

## AValiação DE DANOS EM QUEBRA-MARES DE TETRÁPODES

Renan Marcelo L. C. Fonseca da Silva (Hatch Ltd., Rio de Janeiro, Brasil).

E-mail: renan.silva@hatch.com.br

Otávio S. F. J. Sayão (Hatch Ltd., Rio de Janeiro, Brasil).

E-mail: osayao@hatch.ca

**Resumo:** O objetivo do presente trabalho é o de avaliar os danos em quebra-mares de tetrápodes a partir de dados obtidos em ensaios em modelo físico. As simulações de laboratório reproduziram uma geometria complexa de um molhe submetido à arrebentação de ondas, incluindo ensaios em canal e em bacia de ondas, para diversos valores de altura e período de onda, nível d'água e tamanho de tetrápode. Os resultados obtidos foram considerados representativos para comparação com valores de danos recomendados na literatura. Nos ensaios, foi avaliada a estabilidade hidráulica da armadura do molhe de tetrápodes, sendo obtidos os danos referentes a cada segmento de tempestade utilizando a técnica de 'flickering'. Os resultados obtidos nos ensaios em laboratório em tendência são similares aos publicados na literatura no que concerne os coeficientes de estabilidade, sendo que houve casos em que eles mostraram-se inferiores aos recomendados. O presente estudo reitera a necessidade compulsória do estudo em modelo físico para projetos de estruturas costeiras de enrocamento protegido com blocos de concreto tipo tetrápodes. Foram publicados os valores esperados da relação entre onda incidente e onda para o qual não há danos em relação aos danos acumulados, e os resultados mostraram que a arrebentação e o ângulo de ataque de ondas desempenham um papel importante na progressão dos danos acumulados durante a tempestade.

**Palavras-chave:** Quebra-mar, Tetrápodes, Engenharia Costeira.

## EVALUATION OF DAMAGE IN TETRAPOD BREAKWATERS

**Abstract:** The objective of this paper is to evaluate damage in breakwaters armoured with tetrapods using physical modelling data. The hydraulic laboratory tests reproduced the complex geometry of a rubble mound breakwater armoured with tetrapod concrete blocks and subjected to breaking wave action. The tests included both flume (2-dimensional) tests and wave basin (3-dimensional) tests using several combinations of input parameters, such as wave heights, wave periods and wave directions, water level elevations and tetrapod sizes. The results were considered as representative for comparison with published technical literature guidance. During the physical model tests, the hydraulic stability of the tetrapod-armoured breakwater was evaluated, and the damage was measured for every design storm segment using the 'flickering' technique (which measures tetrapod rocking and displacements with repeated photography). The results obtained from the laboratory tests are in general similar to those predicted using published literature regarding the stability coefficient ( $K_D$ ) of Hudson's formula (USACE, Coastal Engineering Manual, 2002). In some test cases, the model stability coefficients were lower than the recommended value, which means that the published guidance yields under-designed block sizes. This confirms our paper recommendation for a compulsory requirement of physical model studies for the final design of tetrapod-armoured breakwaters. Values of the ratio between incident wave height and design wave height corresponding to the no damage condition (0% to 5% damage level) were reported, and the results showed that breaking wave height and angle of wave incidence play a major role in obtaining accumulated damage progression of the breakwater armour protection during storms.

**Keywords:** Breakwater, Tetrapods, Coastal Engineering.

### 1. INTRODUÇÃO

Uma das etapas mais importantes do projeto de estruturas costeiras e quebra-mares consiste na seleção do material a ser utilizado na armadura principal. Em geral para ambientes com clima de ondas severo, faz-se necessário um estudo comparativo entre as opções do uso de pedras ou de blocos artificiais de concreto, uma vez que é mais difícil e mais custoso

econômica e ambientalmente obter pedras a partir de determinado tamanho.

Um dos blocos de concreto largamente utilizado é o tetrápode (Danel, 1953), criado em 1953 pela Sogreah Ingénierie (atual grupo Artelia), e atualmente com patente de domínio público. Em geral os tetrápodes são utilizados com 2 camadas na armadura principal da estrutura, e sua colocação pode ser sistemática ou aleatória.

Os tetrápodes são o único exemplo de blocos de concreto já utilizados em estruturas costeiras no Brasil, presentes em diversos molhes na região Sul, tais como os do Porto de Rio Grande (RS), os do Porto de Laguna (SC), o do Porto de Imbituba (SC), e o molhe Sul do Porto de Itajaí (SC), além do molhe do Porto de Ilhéus (BA).

O projeto de estruturas costeiras com armadura principal de tetrápodes inclui a determinação do tamanho de bloco a ser utilizado. Para tanto, é comum a aplicação da equação de Hudson (Hudson, 1958; Hudson, 1959; USACE, 1984; USACE, 2002; CIRIA, 2007), que determina a massa do bloco a ser empregado a partir de fatores como onda de projeto e coeficiente de estabilidade ( $K_D$ ), que por sua vez é uma função do tipo de material adotado.

