



CAIXOTÕES PERFURADOS: MÚLTIPLAS APLICAÇÕES EM ENGENHARIA COSTEIRA

F. Neumann^{1) 2)}, A. Brito-Melo^{1) 2)}, O. Basmat¹⁾, A. Sarmento¹⁾ e C. Pita²⁾

¹⁾ MARETEC, Instituto Superior Técnico
A. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal

²⁾ WW - Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas
A. Ventura terra, 11 r/c, 1600-780 Lisboa

SUMÁRIO

Os quebra-mares em caixotões perfurados são estruturas pouco reflectoras, permitindo uma grande dissipação de energia da onda incidente, aspecto importante em protecções costeiras e nas condições de acessibilidade dos navios no interior de portos. A sua construção não é uma prática corrente na Europa pela sua maior complexidade estrutural ou pouca informação sobre métodos de projecto. No entanto tem se revelado nesta década um interesse crescente por este tipo de estruturas, como demonstra o projecto comunitário EU-MAST III – PROVERBS. Em Portugal está actualmente em decurso o projecto de investigação “*Perforated Breakwaters – From Wave Structure Interaction Process Characterisation to the Development of Design Tools*”, financiado pela FCT. No âmbito deste projecto em que o tema central é a análise da hidrodinâmica associada aos fenómenos de dissipação de energia e o desenvolvimento de métodos de projecto, pretende-se iniciar o estudo sobre a utilização destes caixotões em costas oceânicas abertas, como a costa portuguesa, aspecto que até aqui tem sido pouco focado. No presente artigo é apresentada a abordagem seguida no referido projecto e colocada a ideia da múltipla aplicação dos caixotões perfurados: não só como quebra-mares exteriores e como estruturas de dissipação de agitação de ondas no interior de portos, mas ainda como potenciando a incorporação de sistemas de aproveitamento da energia das ondas em quebra-mares.

1. INTRODUÇÃO

No contexto da engenharia marítima antevêm-se duas aplicações possíveis para os caixotões perfurados: como quebra-mares exteriores e como estruturas de dissipação de agitação de ondas no interior de portos, quer resultantes de ondas que entram no porto ou de suas reflexões, quer resultantes de ondas geradas no interior do porto por acção do vento ou de navios em movimento.

Quando comparados com os quebra-mares de talude tradicionais, os quebra-mares verticais, que no caso de não serem perfurados têm a desvantagem de serem muito reflectores e fortemente galgáveis, permitem uma economia substancial de material com importantes consequências económicas e ambientais. Contrariamente aos caixotões impermeáveis, os caixotões perfurados são muito pouco reflectores e estão sujeitos a momentos de derrube muito menores, podendo ser instalados em águas mais profundas e costas mais energéticas, minimizando as dificuldades referidas devidas à reflexão e aos galgamentos.

Quando aplicados como estruturas de protecção exterior, os caixotões perfurados têm que ser suficientemente robustos para suportar os impactos das ondas e suficientemente eficientes para terem índices de reflexão e de galgamento baixos, de modo a não prejudicar a navegação no exterior do porto e a reduzir a agitação no seu interior. Quando aplicados no interior dos portos, apenas têm que apresentar um baixo índice de reflexão, não havendo do ponto de vista estrutural requisitos especiais. Note-se, contudo, que no interior dos portos os requisitos hidrodinâmicos de baixo índice de reflexão podem ser complexos, visto poderem aparecer ondas numa ampla gama de comprimentos de onda (ondas exteriores, ondas geradas por

ventos dentro do porto, ondas geradas por embarcações). Por outro lado, no interior dos portos as ondas são em geral de pequena amplitude, enquanto que no exterior ocorrem frequentemente ondas de grande amplitude, sendo estas as mais relevantes do ponto de vista do projecto e dimensionamento.

Para além dos caixotões perfurados existe uma grande variedade de alternativas estruturais para reduzir a reflexão da onda, de entre as quais se referem as seguintes:

- a) Plataforma assente em pilares dispostos sobre um talude: tipo de construção utilizada em diversos portos, aplicada em especial em situações onde as construções em talude são particularmente económicas ou em zonas de fundos pouco consistentes que impõem limitações relativamente à utilização de caixotões de peso elevado. Uma solução alternativa deste tipo pode ser a conjugação de uma plataforma assente em pilares com uma estrutura em caixotões (Allsop, 1995).
- b) Barreira perfurada ("*Wave screen*"): parede perfurada que se estende do fundo até à superfície livre, dissipando parte da energia das ondas. O mesmo comportamento hidrodinâmico pode também ser obtido com múltiplas placas paralelas de betão, madeira ou aço. Desta forma os caixotões perfurados representam uma combinação deste tipo de estruturas com um caixotão clássico. As estruturas designadas vulgarmente na literatura inglesa por *wave screens* têm coeficientes de transmissão muito elevados, sendo mais utilizadas em marinas, em áreas abrigadas, e em zonas em que se torna necessário uma grande circulação de água. Por constituírem a estrutura base dos caixotões perfurados, foram objecto de investigação em diversos estudos (Allsop, 1995; Clauss et al., 1998; Gerloni et al., 1999).
- c) Placas semi-profundas sólidas ou perfuradas ("*Skirt breakwaters*"): placas dispostas na vertical, não atingindo o fundo. Com características semelhantes aos "*wave screens*" têm aplicação em zonas relativamente abrigadas (Allsop, 1995; Cox et al., 1998).
- d) Blocos de betão ocos ("*Voided blocks*"): blocos pré-fabricados sobrepostos na vertical formando uma parede. Devido à limitação das suas dimensões (usualmente inferiores a 5 m de comprimento) esta solução é mais indicada a uma escala mais pequena (com alturas significativas da ordem dos 2 a 3m). Entre os tipos de blocos mais comuns referem-se os "*Monobar*", "*Cross-hollow*", "*ARC*", "*ANG-Lock*", "*DIEAER*", "*Igloo*", "*Perforcell*", "*Pillock*", "*Tine*" and "*Warock*" (Brunn, 1989; Allsop, 1995 e Takahashi, 1996).
- e) Grelha preenchida com enrocamento de grandes dimensões ("*Cribwork*"): grelha disposta na vertical com enrocamento preenchendo o seu interior, permitindo o escoamento através dos espaços livres. Embora sendo uma prática frequente na Escandinávia e nos grandes lagos dos Estados Unidos (Brunn, 1989), é referido em Allsop (1995) o facto de serem necessárias rochas de grandes dimensões para aumentar de forma significativa o comportamento reflector quando comparado com paredes verticais, para ondas longas.

Todas estas alternativas podem ser soluções favoráveis em casos particulares mas devido à larga gama de aplicação dos caixotões perfurados são estes apenas objecto do presente trabalho.

1.1 Características gerais

Os caixotões perfurados utilizados na construção de quebra-mares são basicamente constituídos por uma parede vertical impermeável à frente da qual se colocam uma ou mais paredes verticais ou oblíquas perfuradas, possibilitando deste modo a entrada da ondulação incidente no interior de uma ou mais câmaras (designada na literatura inglesa por *wave chamber*) e a conseqüente dissipação de energia. A permeabilidade e a inclinação da(s) parede(s), o seu número e a distância entre elas, são escolhidas de modo a reduzir a reflexão da onda e a minimizar os esforços sobre a estrutura. Este dimensionamento é feito tendo em atenção a profundidade e as características da agitação marítima no local de construção do

quebra-mar. A figura 1 representa esquematicamente um exemplo típico de um caixotão perfurado.

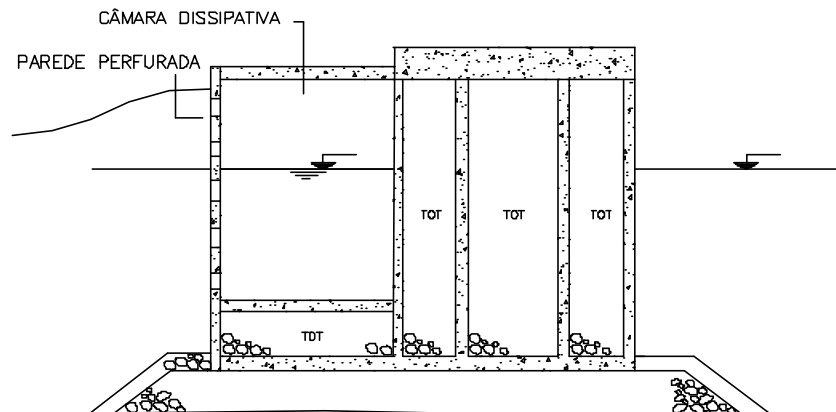


Fig. 1 Representação esquemática de uma secção transversal típica de um caixotão perfurado.

Nos quebra-mares de parede vertical impermeável as ondas incidentes de fraca amplitude são reflectidas para o largo sem dissipação, quase duplicando a altura de onda em frente à estrutura; em relação às ondas de maior amplitude ocorre a rebentação na estrutura originando um momento de impacto intenso e de curta duração a que a estrutura do caixotão terá de resistir inteiramente. Este tipo de estruturas constitui por vezes um problema na manobrabilidade dos navios em portos e marinas.

Os caixotões perfurados têm a vantagem de permitir a desfasagem da onda reflectida devido à descontinuidade da parede perfurada e uma dissipação parcial da energia da onda incidente, por turbulência, no interior da câmara dissipativa. Estes dois aspectos contribuem significativamente para a redução das forças instabilizantes máximas sobre a estrutura. Consequentemente os caixotões perfurados estão sujeitos a momentos de derrubamento muito inferiores aos dos quebra-mares de parede impermeável, podendo ser instalados em águas mais profundas e costas mais energéticas, minimizando as dificuldades devidas à reflexão e aos galgamentos. Além disso a sobreposição de ondas reflectidas em frente à estrutura é notavelmente amortecida resultando em condições calmas na proximidade da estrutura.

