenharia Costeira e Portuária. Nos últimos anos verificou-se um aumento no interesse de desenvolvimento de este tipo de ferramentas (Gotoh et al. 2005; Lara et al. 2006; Shao et al. 2006), motivado principalmente pelos avanços verificados nas últimas décadas nas formulações numéricas especializadas na resolução de problemas de interação fluido-estrutura.

O modelo PLIM (Particle LIM Model) é um canal numérico de ondas desenvolvido no Laboratório de Engenharia Marítima (LIM) da Universidade Politècnica da Catalunha (UPC) com a colaboração do Centro Internacional de Métodos Numéricos em Engenharia (CIMNE) da UPC.

O canal numérico PLIM utiliza uma formulação concebida para o estudo da interação fluido-estrutura conhecida na literatura como Particle Finite Element Method (PFEM), sendo a característica principal desta formulação o uso de uma descrição lagrangiana para modelar o movimento dos nós (partículas) nos dois domínios a simular: fluido e estrutura (Oñate et al. 2004a).

A simulação numérica de um canal de ondas implica a consideração de alguns aspectos que não costumam estar presentes nos problemas convencionais de interação fluido-estrutura para o qual foi desenvolvido o PFEM. A geração de ondas é um desses aspectos e assume um papel importante em qualquer tipo de estudo de interação onda-estrutura. No modelo PLIM as ondas são geradas numa extremidade do canal através do movimento de um gerador semelhante aos usados nos canais experimentais para gerar ondas.

O estudo do comportamento hidráulico de estruturas costeiras é uma das possíveis aplicações do modelo PLIM. Uma das vantagens do desenvolvimento de um canal numérico de ondas é a possibilidade de estudar a interação onda-estrutura a diferentes escalas, incluindo protótipos em escala real, o que reduz consideravelmente os efeitos de escala.

A estrutura deste trabalho é a seguinte: no próximo capítulo abordam-se as principais características da geração de ondas em canais físicos. No capítulo 3 descreve-se o modelo PLIM. No capítulo 4 analisa-se a geração e propagação de ondas regulares no Modelo PLIM

geradas por três tipos de geradores. O capítulo 5 está destinado ao estudo hidrodinâmico de estruturas costeiras num canal numérico abordando-se o caso de um quebra-mar submerso e o caso de uma estrutura vertical (caixotão). No capítulo 6 resumem-se as principais conclusões deste trabalho.

2 GERAÇÃO DE ONDAS EM CANAIS EXPERIMENTAIS

A forma mais comum de gerar ondas em canais físicos é a através do movimento de um gerador que costuma localizar-se numa das extremidades do canal. Dos vários tipos de geradores usados, podemos identificar como mais frequentes os de tipo *flap*, pistão e cunha (Figura 1). Estes diferenciam-se entre si pelo tipo de movimento que executam e consequentemente pelos mecanismos necessários para controlar os seus movimentos. Devido à diferença do tipo de movimento, o campo de velocidades na zona próxima ao gerador varia consoante o tipo de gerador usado. Na Figura 1 representam-se os movimentos característicos e os perfis de velocidade gerados na zona próxima ao gerador tipo *flap*, pistão e cunha.

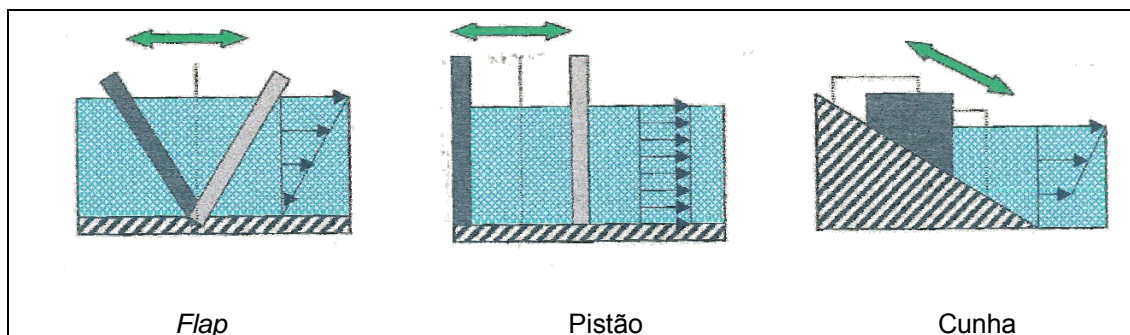


Figura 1 – Perfis de velocidade gerados segundo o movimento e o tipo de gerador.