Os coeficientes de estabilidade disponíveis na literatura correspondem a resultados de estudos em laboratório, e em geral são recomendados somente para cálculos preliminares de projeto.

Os coeficientes de estabilidade comumente utilizados são os recomendados no 'Shore Protection Manual' (USACE, 1984), para os quais porcentagem de danos de 0% a 5% (ou até 5%) são aceitos para projeto.

A progressão dos danos em estruturas costeiras é de especial interesse para o planejamento de obras e para a manutenção de tais estruturas durante sua vida útil. Neste sentido, pouca informação é disponível (por exemplo, Melby e Kobayashi, 1998) para a previsão da progressão de danos de armaduras de quebra-mares, com pedra ou com blocos tipo tetrápodes, sobretudo no que concerne aos efeitos de ondas arrebatando.

O objetivo do presente trabalho é o de avaliar os danos em estruturas costeiras de tetrápodes a partir de dados obtidos em ensaios em modelo físico, tanto em um canal bi-dimensional (2D) como em uma bacia de ondas tri-dimensional (3D). Tal avaliação foi realizada a partir da comparação dos coeficientes de estabilidade obtidos nestes ensaios com os publicados na literatura técnica, incluindo um estudo da progressão dos danos ao longo dos ensaios.

## 2. CRITÉRIOS DE PROJETO DE QUEBRA-MARES DE TETRÁPODES

Para o dimensionamento do tamanho do tetrápode a ser projetado, foi utilizada a fórmula de Hudson (Hudson, 1958; Hudson, 1959; USACE, 1984), apresentada na equação (1).

$$M_{50} = \frac{\rho_s H^3}{K_D \left( \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

onde  $M_{50}$  é a massa média do bloco,  $\rho_s$  é a massa específica do bloco,  $H$  é a altura da onda característica ( $H_s$  ou  $H_{1/10}$ ),  $K_D$  é o coeficiente de estabilidade,  $\rho_w$  é a massa específica da água, e  $\alpha$  é o ângulo do talude.

Outra forma de escrever a equação (1), muito utilizada, está mostrada na equação (2), onde um termo que relaciona o coeficiente de estabilidade está evidenciado.

$$\frac{H}{\Delta D_n} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad (2)$$

onde  $D_n$  é o diâmetro nominal do bloco e  $\Delta = (r_s/r_w) - 1$ .

O coeficiente de estabilidade  $K_D$  é um parâmetro empírico, definido por estudos em laboratório hidráulico, e que leva em consideração algumas das características do projeto da estrutura costeira, dentre as quais:

- (1) material a ser utilizado, que pode ser pedra ou blocos de concreto tais como o tetrápode;
- (2) ângulo de talude;
- (3) condição de ação das ondas, isto é, arrebentação ou não arrebentação das ondas;
- (4) forma de colocação dos blocos, que pode ser aleatória ou específica;
- (5) zona da estrutura em estudo, comumente dividida entre cabeça e tronco; e
- (6) faixa de valores de danos.

Alguns trabalhos apresentaram pesquisas sobre a influência do período de ondas na estabilidade de quebra-mares de enrocamento (por exemplo, Bruun e Gunbak, 1977), e com armadura principal de blocos de concreto (van der Meer, 1988; van der Meer, 1999), onde a forma da equação (2) é utilizada. Nesse caso, o coeficiente de estabilidade  $K_D$  é substituído por outros parâmetros empíricos similares, que apresentam explicitamente a influência do período, e conseqüentemente o segundo termo da equação (2) é modificado. Nesse trabalho foi considerado somente as formulações de estabilidade de quebra-mares devido a Hudson (USACE, 1984), conforme a equação (1) ou a equação (2).

Diversas publicações apresentaram tabelas com o coeficiente de estabilidade  $K_D$  em função dos seis parâmetros acima mencionados. Observa-se que é comum a utilização dos valores apresentados nos manuais publicados pelo Corpo de Engenharia do Exército Americano (USACE), que pelo fato de unificar os resultados de estudos de alta relevância e serem constantemente atualizados, gozam de reconhecido prestígio na comunidade técnico-científica e os mesmos (USACE, 1984; USACE, 2002) são considerados no exercício do projeto de estruturas costeiras.

Atualmente os coeficientes de estabilidade comumente utilizados são os recomendados no 'Shore Protection Manual' (USACE, 1984). A versão mais atualizada do manual da USACE é o 'Coastal Engineering Manual' (USACE, 2002), que recomenda a utilização de  $H_{1/10}$  como a altura da onda característica e assume os coeficientes de estabilidade do 'Shore Protection Manual' (USACE, 1984). Versões anteriores desse manual (USACE, 1961, 1973, 1977) recomendaram outros valores para os coeficientes de estabilidade, na medida em que incorporavam os resultados de pesquisas publicadas até o momento.