As vantagens do quebra-mar perfurado relativamente ao quebra-mar em talude estão associadas principalmente ao uso mais eficiente de espaço e à economia de material de construção com possíveis benefícios económicos e ecológicos.

A acção da onda incidente constitui de um modo geral um dos assuntos mais investigados em engenharia costeira e portuária sendo ainda um problema fundamental a estabilidade dos quebra-mares em caixotões perfurados devido à complexidade da sua geometria e dos processos hidráulicos, não existindo até à data um critério de projecto consolidado. Além da experiência fundamental desenvolvida no Japão, representa uma grande contribuição nesta área o trabalho experimental desenvolvido no âmbito do projecto comunitário MAST III - PROVERBS (**PRO**babilistic Design Tools for **VERT**ical Breakwater**S**), entre 1996 e 1999, dedicado aos caixotões perfurados, envolvendo 23 instituições de 8 países Europeus (Gerloni et al., 1999).

No projecto Português "*Perforated Breakwaters – From Wave Structure Interaction Process Characterisation to the Development of Design Tools*", envolvendo o IST, o INETI, o LNEC e a WW - Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, pretende-se compreender e quantificar a propagação e dissipação de ondas marítimas em caixotões perfurados, permitindo desenvolver recomendações de projecto dirigidas ao seu dimensionamento estrutural e hidráulico. Utilizando as metodologias desenvolvidas pretende-se pré-dimensionar uma estrutura deste tipo para local a seleccionar na costa portuguesa. Complementarmente será feita a análise

técnica e económica relativa à integração de sistemas de aproveitamento de energia das ondas neste tipo de estruturas.

1.2 Revisão Histórica

O conceito de quebra-mar perfurado para reduzir a reflexão das ondas e as forças na estrutura foi introduzido em 1961 por Jarlan tendo sido pela primeira vez construído uma estrutura deste tipo em Comeau Bay (Canadá), em 1966 (Figura 2), tornando-se um conceito com boa aceitação entre a comunidade de navegadores (NRC, 2001).

A partir de 1970, os Japoneses dedicaram grande atenção a este tipo de estruturas e a aplicação de caixotões perfurados tornou-se desde essa data uma prática corrente no Japão. Entre as estruturas construídas no Japão (Takahashi, 1996; Tanimoto e Takahashi, 1994) contam-se várias variantes do caixotão desenhado por Jarlan, sendo a primeira estrutura deste tipo construída em Takamatsu Port (1970), a uma profundidade de cerca de 9 m com caixotões de dimensões 9,9 m x 14,25 m.

O caixotão de parede vertical perfurada foi estabelecido como estrutura mais comum, como por exemplo em Yobuku Port, a uma profundidade de 15 m, com caixotões de dimensões de 10,5 m x 13,0 m. Mais tarde foi empregue uma modificação do caixotão perfurado com uma parede curva frente ao mar no porto de Funakawa, para enfrentar tempestades severas. Em Miyazaki, foi construído um quebra-mar em caixotões semi-circulares de eixo horizontal, para resistir a ondas elevadas em águas de pequena profundidade. Uma boa combinação para águas profundas foi projectada no porto de Kamaishi, em que um caixotão trapezoidal de paredes duplas com perfurações no plano horizontal é colocado sobre um talude abaixo da superfície livre, permitindo um abrigo a uma profundidade de 63 m. No porto de Shibayama foi utilizado um quebra-mar em caixotões cilíndricos, construído a uma profundidade de 25 m, com um cilindro exterior de parede perfurada e diâmetro de 32 m, e um cilindro interior de 16 m de diâmetro.

Na Europa o interesse por quebra-mares perfurados limitou-se principalmente a algumas actividades em Itália, designadamente em La Spezia, Nápoles (Brunn, 1989), em Porto Torres, Sardenha (Fig. 2) e em Palermo, Sicília. Em 1992 foi inaugurado o quebra-mar ocidental de Dieppe (Seine-Maritime), em França.

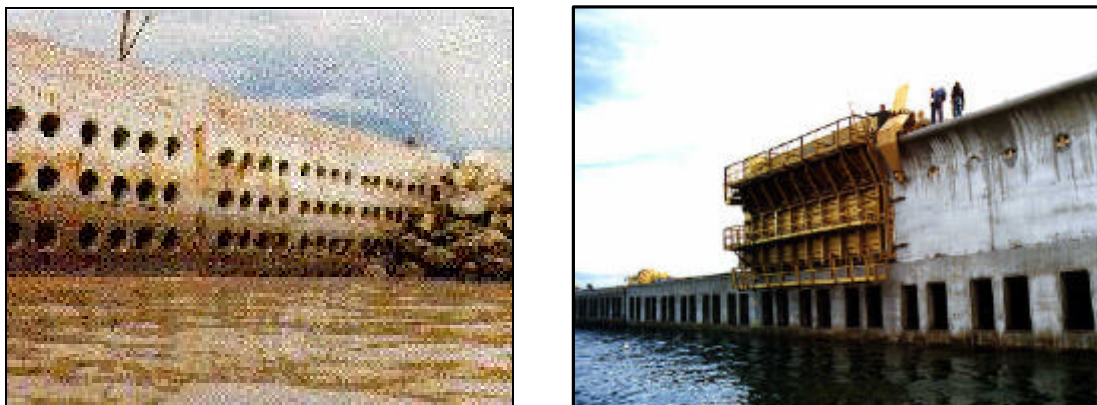


Fig. 2 Quebra-mar em caixotões perfurados. Comeau Bay, Canadá (esquerda) e Porto Torres, Sardenha (direita).

Recentemente, no âmbito de um projecto Japonês-Alemão, Clauss et al. (1998) e Muttray et al., (1998) descrevem os estudos desenvolvidos sobre um novo conceito designado por HMCB (High Mound Composite Breakwater), solução que se revelou adequada como protecção marítima na construção de um aeroporto no mar. Além deste conceito a investigação de quebra-mares com acessibilidade do público e a integração do conceito de aproveitamento da energia das ondas tem ambos sido objecto de investigação no Japão. Como exemplos refere-

se o quebra-mar pedonal em Wakayama e o quebra-mar CAO (Coluna de Água Oscilante) em Sakata (Takahashi, 1996).

O crescente interesse na Europa por este tipo de estruturas é demonstrado nas actividades realizadas no âmbito do projecto comunitário “MAST III – PROVERBS” e actualmente no projecto “*Perforated Breakwaters – From Wave Structure Interaction Process Characterisation to the Development of Design Tools*”, apresentado na secção 3 deste artigo.

1.3 Múltiplas aplicações

Há uma diversidade de aplicações em que as características benéficas dos caixotões perfurados podem ser utilizadas. Por um lado, um quebra-mar vertical possibilita em geral a acostagem, por outro lado a câmara dissipativa exposta ao mar e o amortecimento da onda na estrutura reduzem os efeitos de galgamento e espraiamento da onda. Deste modo o lado interior do quebra-mar pode ser utilizado na acostagem, mesmo em estados de mar de grande agitação, onde as estruturas verticais clássicas não poderiam ser utilizadas. Além disso os quebra-mares em caixotões perfurados são geralmente mais largos que os impermeáveis, permitindo uma maior utilização da sua superfície. Estas condições permitem projectar quebra-mares acessíveis ao público contrariamente às estruturas verticais não acessíveis por razões de segurança, o que constitui uma maior aceitação e um acréscimo do valor das estruturas portuárias, tal como referido em Takahashi (1996), indicando como uma das razões a incluir no projecto de futuros quebra-mares.

Um aspecto importante no desenvolvimento de infraestruturas portuárias prende-se com facto de a entrada dos portos e canais ser tipicamente o mais estreita possível de modo a reduzir a propagação de ondas no interior da bacia portuária. Allsop (1995) descreve a dificuldade associada principalmente à entrada de navios de grande porte em que a sobreposição das ondas na zona de entrada do porto dificulta a navegação. A redução da reflexão das ondas em quebra-mares exteriores diminui além disso a propagação das ondas em áreas costeiras protegidas na proximidade do porto onde a reflexão das ondas pela estrutura pode ser responsável por erosões (Allsop, 1995).

Além da aplicação em quebra-mares exteriores os caixotões perfurados podem melhorar a manobrabilidade no interior de portos quando utilizados em estruturas marítimas interiores. Esta possibilidade foi considerada num caso de estudo (Neumann, 2000) no novo porto industrial do Caniçal, na Madeira, tendo-se concluído que a operacionalidade do porto seria melhorada com a utilização de protecções dissipativas em determinadas zonas interiores do porto. O efeito da sobreposição de ondas curtas resultantes do tráfego de navios dentro do porto e das ondas que se propagam na direcção do porto foram referidas em Allsop e Mc Bride (1994) como possíveis razões para alguns acidentes no interior de portos, principalmente com pequenas embarcações. Os autores sublinham que a aplicação de protecções marítimas com baixo índice de reflexão constitui uma medida potencial para melhorar significativamente as condições de manobrabilidade no interior de portos.

Aproveitamento estrutural

Uma vantagem particular dos caixotões perfurados é a possibilidade que estas estruturas apresentam de integração de centrais de energia das ondas onde essa energia é convertida em energia eléctrica em vez de ser simplesmente dissipada. A integração técnica e económica da utilização de energia das ondas em quebra-mares foi recentemente estudada em Neumann (1999) e Brito-Melo e Sarmiento (2000). Em Neumann et al. (2001) conclui-se que os caixotões perfurados são particularmente indicados para integrar sistemas de aproveitamento da energia das ondas devido às suas dimensões estruturais além de diversas considerações hidrodinâmicas e económicas.