Se comparamos a forma dos perfis de velocidade na zona envolvente aos três geradores com a forma dos perfis dada pela teoria linear de onda, podemos concluir que cada gerador reproduz condições diferentes. Assim sendo, para o gerador tipo *flap* temos perfis de velocidade que se assemelham às condições de águas profundas, para o pistão condições de águas pouco profundas e para a cunha condições de águas intermédias.

O deslocamento do gerador depende do tipo de onda que se quer gerar. As funções de transferência definem-se como a relação entre o movimento horizontal do gerador e o movimento vertical da superfície livre da água e usam-se para calcular o deslocamento do gerador. Dependem principalmente do tipo de gerador (*pistão*, *flap*, *cunha*,...), da profundidade do canal e do período da onda que se deseja gerar. Para determinar estas funções existem relações matemáticas teóricas que se obtêm resolvendo a equação de Laplace no domínio de estudo (Hughes 1993). Um dos aspectos a ter em conta é a condição fronteira imposta na zona de contacto entre o gerador e o fluido. Nestas zonas impõem-se que a velocidade do gerador e a das partículas de água é igual.

Na Figura 2 apresentam-se as funções de transferência dos geradores *flap*, pistão (Hughes 1993) e *cunha* (Gironella 2004). Estas formulações permitem determinar a relação entre a altura de onda gerada (H) e o deslocamento horizontal realizado pelo gerador (S) e dependem da profundidade do canal (h), do número de onda ($k=2\pi/L$) e no caso do gerador tipo *cunha* também da distância entre a base do canal e a base do gerador (h_0). Na mesma figura apresentam-se as funções de deslocamento que permitem obter a posição do gerador ao longo do tempo. Estas para além dos parâmetros de que dependem as funções de transferência, dependem da frequência angular ($\omega=2\pi/T$) e no caso do *flap* da altura do ponto de referência (z). As funções de deslocamento são periódicas, repetindo-se em intervalos múltiplos do período de onda.

As alturas de onda máximas geradas por cada gerador dependem do período de onda, da profundidade à frente do gerador e da potência do actuador. As curvas de capacidade permitem determinar a altura de onda alcançável por cada tipo de gerador, em função do período e do calado de água existente (Gironella 2004).



	H/S_0	$X(t)$
<i>Flap</i>	$\frac{4 \sinh(kh)}{\sinh(2kh) + 2kh} \left[\sinh(kh) + \frac{1 - \cosh(kh)}{kh} \right]$	$\left(1 + \frac{z}{h} \right) \frac{H (\sinh(2kh) + 2kh) \sin \omega t}{8 \sinh(kh) \left[\sinh(kh) + \frac{1 - \cosh(kh)}{kh} \right]}$
<i>Pistão</i>	$\frac{4 \sinh^2(kh)}{\sinh(2kh) + 2kh}$	$\frac{H \sin \omega t (\sinh(2kh) + 2kh)}{8 \sinh^2(kh)}$
<i>Cunha</i>	$\frac{4 \sinh(kh)}{\sinh(2kh) + 2kh} [\sinh(kh) - \sinh(kh_0)]$	$\frac{H (\sinh(2kh) + 2kh) \sin \omega t}{8 \sinh(kh) [\sinh(kh) - \sinh(kh_0)]}$

Figura 2 – Funções de transferência para os diferentes geradores.

À parte da função de transferência, que limita as alturas possíveis de gerar por cada gerador em função do deslocamento deste, há que ter em conta as funções que limitam a altura de onda alcançável tanto por profundidade como pela inclinação da onda. A limitação de altura de onda por instabilidade devida à inclinação desta aplica-se considerando a teoria linear de onda ($H=0.142L$). Quando supera este valor de inclinação, considera-se que a onda é instável e rebenta, evitando-se a ocorrência destes casos durante a geração de ondas. Em relação à limitação da altura de onda por profundidade, normalmente considera-se a equação de rebentação de McCowan para ondas regulares $0.78 \cdot h$ (Hughes 1993).

Partindo de um deslocamento horizontal determinado, de um calado dado e em função do período, aplicando a função de transferência obtém-se a curva de capacidade teórica ou seja, os valores de altura de onda regulares possíveis de gerar em fundo plano e a uma distância do gerador superior a duas/três vezes a profundidade do canal (onde as ondas espúrias geradas pelo movimento do gerador já se dissiparam e são desprezáveis quando comparadas com a onda progressiva).