Os fenómenos associados à dissipação da energia das ondas em estruturas de protecção costeira tem sido objecto de intensa investigação. Simultaneamente, a possibilidade de aproveitar essa energia, desde a década de 70 que é encarada pela comunidade científica.

A ideia de utilizar uma estrutura, construída com o propósito de dissipar energia das ondas, como suporte de um sistema de aproveitamento e conversão da energia das ondas em energia

eléctrica foi concretizada num quebra-mar em talude na Índia, no Porto de Vizhinjam (Raju e Neelamani, 1992) e num quebra-mar de parede vertical impermeável no Porto de Sakata, Japão (Goda et al. 1989; Moto et al. 1991; Takahashi, 1988). Em ambas as aplicações foi utilizado o sistema de conversão de energia das ondas designado por sistema CAO (Coluna de Água Oscilante) constituído por uma câmara pneumática com uma abertura na parede frontal exposta às ondas, permitindo a entrada da ondulação incidente e a oscilação de pressão do ar sobre a superfície livre da água dando origem a uma passagem do ar através de uma turbina de ar instalada na parte superior da câmara. O conceito de múltipla aplicação dos quebra-mares, nomeadamente como sistema de extracção de energia foi recentemente ilustrado na Expo1998, em Lisboa (veja-se figura 3).

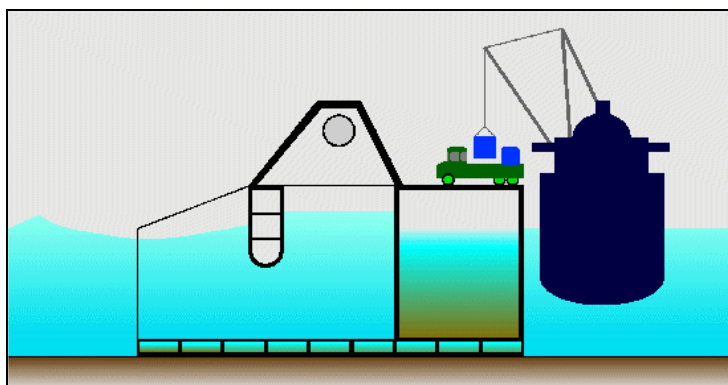


Fig. 3 Múltiplas aplicações de um quebra-mar em caixotões (Graw, 2001).

A integração de um sistema de produção de energia eléctrica a partir da energia das ondas numa infraestrutura portuária é uma ideia que surge como consequência lógica de várias considerações sócio-económicas e ambientais ligadas simultaneamente à construção de quebra-mares e de centrais costeiras de aproveitamento da energia das ondas. Por um lado a intervenção massiva na costa pela construção de grandes obras de protecção costeira adquire uma melhor aceitação ecológica através da produção de energias não poluentes e da redução das reflexões indesejáveis na orla costeira; por outro lado a energia das ondas pode ser encarada a um nível economicamente competitivo. A repartição de custos entre um sistema de conversão de energia e uma estrutura portuária é um aspecto económico importante que não tem sido preponderante nos projectos de demonstração realizados. Actualmente no domínio da energia das ondas pretende-se alcançar um nível pré-competitivo, pelo que parece interessante a possibilidade de uma dupla utilização dos quebra-mares perfurados devido à grande semelhança estrutural e hidráulica entre um sistema do tipo CAO e um caixotão perfurado. Este estudo será abordado no projecto português de investigação "Perforated Breakwaters – From Wave Structure Interaction Process Characterisation to the Development of Design Tools".

2. ESTADO DA ARTE

Têm sido desenvolvidos grandes esforços pelos Japoneses no domínio do projecto e construção de muitos quebra-mares perfurados, daí que estes possam ser considerados como estruturas *standard* no Japão. Na Europa, a aceitação deste conceito limitou-se principalmente à Itália (ver secção 1.2 – Revisão Histórica) e só recentemente foram realizadas várias actividades de investigação e desenvolvimento, R&D, no âmbito da construção de protótipos. O quebra-mar de Porto Torres, em Sardenha, e o quebra-mar de Dieppe, em França, ambos representam exemplos do interesse crescente na Europa pela aplicação de quebra-mares de pouca reflexão. A construção de quebra-mares em caixotões perfurados retorna, no entanto, à década de 60 e durante vários anos as considerações de projecto mantiveram-se assentes principalmente em conclusões empíricas e semi-empíricas. Só nos anos recentes, principalmente no âmbito do projecto europeu "MAST III – PROVERBS", foram desenvolvidos

esforços mais intensos com o objectivo de desenvolver aproximações práticas relativamente ao projecto de caixotões perfurados.

2.1 Modelação matemática

O primeiro estudo de que se tem conhecimento relativamente ao estudo do comportamento hidrodinâmico da interacção de ondas com uma estrutura perfurada constituída por uma câmara dissipativa, foi apresentado por Richey e Sollit (1970). Sawaragi e Iwata (1973, 1979) interpretaram o sistema de ondas gerado na barreira como uma sobreposição de um número infinito de ondas progressivas, ajustando as suas fórmulas com base em resultados experimentais. Kondo (1979) apresentou uma aproximação simplificada, considerando apenas ondas progressivas incidentes e reflectidas em mar aberto e no interior das câmaras.

Fugazza and Natale (1992) desenvolveram uma formulação teórica para o projecto hidráulico de caixotões perfurados com multi-câmaras, com base nos resultados experimentais de Kondo (1979) relativos à dissipação na parede. Este modelo foi frequentemente utilizado como estudo de base em futuros desenvolvimentos e mais tarde comparado com ensaios experimentais (Bélorgey et al. 1999).

Na ultima década têm sido largamente utilizados modelos semi-analíticos baseados na teoria linear das ondas e no método de expansão de funções próprias para estudar a propagação de ondas através de paredes verticais rígidas porosas ou flexíveis (por exemplo, Losada et al. 1997, Isaacson et al. 1998, Yu 1995, Wang e Ren 1993, Yu e Chwang 1994). Sulisz (1985) apresenta uma generalização da teoria de Sollit e Cross (1972), aplicando o método de elementos de fronteira para estudar a propagação das ondas através de um quebra-mar em talude composto por várias camadas e com uma geometria arbitrária. Sendo baseado em escoamento potencial, estas aproximações não têm em conta a modelação dos processos de rebentação da onda.

Recentemente em Liu et al. (1999) o modelo das equações de Navier-Stokes para escoamento turbulento (RANS) com uma formulação $k-\epsilon$ turbulento foram resolvidas por meio do método de elementos de volume (VOF) para descrever a superfície livre da água e estudar a interacção de ondas de rebentação com um quebra-mar de caixotões impermeáveis protegidos por uma camada de blocos pré-fabricados.

Além das aproximações referidas existem diversos trabalhos, a maior parte com o objectivo de avaliar o desempenho dos fenómenos de reflexão e transmissão de determinadas estruturas com base na teoria linearizada. Entre estes, referem-se por exemplo os trabalhos de Kriebel et al. (1998), com uma placa vertical de pequena espessura ("wave barrier"), de Isaacson et al. (1998) com uma estrutura semelhante perfurada e de Cox et al. (1998) com uma parede dupla parcialmente permeável ("skirt breakwater"). Wang e Ren (1993) estudaram a interacção de ondas com quebra-mares flexíveis e porosos, Mc Iver (1999) analisa o efeito da porosidade e do ângulo de incidência da onda num quebra-mar semi-infinito de pequena espessura. Darwiche et al. (1994) estudaram um quebra-mar cilíndrico semiporoso em que o modelo consistia num cilindro vertical assente no fundo, permeável na proximidade da superfície e impermeável na proximidade do fundo, em torno de um cilindro vertical rígido. Williams e Li (1998) adoptaram esta aproximação a um caso semelhante. Em Losada et al. (1993, 1997) é investigada a interacção da onda com quebra-mares permeáveis, com uma superestrutura impermeável. Em Neves et al. (2000) é estudada a propagação de ondas em quebra-mares impermeáveis semi-infinitos. Yip e Chwang (1999, 2000) propuseram a combinação de um quebra-mar perfurado com uma placa horizontal no interior da câmara dissipativa para amortecer a onda e apresentaram uma formulação 2D linear analítica para modelar esta estrutura. Em Isaacson et al. (2000) é analisado analiticamente e numericamente um sistema composto por uma parede perfurada, uma câmara dissipativa preenchida com enrocamento e uma parede traseira impermeável. O modelo é baseado no método de expansão de funções próprias e tem em conta a dissipação de energia na parede fronteira através de uma condição fronteira imposta. Os autores validaram o modelo com estudos numéricos existentes relativos a uma parede permeável e quebra-mar perfurado. Os seus resultados numéricos relevantes referem-se ao coeficiente de reflexão, espraiamento da onda e força da onda, além de diversas

considerações sobre o efeito da porosidade, geometria do quebra-mar e comprimento de onda relativo.

A interacção de ondas lineares com uma ou mais câmaras foi estudada por Williams et al. (2000), tendo determinado coeficientes de amortecimento para câmaras isoladas ou duplas, utilizando trabalho experimental de outros autores e uma aproximação simplificada com uma solução obtida pela técnica de expansão de funções próprias.

A reflexão, transmissão e difracção de ondas solitárias por quebra-mares porosos foi objecto de estudo de Lynett et al. (2000) que desenvolveu um modelo numérico para a interacção de ondas longas com estruturas constituídas por paredes verticais, com base em equações de movimento integradas na profundidade. Os autores apresentam uma excelente concordância entre os resultados do modelo e testes experimentais.

Zhu e Chwang (2001) apresentaram recentemente um modelo analítico baseado na teoria linear do potencial de velocidades com o objectivo de avaliar o comportamento reflector de uma estrutura porosa com capacidade de absorção de ondas, numa fundação sólida, com parede inclinada. Este modelo tem em conta a variação do comprimento e inclinação da parede permeável da câmara de dissipação da onda e variação da altura de fundação. São apresentados resultados numéricos obtidos pelo método de diferenças finitas e comparados com resultados experimentais disponíveis na literatura, para águas de profundidade moderada.

2.2 Ensaio em modelo e protótipo

Devido à complexidade hidrodinâmica e à falta de aproximações de projecto suficientemente sólidas a utilização de ensaios experimentais em modelo físico tem sido a ferramenta de trabalho fundamental para a prática de projecto de quebra-mares perfurados.

Além dos numerosos testes experimentais em pequena e grande escala, assim como medições em protótipo que acompanharam de forma intensiva o desenvolvimento dos quebra-mares perfurados no Japão (por exemplo Tanimoto, 1995; Takahashi, 1996), a maior parte dos modelos analíticos e dos resultados numéricos referidos na secção anterior foram verificados com base em testes realizados em modelos específicos ou com base em resultados de outros autores.

Na Europa, principalmente em Itália, têm sido testadas diversas alternativas acompanhadas com o desenvolvimento de protótipos (Franco, 1994). Têm sido também analisados dados experimentais em termos do desempenho de reflexão e esforços devidos à onda, com um sistema constituído por placas perfuradas ou uma ou múltiplas câmaras, instalado no grande canal de ondas na Universidade de Hannover (Clauss et al., 1998). No âmbito deste trabalho foi proposto um novo parâmetro de reflexão para descrever o desempenho hidráulico de "wave screens": $RP = (H/d)^{0,65} / n^{0,95}$, sendo H_i a altura de onda incidente, d a profundidade da água e n a porosidade). Este resultado surgiu depois da verificação de que a altura de onda e sua declividade constituem um importante papel no desempenho da reflexão em placas, sendo no entanto secundários em sistemas de câmaras como caixotões perfurados. Neste caso os parâmetros principais que influenciam o desempenho hidráulico são o comprimento de onda e período e a porosidade da(s) parede(s).

No âmbito do PROVERBS, o modelo apresentado por Fugazza e Natale (1992) foi comparado com dados experimentais incluindo testes no GWK ("Grosser WellenKanal"- grande canal de ondas) que se refere abaixo. Nestes testes os termos dissipativo e de inércia do modelo de Fugazza e Natale foram calibrados concluindo-se que o modelo apresentava capacidades promissoras, com a limitação de os testes serem realizados com ondas regulares, pouco representativo das condições reais, tendo sido recomendados testes de validação (Gerloni et al. 1999). As actividades experimentais realizadas no âmbito do PROVERBS incluíram também testes em protótipo, nomeadamente em Dieppe (Canal da Mancha, França) e em Porto Torres (Sardenha, Itália) e ensaios experimentais com modelos físicos destes quebra-mares perfurados, respectivamente à escala 1:25 e 1:20, de modo a desenvolver aproximações para a onda de projecto e desempenho da reflexão. No porto industrial de Porto Torres, localizado ao Norte de Sardenha, foi construído, em 1992, um quebra-mar em caixotões perfurados, com um comprimento de 550 m, em águas de 20 m de profundidade, assente numa base de

enrocamento com uma altura de cerca de 5 m. Os caixotões eram constituídos por 3 câmaras, com um volume decrescente do exterior para o interior, conforme ilustrado na Figura 4, e com orifícios rectangulares. Durante dois anos, dois dos caixotões (um perfurado e um com uma parede sólida) foram monitorizados. A análise das medições permitiu concluir que a distribuição de pressões ao longo da parede frontal não respeita a convencional distribuição triangular. Foram também realizadas medições no protótipo do caixotão duplo de Jarlan de Dieppe (Seine-Maritime). O quebra-mar com um comprimento de 225 m era constituído por caixotões de 25m de comprimento e 17m de altura, com câmaras dissipativas no interior da bacia portuária e no exterior como representado na Figura 4. A profundidade da água variava entre os 6 e 17 m devido à amplitude de maré de 10,80 m. Os parâmetros da onda de projecto foram designadamente $T_p=12s$ e $H_s=8,2m$. Os resultados obtidos permitiram definir recomendações de projecto.

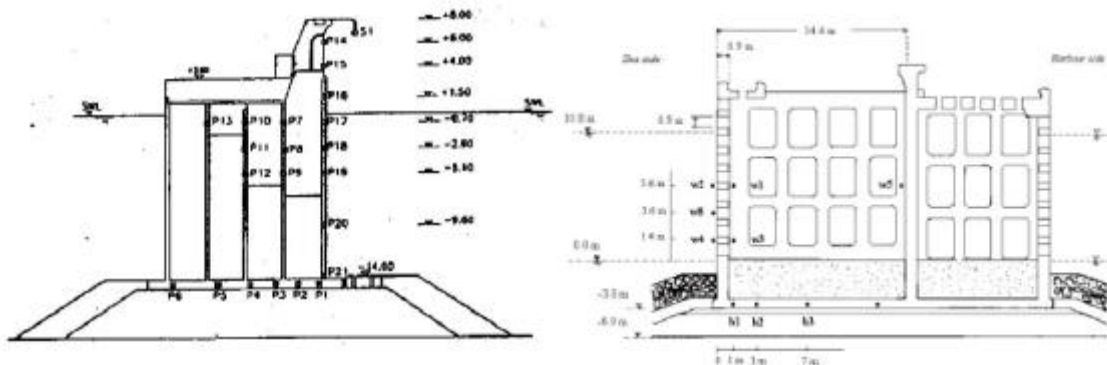


Fig. 4 Secção transversal do protótipo dos caixotões testados em PROVERBS. Caixotão com 3-câmaras em Porto Torres (esquerda) e caixotão duplo de Jarlan em Dieppe (direita).

Bélorgey et al. (1999) e Gerloni et al. (1999), no âmbito do PROVERBS, descrevem aproximações independentes, mas comparáveis relativamente a ondas de rebentação com reduzido impacto. Os ensaios em modelo foram realizados em profundidade uniforme, com o caixotão directamente assente no fundo. As medições em protótipo e em modelo físico foram utilizadas para rever os métodos de projecto de Takahashi e Canel (veja-se secção 2.3) aplicado a caixotões perfurados, tendo se concluído que o método de cálculo não tinha em conta a diferença de fase entre as forças que actuam nos diversos elementos do caixotão, tornando-se necessário um aperfeiçoamento de modo a otimizar o projecto de estruturas com reduzida reflexão. Foram propostas várias aproximações para determinação da distribuição de pressões neste tipo de estruturas.

Num projecto comum entre Japoneses e Alemães, o desempenho do conceito inovador HCMB (High Mound Composite Breakwater) foi testado em GWK/Hannover (Oumeraci e Muttray, 1997 e Muttray et al. 1998). O objectivo foi testar as capacidades destes quebra-mares pouco reflectores como estrutura de protecção para um aeroporto construído no mar. Este conceito é uma combinação de uma fundação em talude que quase atinge a superfície livre e uma câmara de dissipação como parte da superestrutura vertical. Os testes bidimensionais permitiram obter resultados relativamente aos esforços devidos à onda, ao desempenho da reflexão e às características de galgamento e pulverização da onda. Os resultados mostraram-se favoráveis para a aplicação deste conceito em águas de profundidade moderada.

2.3 Métodos de dimensionamento propostos

Embora os caixotões perfurados tenham sido inventados por Jarlan em 1961, durante muito tempo as observações qualitativas e considerações empíricas dominaram a prática da engenharia deste tipo de estruturas (Fugazza e Natale, 1992). Em Goda (1985) podem ser consultadas diversas recomendações de projecto. Contudo estas não são suficientes para

projectar uma estrutura em termos do seu desempenho hidrodinâmico. De acordo com a experiência adquirida pelos Japoneses com este tipo de estruturas é em Takahashi (1996) apresentado um procedimento de projecto a partir da extensão do método de Goda, tendo em conta os esforços de rebentação da onda em quebra-mares perfurados. Devido à complexidade dos processos hidrodinâmicos envolvidos, a estimativa das forças é feita tendo em conta determinadas fases da onda que causam situações de carga diferentes e que possivelmente têm uma maior contribuição para a estabilidade do caixotão. Uma descrição mais detalhada da prática de projecto dos Japoneses pode ser encontrada em Takayama (1995).

A relação entre o desempenho hidrodinâmico e a porosidade, assim como a largura da câmara, foram extensivamente estudados (Takahashi, 1996 e Takayama, 1995). Têm sido apresentadas recomendações de projecto para optimização do desempenho hidráulico e para estimar os esforços em caixotões perfurados. Em geral o melhor desempenho de reflexão é obtido para uma porosidade da parede frontal, $n \approx 0.2$, e um comprimento relativo da câmara dissipativa, $B/L_d \approx 0.2$, (Takayama, 1995). Um aspecto recomendado pelos Japoneses é que seja incluído no projecto a profundidade de imersão da câmara (h), ou seja a distância entre a superfície livre da água e o fundo da câmara dissipativa, que nem sempre atinge necessariamente a profundidade da água. Esta pode ser por exemplo relevante para estruturas em mar aberto em que por razões de estabilidade a câmara de ar pode não atingir o fundo.