A título de exemplo, na Figura 3 apresenta-se a capacidade de geração de um gerador tipo pistão, com um deslocamento horizontal máximo admissível de 2m e para um canal com calado de 2.5m. Neste caso a altura de onda máxima que é possível gerar é de 1.95m estando associada a períodos de onda entre os 3.0s e 3.5s. Para períodos superiores a 3.5s a altura de onda máxima está limitada pela função de transferência e para períodos inferiores a 3.0s pela rebentação por inclinação da onda.

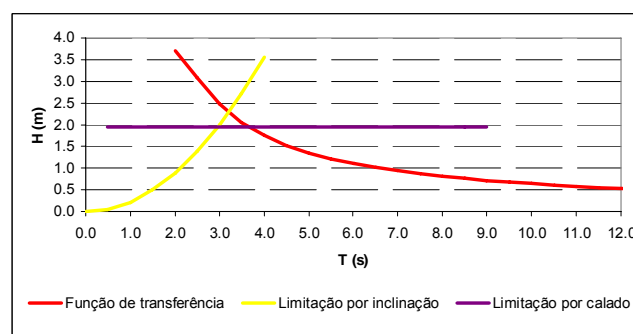


Figura 3 – Capacidade de geração e curvas limítrofes.



3 - O MODELO PLIM

O modelo PLIM (Particle LIM Model) é um canal numérico de ondas que utiliza as formulações de Particle Finite Element Method (PFEM). Podemos definir o PFEM como um método lagrangiano de elementos finitos sem malha, pois se baseia na formulação lagrangiana das equações da mecânica dos fluidos, usa a teoria dos elementos finitos e utiliza funções de forma que só dependem dos nós e não dos elementos que se regeneram em cada intervalo de tempo.

Na literatura científica é possível encontrar várias aplicações deste método (Oñate et al. 2004a) a distintos problemas clássicos de interação fluido-estrutura comprovando que é um método eficaz na resolução de interações complexas entre sólidos flutuantes e sumergido com escoamentos em superfície livre, tendo em conta fenómenos como o salpico de ondas, grande movimentos de sólidos e condições de fricção em problemas de contacto.

As equações de governo são as equações da conservação da massa e da quantidade de movimento, ambas escritas em formulação lagrangiana:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{conservação da massa})$$

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i} p + \frac{\partial}{\partial x_j} \tau_{ij} + \rho f_i \quad (\text{conservação da quantidade de movimento})$$

onde ρ é a densidade, u_i são as componentes cartesianas do campo de velocidades, p é a pressão, τ_{ij} são os elementos do tensor desviador de tensões, f_i são as componentes do termo fonte (em geral a gravidade) e $\frac{DA}{Dt}$ representa a derivada total (ou material) da propriedade A em função do tempo.

Na resolução das equações de fluidos clássicas podemos identificar dois tipos de instabilidades, a produzida pelos termos convectivos e a produzida pela condição de incompressibilidade. A primeira só está presente nas formulações eularianas e ALE enquanto que no PFEM não aparece por ser um método lagrangiano. A instabilidade provocada pela incompressibilidade supera-se modificando as equações de governo e formulando-as mediante o Finite Calculus (FIC) (Oñate et al. 2004b). O método FIC baseia-se em fazer um balanço de fluxos num domínio de fluido finito. Este método introduz termos adicionais nas equações clássicas que dependem das dimensões do domínio de balanço.

Outras características importantes do modelo são:

- A informação entre dois instantes de cálculo consecutivos é transferida através dos nós, porque os elementos são criados de novo em cada instante de tempo executando o modelo um processo de criação de uma nova malha.

- A velocidade em cada nó da malha é a mesma que a velocidade do fluido (ou sólido) nesse ponto, mas cada nó pode ter a sua própria densidade, viscosidade, etc.

- Um nó que representa um sólido é tratado exactamente como um nó que representa um fluido, em termos de malha e de estrutura de dados mas não em termos de cálculo.

- A superfície livre é detectada geometricamente usando o método de Alpha-shape (Idelsohn et al. 2003), que permite a detecção de superfícies livres constantes para além de separações ou uniões de massa fluida (como no caso de galgamentos).

- A densidade da malha pode variar ao longo do domínio de cálculo e também ao longo do tempo devido a um algoritmo que introduz ou remove nós quando é necessário, fazendo com que a distribuição dos nós seja más eficiente em termos de custo computacional.