Fugazza/Natale (1992) desenvolveram uma formulação relativa ao projecto hidráulico e verificaram-na com dados laboratoriais existentes. Este método de projecto foi mais tarde comparado com medições realizadas no âmbito do projecto PROVERBS. Gerloni et al. (1999) descrevem estes ensaios em modelo, no grande canal de ondas na Universidade de Hannover, (Bélorgey et al. 1999). Num sistema de câmaras os parâmetros de projecto mais importantes são a largura relativa da câmara (relação entre a largura da câmara B e o comprimento de onda L) B/L e a porosidade da parede frontal n . Fugazza/Natale (1992), propuseram uma aproximação simplificada de projecto em que a porosidade necessária da parede frontal é calculada com base na declividade da onda H/L , no comprimento de onda e no comprimento da câmara. Na Figura 5 é apresentado o desempenho hidráulico de um sistema composto por uma câmara (OCS – “one chamber system”) e múltiplas câmaras (MCS – “multi chamber systems”), retirado dos testes efectuados em GWK/ Hannover:

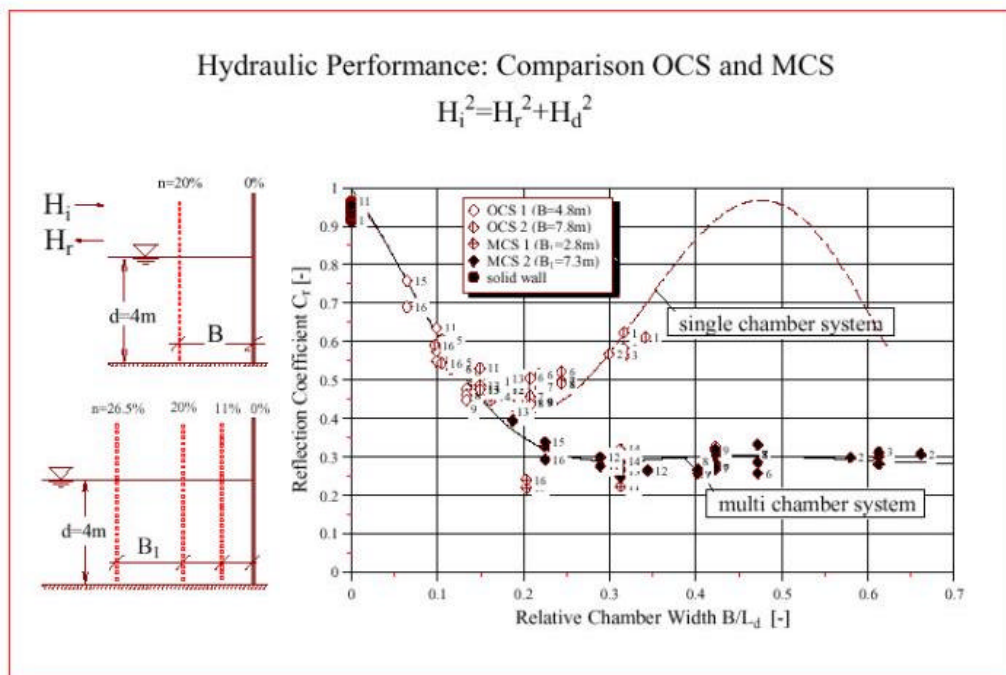


Fig. 5 Desempenho da reflexão com um ou múltiplos sistemas de câmaras (Gerloni et al, 1999); H_i = altura da onda incidente, H_r = altura da onda reflectida, H_d = altura da onda dissipada.

Relativamente à acção da onda, Tabet-Aoul et al. (1999) apresentam a comparação entre ensaios em modelo e o método de Takahashi concluindo que deve ser feito trabalho adicional para estabelecer um método de projecto prático. Em Canel (1995) é apresentada uma modificação da fórmula original de Goda (Goda, 1985) com o objectivo de introduzir a porosidade no projecto de estabilidade. Esta aproximação propõe a redução da altura de onda de projecto utilizada no método de Goda correspondente a um coeficiente de reflexão $H_i = (1 + Cr)H_d/2$ em que H_i representa a altura de onda a ser utilizada na fórmula de Goda, Cr o coeficiente de reflexão da estrutura relativamente à onda de projecto e H_d a onda de projecto original obtida pelo método de Goda.

Com base nos ensaios em modelo de Porto Torres foi proposta uma aproximação empírica por Bélorgey et al. (1999), resultando uma redução da força total, para um sistema com uma câmara, de 20% a 40% e para um sistema com múltiplas câmaras, até 50%. Esta abordagem considera a geometria da câmara e as condições de onda e dá simultaneamente toda a carga

aplicada através de um parâmetro FF_{tot} , tal que $FF_{tot} = \frac{(d/B)^{2/3}}{(H_i/L_d)}$, em que d é a profundidade

da água, B a largura da câmara, H_i a altura de onda incidente e L_d o comprimento de onda de projecto. Para ondas sem rebentação a força resultante total, F_{tot} , pode ser calculada do

seguinte modo: $F_{tot} = 12 \cdot \tanh^{1.1}(0.009 \cdot FF_{tot}) \cdot g \cdot r \cdot H_i^2$ [kN/m] (r =densidade da água do mar, g = constante gravitacional=9,81 m/s²). Os ensaios foram realizados com ondas regulares e portanto os autores referem ser necessário posteriores testes de validação (Gerloni et al., 1999). Esta aproximação, tal como as anteriores, não tem em conta a situação de impactos severos das ondas.

3. O PROJECTO PORTUGUÊS DE QUEBRA-MARES PERFURADOS

3.1 Motivação

A principal motivação do projecto está associada ao facto de não existirem casos de aplicação na costa Atlântica portuguesa (costa oceânica) e pouca informação relativamente ao comportamento destas estruturas em mar aberto. Por outro lado pretende-se propor a utilização destas estruturas como suporte de um sistema de aproveitamento e conversão da energia das ondas, seguindo a experiência desenvolvida no Instituto Superior Técnico e no Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, no domínio da energia das ondas do mar. Os principais objectivos que se pretendem alcançar com este projecto, podem ser sistematizados da seguinte forma:

1. Quantificação e compreensão dos fenómenos de propagação e dissipação da agitação marítima em paredes permeáveis;
2. Desenvolvimento de métodos de cálculo dirigidos ao dimensionamento estrutural e hidráulico de caixotões perfurados para aplicação em quebra-mares e em estruturas interiores em portos.
3. Estudo da integração de centrais de Coluna de Água Oscilante para aproveitamento de energia das ondas num quebra-mar em caixotões perfurados.
4. Desenvolvimento de métodos de projecto de integração de um sistema de conversão de energia das ondas num quebra-mar em caixotões perfurados.

3.2 Metodologias de modelação

Modelação analítica linear

Como primeiro passo para uma melhor compreensão do comportamento hidrodinâmico da interacção onda-estrutura, será desenvolvido um modelo analítico com base na teoria linear para investigar as características da reflexão da onda em estruturas porosas, com uma secção transversal rectangular ou trapezoidal.

Para uma secção rectangular é utilizada a solução da expansão de funções próprias assumindo a teoria linear para analisar a propagação de ondas através de uma estrutura porosa de acordo com Losada (1997). Com base na teoria apresentada em Sollitt et al. (1972) para meios porosos, a análise centrar-se-á principalmente na hidrodinâmica induzida pela acção da onda no interior e exterior de uma estrutura porosa. Em particular, o caso de uma parede impermeável a uma determinada distância de uma parede permeável será analisado, avaliando o efeito da distância entre os dois painéis e do efeito da permeabilidade da parede dianteira.

A análise matemática linear de caixotões perfurados com parede frontal vertical aplica-se apenas à utilização dos caixotões no interior de portos, por nesta área se encontrarem geralmente ondas de pequena amplitude, o que constitui um pré-requisito para a aplicação da teoria linear.

Modelação matemática não linear

A análise matemática não-linear de caixotões perfurados com parede frontal vertical é aplicada à utilização de caixotões no exterior de portos, pois nesta situação a presença de ondas de grandes amplitudes limitam a aplicação da teoria linear.

A importância dos efeitos não lineares é mais significativa na modelação das forças do que nas características de reflexão. Como a tarefa principal na investigação dos caixotões perfurados em quebra-mares exteriores são os aspectos de sobrevivência com a estrutura sujeita à actuação de cargas severas, a formulação analítica não linear deve permitir estabelecer pontos de referência nesta situação. Os casos de estudo serão idênticos aos da tarefa de modelação linear, permitindo comparar resultados entre as duas formulações analíticas (linear e não linear). Como tarefa complementar prevê-se o estudo da inclusão de uma central do tipo CAO.

O problema não linear que se pretende estudar baseia-se nos estudos preliminares apresentados em Basmat (2001), (secção 3.3 – Desenvolvimentos Recentes) e envolve simultaneamente um problema de fronteira e um problema de valor inicial. O problema de fronteira consiste em resolver a equação de Laplace para fluido incompressível e as seguintes condições nas fronteiras do domínio: i) condição fronteira não linear na superfície livre descrita pela condição fronteira cinemática e pela equação de Bernoulli; ii) condição fronteira linear na fronteira permeável do caixotão que deve satisfazer a lei de Darcy e as condições fronteiras impostas do lado interior e exterior da parede (utilizando métodos de desvios mínimos).

Com base na extensão do modelo numérico CANAL desenvolvido na École Centrale de Nantes, França (Kim et al, 1999), será feita uma análise matemática não-linear de caixotões perfurados com parede frontal vertical e não-vertical para aplicação no exterior de portos. Será incluído no modelo o fenómeno de dissipação de energia na parede permeável. Pretende-se aplicar o modelo aos casos de estudo previamente analisados com base na modelação analítica linear e não-linear, considerando além destes a situação de uma parede permeável inclinada ou curva. O modelo numérico não linear 2D no domínio do tempo para estudar a interacção ondas/estrutura designado por CANAL foi desenvolvido com base no método dos elementos de fronteira baseado em escoamento potencial não-linear. Em colaboração com esta universidade pretende-se aplicar o CANAL ao estudo dos efeitos não-lineares no interior da câmara do caixotão, de forma semelhante ao estudo desenvolvido no interior de uma câmara pneumática de um sistema de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante. Numa fase seguinte pretende-se utilizar este modelo numérico para modelar o escoamento no domínio exterior. O escoamento através do meio poroso deverá ser modelado utilizando numa primeira fase a aproximação linear de Sollitt e Lorentz. Na interface entre os domínios exterior e interior ao caixotão será imposta a condição de continuidade do escoamento e das pressões.

Modelação experimental

Os principais objectivos desta tarefa são, em termos gerais, verificar, por um lado, os resultados obtidos por modelação matemática e por outro lado estudar a interacção onda-estrutura com ondas incidentes de amplitudes variáveis, desde ondas de pequena amplitude até ondas em fase de rebentação. Como consequência a análise experimental realizada em canal de ondas com caixotões perfurados com parede frontal vertical ou inclinada incluirá ondas de pequena amplitude, média ou elevada (incluindo rebentação) para aplicação no interior e no exterior de portos.

Os ensaios serão realizados em canal de ondas à escala 1:40 com ondas regulares e irregulares. Serão medidas elevações da superfície livre da água em diversos pontos do canal e pressões instantâneas em diversos pontos da parede frontal permeável e da parede traseira impermeável. Os ensaios deverão ajudar a esclarecer o comportamento hidráulico deste tipo de estruturas, nomeadamente a influência do afastamento das paredes, inclinação e permeabilidade da parede frontal, permeabilidade do volume entre paredes (que pode ou não ser preenchido com enrocamento) e amplitude e frequência da onda incidente sobre o coeficiente de reflexão e as forças e momentos induzidos pela onda.

Aspectos de Engenharia

Tratando-se de um projecto que envolve a colaboração de um grupo de engenheiros e investigadores representando a indústria, laboratórios estatais e universidade, os seus objectivos abrangem aspectos de natureza científica, mas também uma aproximação eficiente e compreensiva da implementação prática dos quebra-mares perfurados. Numa fase inicial do projecto foi feita uma revisão bibliográfica e uma identificação e apreciação crítica das estruturas que têm sido estudadas. Por forma a estabelecer critérios e recomendações de projecto de caixotões perfurados, é importante um conhecimento dos constrangimentos de projecto relacionados com aspectos estruturais, métodos de construção e sobrevivência dos caixotões perfurados. Pretende-se que desta tarefa resulte um estudo de avaliação técnica e económica dos caixotões perfurados para aplicação em quebra-mares e cais interiores e o pré-dimensionamento de um caixotão perfurado em local a seleccionar.

3.3 Desenvolvimentos recentes

Nesta secção são apresentados os primeiros resultados preliminares relativos soluções da modelação não-linear (Basmal, 2001). O modelo analítico não linear aqui desenvolvido considera o campo de ondas associado à interacção de uma onda solitária com uma superfície vertical, fixa no fundo, assumindo que o fluido é incompressível e o movimento irrotacional. Considera-se o sistema de coordenadas cartesianas (x, y, z) num quebra-mar de superfície vertical plana. O eixo z tem o sentido vertical ascendente sendo o plano $z=0$ coincidente com o fundo e a propagação das ondas segundo a direcção do eixo horizontal x (Figura 6). O domínio fluido é limitado pelo fundo plano $z=0$ e pela superfície livre transiente $z = h + \zeta(x, y, t)$, sendo h constante.

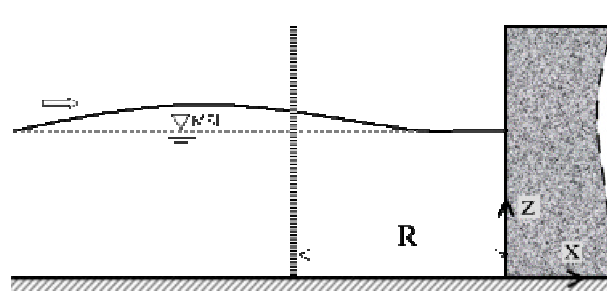


Fig. 6 Representação esquemática do exemplo de estudo.

Os resultados obtidos referem-se ao estudo de avaliação da pressão exercida por uma onda, sobre as paredes impermeável (traseira) e permeável (perfurada) de um quebra-mar, apresentados na Figura 7, considerando o parâmetro $R=1$ (ver Figura 6) adimensionalizado pelo comprimento de onda. O parâmetro Q refere-se à porosidade da parede frontal perfurada. A análise dos resultados de avaliação da pressão na parede traseira permitem concluir que com o aumento da permeabilidade da parede perfurada aumenta a pressão na parede traseira por um lado e por outro aumenta o período de tempo de interacção da onda com a estrutura. Quando a permeabilidade da parede frontal é de $R=0.5$ a amplitude máxima da força em qualquer das paredes reduz-se a cerca de metade da que ocorre numa única parede

impermeável. Note-se que estas forças estão desfasadas no tempo, pelo que a força máxima lateral sobre a estrutura é inferior à soma das duas.

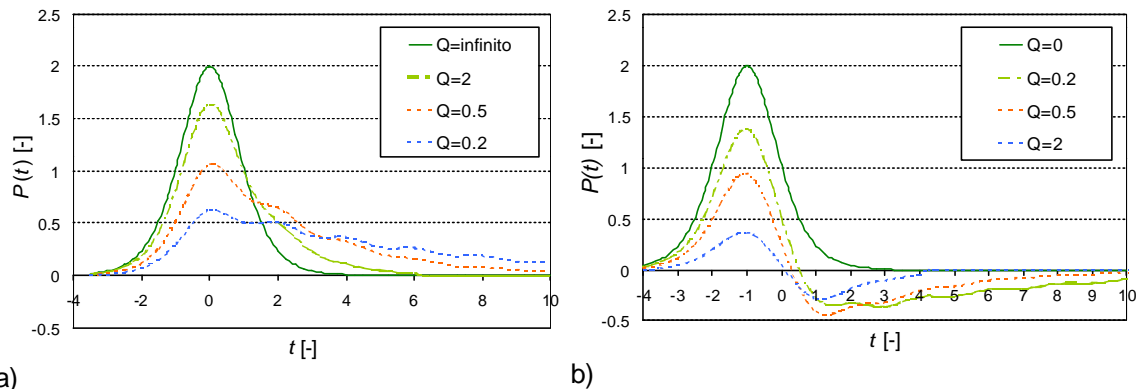


Fig.7 Variação temporal da pressão total relativa a) sobre a parede traseira impermeável e b) sobre a parede frontal permeável, considerando $R=1$ e diferentes porosidades Q da parede frontal.

4. APROVEITAMENTO ESTRUTURAL DE UM QUEBRA-MAR EM CAIXOTÕES PERFURADOS

4.1 Sistema de aproveitamento de energia das ondas

A utilização da energia das ondas marítimas tem sido objecto de actividade em vários países europeus, no Japão, EUA, China e Índia e pode ser consultada em (Hagerman, 1995) incluindo uma revisão geral dos diversos dispositivos de energia das ondas propostos. O sistema do tipo coluna de água oscilante, apresentando menor complexidade tecnológica, foi um dos poucos tipos de sistemas de aproveitamento da energia das ondas construído à escala real e instalado em mar aberto. Num sistema deste tipo a massa de água no interior de uma estrutura parcialmente submersa oscila (coluna de água oscilante) por acção da ondulação incidente. Na parte emersa a estrutura encerra uma câmara pneumática sobre a superfície livre da água, onde o ar fica sujeito alternadamente a uma compressão e expansão. A câmara pneumática está ligada à atmosfera exterior através de uma conduta onde está instalada uma turbina de ar acoplada a um gerador eléctrico. Na fase de compressão o ar escoar-se para a atmosfera através da conduta (e da turbina), ocorrendo o inverso na fase de expansão. A turbina tem uma configuração tal que roda no mesmo sentido independentemente do sentido do deslocamento de ar. Foram construídas recentemente duas centrais deste tipo para serem ligadas à rede eléctrica local: uma na ilha de Islay (Escócia), designado por LIMPET, construída numa reentrância da costa e projectada para futuramente ser integrada em quebra-mares e outra em Portugal – a central da ilha do Pico, Açores – que motivou o desenvolvimento de metodologias de dimensionamento destas centrais. A central escocesa está em funcionamento regular desde Outubro de 2000 e a do Pico vai arrancar em Julho de 2001.

No âmbito da actividade de investigação que levou à concretização da central na ilha do Pico foi adaptado ao sistema do tipo CAO, de geometria arbitrária, um modelo numérico tridimensional linear desenvolvido inicialmente para o estudo da interacção de ondas com corpos flutuantes, utilizando o método dos elementos de fronteira para resolver, no domínio da frequência, os problemas hidrodinâmicos de radiação e difracção (Delhommeau, 1987; Brito-Melo, 2001). Este modelo – AQUADYN-OWC – foi validado com base em resultados publicados, obtidos com o modelo numérico WAMIT desenvolvido pelo MIT e por comparação com resultados experimentais obtidos com o modelo físico da central do Pico, reproduzida à escala 1:25, no tanque de ondas irregulares do Departamento de Hidráulica do LNEC (Brito-Melo et al, 1999). Recentemente o modelo numérico tem sido aplicado ao estudo do comportamento hidrodinâmico destas centrais integradas num quebra-mar vertical, considerando o efeito da permeabilidade ao longo das paredes do quebra-mar.