4 GERAÇÃO DE ONDAS NO MODELO PLIM

O facto de que o modelo PLIM utilize formulações desenvolvidas para o estudo da interacção fluido-estrutura e uma malha flexível, permite a simulação dos mecanismos de geração de ondas usados nos canais físicos. Assim sendo, é possível simular qualquer tipo de gerador sendo este considerado como um sólido com movimento próprio e em contacto com o fluido. O deslocamento do gerador é uma condição de entrada do modelo e pode ser determinado como no caso dos modelos físicos e como foi apresentado no capítulo 2 deste trabalho. Podemos dividir em três passos o processo de preparação da geração de ondas:

- 1) Escolher o tipo de gerador.
- 2) Aplicar a função de transferência do gerador escolhido para obter o seu deslocamento.
- 3) Verificar a capacidade de geração.

O passo número 1 não costuma estar presente nos ensaios em modelo físico porque o tipo de gerador é fixo (embora seja uma decisão que costuma ser bem meditada na fase de construção do canal) mas os passos 2 e 3 coincidem.

Na Figura 4 representam-se os movimentos característicos dos geradores apresentados na Figura 1 simulados com o modelo PLIM.

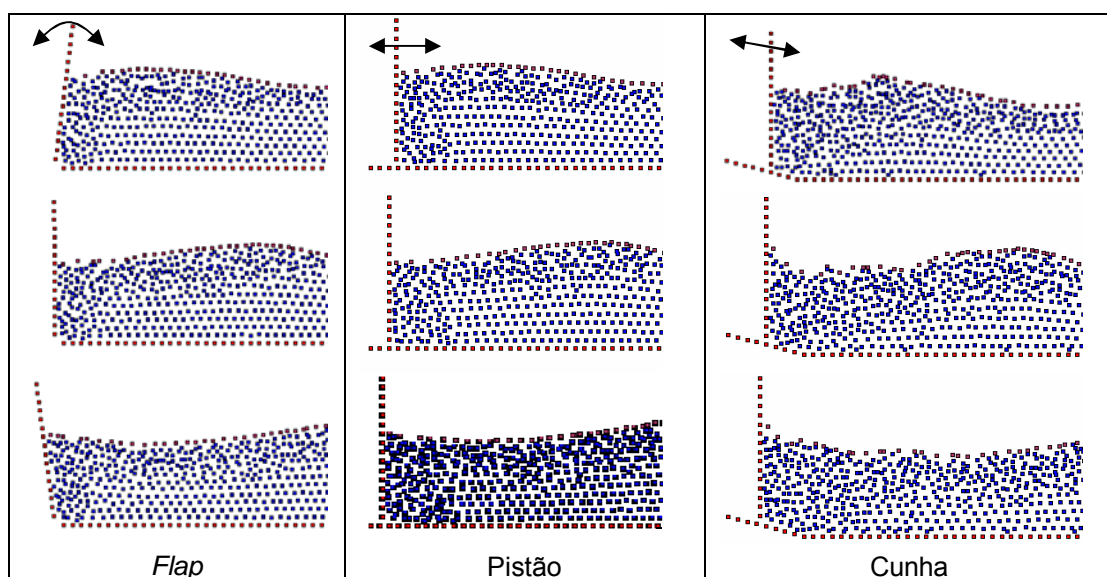


Figura 4 – Geração de ondas no modelo PLIM com os três tipos de geradores.

Com o objectivo de estudar e validar a geração e a propagação de ondas regulares em escala real no modelo PLIM, simulou-se um canal de 277m de comprimento constituído por uma zona de profundidade 14m de 150m de comprimento e por uma praia dissipativa de 122m de comprimento (Figura 5). O objectivo da praia dissipativa, localizada no lado oposto à zona de geração de ondas, é reduzir a reflexão das ondas no canal.

Geraram-se ondas de $H=1\text{m}$ e $T=4\text{s}$ (condição de águas profundas) usando três tipos de geradores (*flap*, *pistão* e *cunha*). Os geradores *flap* e *pistão* têm a mesma geometria e a mesma posição inicial. O gerador tipo *cunha* encontra-se sobre um plano inclinado 15° em relação à horizontal e o seu ponto inicial de contacto com o plano inclinado está a 7m de profundidade e a 25m de distância da zona de profundidade constante.

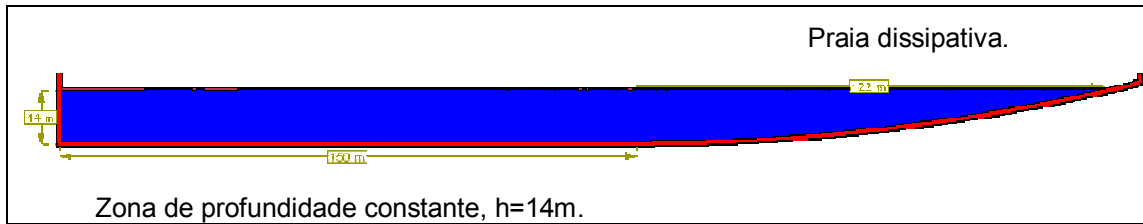


Figura 5 – Domínio de cálculo.