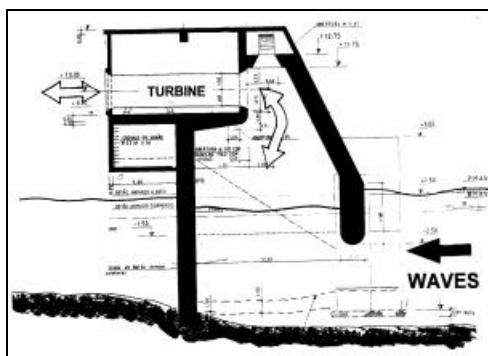


Fig.8 Central de Energia das Ondas da ilha do Pico, Açores (Falcão, 1996). Representação esquemática da secção transversal (esquerda) e vista lateral (direita).



Fig.9 Central de Energia das Ondas “LIMPET” na Ilha de Islay, Escócia (WAVEGEN, 2001). Vista traseira (esquerda) e imagem futurista proposta pela empresa WAVEGEN para utilização da central em quebra-mar (direita).



Fig. 10 Projectos de demonstração de energia das ondas do tipo CAO integradas em quebra-mares, Graw (2001). Porto de Vizhinjam (esquerda) e Porto de Sakata (direita).

5. ASPECTOS ECONÓMICOS

São aspectos importantes na concepção e desenvolvimento de infraestruturas costeiras os custos inerentes ao projecto e os benefícios que daí resultam. Embora os aspectos benéficos dos quebra-mares perfurados sejam dificilmente quantificados, como sejam o menor impacto na zona costeira envolvente e a melhoria das condições de manobrabilidade da área portuária, são geralmente mencionados os elevados custos de construção destas estruturas quando

comparadas com os caixotões clássicos. No entanto, tendo em conta que a configuração dos caixotões perfurados reduz consideravelmente os esforços (Takahashi, 1996; Clauss et al, 1998; PROVERBS, 1999), este aspecto conduz a um projecto mais económico. Por outro lado estes caixotões poderão substituir com vantagens económicas e ambientais os quebra-mares de talude.

5.1 Combinação quebra-mar/sistema CAO

Cerca de 75% do custo das centrais CAO isoladas refere-se à estrutura. A construção deste tipo de centrais na vizinhança de quebra-mares em fase de reconstrução permite reduzir um pouco o custo da central, já que o custo associado a deslocar mão de obra e equipamento pode ser atribuído à reparação do quebra-mar, sendo a central construída a custos marginais. Contudo, como se mostra em Neumann (1999) e Neumann e Sarmento (2000) essa redução de custos não é suficiente para assegurar, neste momento, a viabilidade económica destas centrais. A redução de custos é contudo muito mais significativa (30 a 60%) se a própria estrutura da central constituir uma secção do quebra-mar. Tal torna esta solução praticamente competitiva em termos económicos desde já (Neumann e Sarmento, 2001).

A integração de centrais CAO em quebra-mares de talude pode levantar problemas de estabilidade do molhe, que não estão presentes se o molhe for vertical, como no caso dos quebra-mares verticais permeáveis. Esta parece ser, portanto, uma via a explorar.

6. CONCLUSÕES

O estudo sobre o trabalho que tem sido desenvolvido, até à data, no domínio dos quebra-mares perfurados permitiu desenvolver uma apreciação crítica das estruturas que têm sido analisadas. Foram referidas as diversas vantagens na utilização dos caixotões perfurados, em termos estruturais, económicos e ambientais. A revisão da bibliografia existente incidiu sobre aspectos de modelação matemática e experimental e métodos de dimensionamento propostos. Grande parte do trabalho desenvolvido sobre este tipo de estruturas foi realizado no Japão. Na Europa, o projecto "MAST III-PROVERBS" representou o início do interesse pela construção de quebra-mares deste tipo.

É ainda necessário desenvolver esforços no sentido de consolidar uma metodologia de dimensionamento destas estruturas tendo em vista a sua implementação na costa Portuguesa. No âmbito do projecto Português sobre quebra-mares perfurados que neste trabalho foi apresentado, pretende-se compreender e quantificar a propagação e dissipação de ondas marítimas em caixotões permeáveis e desenvolver métodos de cálculo dirigidos ao seu dimensionamento estrutural e hidráulico. Os resultados preliminares apresentados neste trabalho constituem uma primeira abordagem analítica do problema hidrodinâmico no domínio não-linear.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela bolsa "Marie Curie Fellowship" no âmbito do programa "EESD – Energy, Environment and Sustainable Development" da Comunidade Europeia (contracto n° EVK3-2000-55015), pela bolsa "BCC Fellowship" da Fundação para a Ciência e Tecnologia e pelo Projecto de Investigação "*Perforated Breakwaters - From Wave Structure Interaction Process Characterisation to the Development of Design Tools*", financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

REFERÊNCIAS

Allsop, N.W.H. e Mc Bride, M.W. (1994), "Reflection From Vertical Walls: The Potential for Improvement in Vessel Safety and Wave Disturbance". Proceedings of Workshop on Wave Barriers in Deep Waters, Port and Harbour Research Institute, Yokosuka/ Japan, pp. 105-127.

- Allsop, N.W.H. (1995), "Vertical Walls and Breakwaters: Optimisation to Improve Vessel Safety and Wave Disturbance by Reducing Wave Reflections". Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures, pp. 232-258; ASCE, New York.
- Allsop, N.W.H.; Vicinanza, D.; McKenna, J.E. (1996), "Wave Forces on Vertical and Composite Breakwaters". Report SR 443, March 1995, Rev. March 1996; HR Wallingford Group Ltd., UK.
- Basmat, O.S. (2001), "Interaction of solitary wave with a permeable cylindrical breakwater", GAMM Annual Scientific Conference at the ETH Zürich, 2001, Feb. 12-15; to be published in ZAMM.
- Bélorgey, M.; Bergmann, H.; De Gerloni, M.; Franco, L.; Passoni, G.; Tabet-Aoul, E.H. (1999), "Perforated Caisson Breakwaters: Wave Loads and Hydraulic Performance". Proceedings of 'Coastal Structures '99', Santander/ Spain.
- Boyle, G. (1996), "Renewable Energy: Power for a Sustainable Future". The Open University, Oxford University Press, UK.
- Brito-Melo A., Sarmiento A.J.N.A., Clement A.H., Delhommeau G. (1999), "A 3D Boundary Element Code for the Analysis of OWC Wave Power Plants". Proc. 9th Int. Offshore and Polar Engng., Conf., Brest, ISOPE, I, pp. 188-195.
- Brito-Melo, A. e Sarmiento, A.J.N.A. (2000), "Numerical study of the performance of a OWC wave power plant integrated in a semi-infinite breakwater". Proc. 4th European Wave Power Conf., University of Aalborg, Denmark, paper I6.
- Brunn, P. (1989), Harbour Planning, Breakwaters and Marine Terminals; Port Engineering, 4th Edition; Gulf Publishing Company, Houston/Texas.
- Caddet (1999), "Wind Farm in Zeebrugge Outer Harbour". CADDET Technical Brochure No. 124; ETSU, Oxfordshire, UK.
- Canel, M. (1995), "Dissipative Monolithic Breakwaters Some Aspects of Hydrodynamics". MAST2- MCS Final Project Workshop, EU, Alderney Island/UK.
- Clauss, G.F.; Oumeraci, H.; Kuehnlein, W.L.; Kuhlmann, G.; Bergmann, H. (1998), "Optimierung von vertikalen Seegangsabsorbern für Küstenschutz sowie Wellendämpfung in Häfen und Wasserstrassen" (em Alemão). Relatório final para BMBF dos parceiros cooperadores Instituto da Arcitectura Naval e Engenharia Marítima (Universidade Técnica de Berlim) e Instituto Leichtweiss (Universidade Técnica de Braunschweig).
- Cox, R. J.; Horton, P. R.; Bettington, S. H. (1998), "Double Walled, Low Reflection Wave Barriers". Proceedings of 26th ASCE Conference 'Coastal Engineering 1998', Copenhagen/Denmark, pp. 2221-2234.
- Darwiche, M.K.M.; Williams, A.N.; Wang, K.-H. (1994), "Wave Interaction with Semiporous Cylindrical Breakwater". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 120, No. 4, July/August 1994, pp. 382-403; ASCE.
- Delhommeau, G. (1987) 'Les problèmes de diffraction-radiation et de résistance de vagues: étude théorique et résolution numérique par la méthode des singularités' – Thèse de Docteur ès Sciences, E.N.S.M. Nantes (em francês).
- Falcão, A.F. de O. (1996), "European Wave Energy Pilot Plant on the Island of Pico, Azores, Portugal". Contract J0U2-CT93-0314: Final Report; 02/1994 – 08/96, Instituto Superior Técnico (IST), Lisbon, Portugal.
- Falcão, A. F. de O., (2000), "The shoreline OWC wave power plant at the Azores". Proc. 4th European Wave Power Conf., University of Aalborg, Denmark, paper B1
- Franco L. (1994), "Vertical Breakwaters: the Italian Experience". Proceedings of 24th ASCE Conference 'Coastal Engineering 1994', Orlando/Florida.
- Fugazza, M.; Natale, L (1992), "Hydraulic Design of Perforated Breakwaters", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 118, No. 1, Jan./Feb. 1992, pp.1-14; ASCE.

- Gerloni, M.; Colombo, D.; Bélorgey, M.; Bergmann, H.; Franco, L.; Passoni, G.; Rousset, J.M.; Tabet-Aoul, E.H. (1999), "Alternative Low Reflection Structures - Perforated Vertical Walls". Chapter 8.1 of yearly report for EU project MAST III – PROVERBS, Final Report; EU, 1999.
- Goda, Y. (1985), "Random Seas and Design of Maritime Structures". University of Tokyo Press, Tokyo/Japan.
- Goda, Y.; Kanda, K.; Hoshima, Y.; Ohneda, H.; Susuki, H.; Hirano, M. e Takahashi, S. (1989), "Field Verification Experiment of a Wave Power Extracting Cassion Breakwater". Proc. 1st Int. Conf. Ocean Energy Recovery, Hawaii, pp 35-42.
- Graw K.-U. (2001), Página internet do Prof. Graw, Universidade Leipzig, Alemanha: www.uni-leipzig.de/~grw/wellenenergie/index.html, (acedida em Junho 2001).
- Hagermann, G. (1995), *Wave Power*; SEASUN Power Systems - Reprint from Encyclopedia of Energy Technology and the Environment 4 Volume Set; John Wiley & Sons, Inc., USA .
- Heath, T.; Whittaker, T.J.T.; Boake, C. B. (2000), "The design, construction and operation of the LIMPET wave energy converter (Islay Scotland)". Proc. 4th European Wave Power Conf., University of Aalborg, Denmark, paper B2.
- Isaacson, M.; Baldwin, J.; Allyn, N.; Cowdell, S. (2000), "Wave Interactions with Perforated Breakwater". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 126, No. 5, Sept./Oct. 2000, pp. 229-235; ASCE.
- Isaacson, M.; Premasiri, S.; Yang, G. (1998), "Wave Interactions with Vertical Slotted Barrier; Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 124, No. 3, May/Jun. 1998, pp. 118-126; ASCE.
- Jarlan, G.E. (1961), "A perforated vertical wall breakwater". The Dock and Harbour Authority, XII(486), pp. 394-398.
- Kondo, H. (1979), "Analysis of Breakwater Having Two Porous Walls". Coastal Structures 1979, II, pp. 962-977; ASCE.
- Kim, C.H.; Clément, A.H.; Tanizawa, K. (1999), " Recent Research and Development of Numerical Wave Tank – A Review", Int. Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 9, 4, pp. 241-256.
- Kriebel, D.L.; Sollit, C.; Gerken, W. (1998), "Wave Forces on a Vertical Wave Barrier". Proceedings of 26th ASCE Conference 'Coastal Engineering 1998', Copenhagen, pp. 2069-2081; ASCE.
- Liu, P.L.-F.; Lin, P.; Chang, K.-A.; Sakakiyama, T. (1999), "Numerical Modeling of Wave Interaction with Porous Structures". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 125, No. 6, Nov./Dec. 1999, pp. 322-330; ASCE.
- Losada, I.J.; Dalrymple, R.A.; Losada, M.A. (1993), "Water Waves on Crown Breakwaters", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 119, No.4, July/August 1993, pp. 367-380; ASCE.
- Losada, I.J.; Silva, R.; Losada, M.A. (1997), "Effects of Reflective Vertical Structures Permeability on Random Wave Kinematics". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 123, No. 6, Nov./Dec. 1997, pp. 347-353; ASCE.
- Lynett, P.; Liu, P.L.F.; Losaa, I.J.; Vidal, C. (2000), "Solitary Wave Interaction with Porous Breakwaters". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 126, No. 6, Nov./Dec. 1997, pp. 314-322; ASCE.
- Mclver, P. (1999), "Water-Wave Diffraction by Thin Porous Breakwater". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 125, No. 2, Mar./Apr. 1999, pp. 66-70; ASCE.
- Moto, K.; Nakada, H.; Ohneda, H.; Shikamori, M. e Takahashi S. (1991) "Field Experiment on Wave Energy Utilization System with Wave Power Extracting Cassion Breakwater". 17th Meeting UJNR/MFP, Tokyo.

- Muttray M.; Oumeraci, H.; Shimosako, K.; Takahashi, S. (1998), "Hydraulic Performance of a High Mound Composite Breakwater". Proceedings of 26th ASCE Conference 'Coastal Engineering 1998', Copenhagen, pp. 2207-2220; ASCE.
- Müller, G.U., Walkden, M. (1998), "Survivability Assessment of Shoreline OWC Wave Power Stations", Proceedings of the 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering; ASME, USA.
- Müller, G.U.; Whittaker, T.J.T. (1996)", Evaluation of Design Wave Impact Pressures", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, January/February 1996, pp. 55-58; American Society of Civil Engineers (ASCE), USA.
- Neumann, F. (1999): Preliminary Study of an OWC Breakwater Integration; MARETEC RT - 2nd Generation - 3, Internal Report; Instituto Superior Técnico, Portugal.
- Neumann, F. e Sarmento A.J.N.A. (2000), "An Assessment of Technical and Economical Viability of OWC Integration in Breakwaters". Proc. 4th European Wave Power Conf., University of Aalborg, Denmark, paper B3.
- Neumann, F. e Sarmento A.J.N.A. (2001), "OWC-caisson economy and its dependency on breaking wave design loads". Proc. 9th Int. Offshore and Polar Engng., Conf., Brest, ISOPE, I, paper AS-08.
- NRC, (2001), Página internet do National Research Council, Canadá (NRC): www.nrc.ca/corporate/english/achievements/ach2_e.html, (acedida em Junho 2001).
- Neves, M.G. (1999), "Interacción de ondas y grupos de ondas con estructuras de protección de costas", Ph. D. Thesis. Universidad de Cantabria (em Espanhol).
- Neves, M.G.; Losada, M.A.; Losada, I.J. (2000), "Propagation of Incident Modulated Waves Past Impermeable Semi-Infinite Breakwaters", Journal 'Applied Ocean Research', Volume 22 (1), Elsevier Science.
- Oumeraci, H.; Muttray, M. (1997), " Large scale model tests on a high mound composite type breakwater – final report; Leichtweiß-Institute, Technical University Braunschweig, Report Nº 818, pp. 115 (em alemão).
- Pita, C. (1984), "Dimensionamento de quebra-mares e dos elementos constitutivos", Tese apresentada para obtenção do grau de especialista do LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Raju, V.S.; Jayakuma; Neelamani, S. (1992), "Concrete Caisson for a 150 kW Wave Energy Pilot Plant: Design, Construction and Installation Aspects"; Proc. 2nd Int. Offshore and Polar Engng Conference; ISOPE, USA.
- Richey, E.P.; Sollitt, E.K. (1970), "Wave Attenuation by Porous Walled Breakwater". Proc. ASCE, 3, pp. 643-663; ASCE.
- Sawaragi, T.; Iwata, K. (1973), "On Wave Deformation Due to Permeable Structures", Coastal Engineering in Japan, 16.
- Sawaragi, T.; Iwata, K. (1979), "Irregular Wave Attenuation Due to a Vertical Breakwater with Air Chamber". Proc. 'Coastal Structures '79', 1979; ASCE.
- Sollitt C.K. e Cross, R.H. (1972), "Wave Transmission Through Porous Breakwaters". Proc. 13th ASCE Conference 'Coastal Engineering 1972'; New York.
- Sulisz, W. (1985), "Wave Reflection and Transmission at Permeable Breakwaters of Arbitrary Cross-section". Coastal Engineering 9, pp. 371-386; ASCE.
- Tabet-Aoul, E.H.; Rousset, J.-M.; Bélorgey, M. (1999), "Analysis of Horizontal Forces Acting on Vertical Walls of Perforated Breakwater", Proceedings of 9th ISOPE 'Offshore and Polar Engineering Conference', Brest.
- Takahashi, S. (1988), "Hydrodynamic Characteristics of Wave-power Extracting Caisson Breakwater". 21st ICCE, Spain, pp. 2489-2501.

- Takahashi, S. (1996), "Design of Vertical Breakwaters". PHRI publication N° 34, Port and Harbour Research Institute, Yokosuka/Japan.
- Takayama, T. (1995), "Development of New Caisson Type Breakwaters in Japan and a Probabilistic Design Approach for Composite Breakwaters", Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures; ASCE, New York.
- Tanimoto, K.; Takahashi, S. (1994), "Japanese Experiences on Composite Breakwaters", Proceedings of Workshop on Wave Barriers in Deep Waters, Port and Harbour Research Institute; Yokosuka/ Japan.
- Wang, K.-H.; Ren, X. (1993), "Water Waves on Flexible and Porous Breakwaters". Journal of Engineering Mechanics, Vol. 119, No. 5, May 1993.
- WAVEGEN, (2001), Página internet da empresa WAVEGEN: www.wavegen.com/limpet2.htm, (acedida em Junho 2001).
- Williams, A.N.; Li, W. (1998), "Wave Interaction with a Semi-porous Cylindrical Breakwater Mounted on a Storage Tank". Ocean Engineering, Vol. 25, N°s 2-3, pp. 195-219; Elsevier Science, Great Britain.
- Williams, A.N.; Mansour, A.-E. M.; Lee, H.S. (2000), "Simplified analytical Solutions for Wave Interaction with Absorbing-type Caisson Breakwater". Ocean Engineering, Vol. 27, 2000 pp. 1231-1248; Elsevier Science, Great Britain.
- Yip, T.L. e Chwang, A.T. (1999), "Wave reflection by a perforated wall breakwater with a horizontal plate", 13th Engineering Mechanics Conf, The John Hopkins University.
- Yip, T.L. e Chwang, A.T. (2000), "Perforated Wall Breakwater with Internal Horizontal Plate", Journal of Engineering Mechanics, May 2000, pp 533-538; ASCE.
- Yu, X. (1995), "Diffraction of Water Waves by Porous Breakwaters; Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 121, No. 6, Nov./Dez. 1995, pp. 275-282.
- Yu, X.; Chwang, A.T. (1994), "Wave Motion Through Porous Structures", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 120, No. 5, May 1994.
- Zhu, S.; Chwang, A.T. (2001), "Analytical Study of Porous Wave Absorber". Journal of Engineering Mechanics, Vol. 127, No. 4, Apr. 2001, pp. 326-332; ASCE.