Na Figura 6 representa-se a posição dos nós perto da superfície livre para as ondas geradas pelo gerador tipo *flap*, para 10s, 30s e 50s depois do início do movimento contínuo do gerador. Como se pode observar, as primeiras ondas geradas são muito dissipativas e só passados 50s de simulação é obtido um grupo de ondas de 1m de altura nos primeiros 120m do canal.

Na Figura 7 compara-se a geometria da superfície livre aos 50s de simulação, obtida usando os três geradores, com a geometria dada pela teoria linear de onda. Distribuições similares dos nós próximo à superfície e respectivos perfis das ondas foram obtidas para os três geradores na zona de profundidade constante (14m de profundidade). Embora seja possível identificar pequenas diferenças na geometria das 5 ondas obtidas após 50s de simulação, pode-se considerar que representam a geometria esperada pela teoria de onda linear. Observou-se que o comprimento de onda em média é 1.2m inferior ao esperado por teoria de onda linear (24.9m).

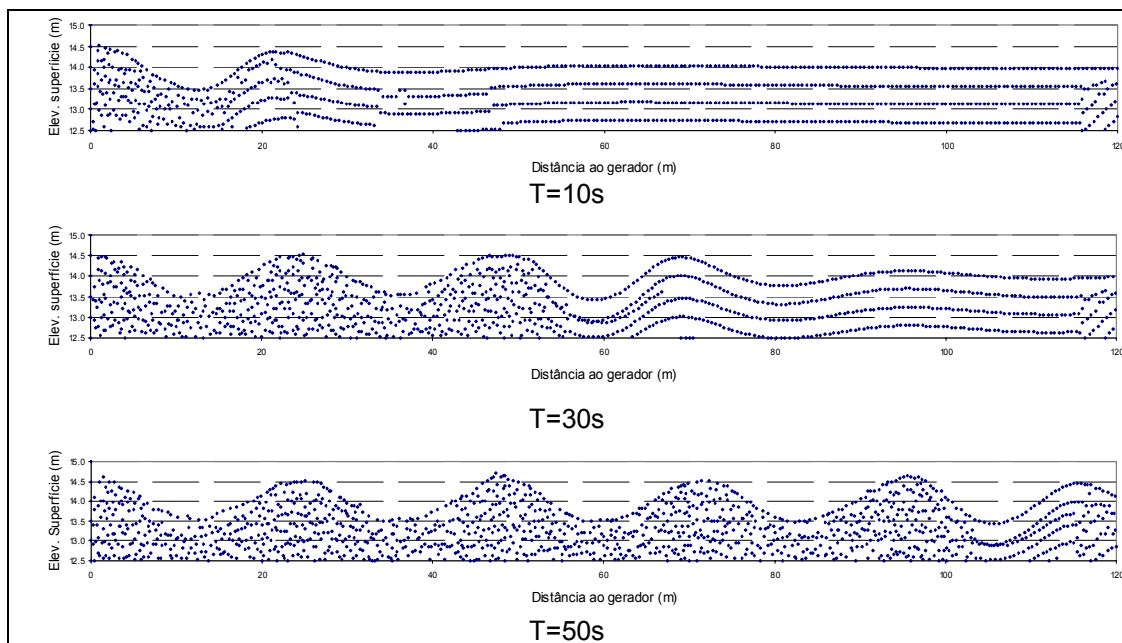


Figura 6 – Posição dos nós perto da superfície livre obtida com o gerador tipo *flap* para $t=10\text{s}$, $t=30\text{s}$ e $t=50\text{s}$.

O desfase das cavas das ondas entre os geradores pistão/cunha e *flap* observado na Figura 7 está relacionado com o início do movimento do gerador. No primeiro caso iniciou-se o movimento em direcção ao interior do canal (formação da crista) enquanto no segundo em direcção ao exterior do canal (formação da cava).

A irregularidade da geometria da onda próximo do gerador tipo cunha deve-se ao plano inclinado (de 25m de comprimento) sobre o qual se desloca o gerador. Fora desta zona a onda apresenta uma geometria correcta.

Na Figura 8a) comparam-se as velocidades horizontais e verticais obtidas a 7m de profundidade nos primeiros 120m do canal com o máximo e o mínimo da velocidade esperada usando a teoria linear de onda a esta profundidade. Uma comparação semelhante é feita na