Em relação à progressão dos danos em estruturas costeiras, o 'Shore Protection Manual' (USACE, 1984) apresenta uma tabela com a relação entre a onda incidente e a onda para o qual não há danos ( $H/H_{D=0}$ ) para diferentes faixas de porcentagem de danos (%D). Utilizando tal tabela, pode-se estimar os danos para uma onda superior à onda de projeto, o que é útil na programação da manutenção de estruturas costeiras. Todavia, os valores apresentados nessa tabela foram obtidos para situações sem arrebentação de ondas e apenas para o tronco do quebra-mar. Assim, por exemplo, em situações em que a estrutura a ser projetada esteja integralmente—ou apenas seu cabeça—situada na zona de arrebentação, não é apropriada a utilização dessa tabela.

O presente trabalho compara os valores do coeficiente de estabilidade  $K_D$  e de progressão de danos encontrados em ensaios de laboratório com os publicados na literatura técnica listada nos parágrafos anteriores.

As simulações em laboratório de hidráulica reproduziram uma geometria complexa de um molhe submetido à arrebentação de ondas, incluindo tanto ensaios de uma seção transversal em canal de ondas 2D, como da estrutura inteira, inclusive cabeça e tronco, em bacia de ondas 3D, para diversos valores de altura e período de onda, nível d'água, direção de ondas incidentes e tamanhos de tetrápode. Os resultados obtidos nos ensaios em laboratório foram considerados representativos para comparação com valores de danos recomendados na literatura técnica, possibilitando recomendações para futuros projetos de quebra-mares com armadura principal de tetrápodes.

### **3. ESTUDOS EM MODELO FÍSICO**

#### **3.1 Instalações**

Como parte integrante de um projeto de um novo molhe com o objetivo de fixação da barra de uma embocadura, um estudo em modelo físico foi realizado para verificar o desempenho da solução proposta submetida a condições extremas de ondas. Para tanto, foram realizadas simulações em um canal (2D) e em uma bacia de ondas (3D).

Para cada teste realizado, foi avaliada a estabilidade hidráulica do molhe e da armadura principal com tetrápodes, sendo obtidos os danos referentes a cada segmento testado. Os testes em 3D incluíram três diferentes tamanhos de tetrápodes, sendo que a geometria do molhe foi equivalente para todos os ensaios.

Considerando os ensaios em 2D e 3D, os testes realizados representam um total de mais de 60.000 ondas em ação na estrutura, totalizando mais de 170 h em protótipo.

##### **3.1.1 Canal**

O canal utilizado possui 68,5 m de comprimento, 2 m de largura e 2 m de profundidade, sendo equipado com um gerador de ondas do tipo pistão de 60 kW com capacidade de absorção ativa de ondas. O fundo do canal é plano e horizontal, e a seção de teste começou a 33,7 m do batedor. O canal é equipado com uma ponte móvel, que dispõe de um guincho de 500 kg e pode ser acessado por uma porta de correr de aço inoxidável impermeável. O canal também possui uma praia absorvedora parabólica e porosa com profundidades variáveis e uma porta divisora para rápidos enchimentos e esvaziamentos.

Uma seção de molhe convencional com escala de 1:42,2 foi testada, a qual possui uma camada de núcleo, uma de filtro e outra de armadura principal. A armadura da seção testada no canal apresentou 2 tipos de material, a saber: 2 camadas de tetrápodes de 16 t e 3 camadas de pedras com massa entre 6 e 12 t. Em cada extremidade da seção testada foi instalado um tipo de material, sendo que no centro foi construída uma transição entre pedras e tetrápodes com ângulo de aproximadamente 45°. O talude da seção do molhe é de 1:2 (v:h). A Figura 1 apresenta uma vista genérica do canal 2D e da seção do molhe testada.

O perfil de batimetria foi construído no topo do fundo do canal existente e consistiu de um talude de 1:15 de modo a reproduzir uma condição representativa da seção de transição entre pedras e tetrápodes. O pé do talude localizou-se na batimétrica de -9,2 m DHN, sendo que com os níveis de maré testados de +0,1 m, +0,7 m e +1,2 m, uma coluna de água de 9,3 m, 9,9 m e 10,4 m foram observados, respectivamente. O perfil batimétrico utilizado permitiu

que as ondas incidentes se tornassem integralmente ajustadas à condição de águas rasas antes de alcançar a seção a ser testada.



Figura 1 – Vista longitudinal do canal (esquerda) e seção testada do molhe (direita).

### 3.1.1 Bacia

A bacia de ondas possui 28 m de comprimento, 8,6 m de largura e 1,2 m de profundidade, sendo equipada com um gerador de ondas do tipo pistão eletricamente conduzido. A máquina do batedor de ondas é feita com 10 palhetas independentes e equipados com um sistema de controle para geração de ondas direcionais de cristas longas e curtas, com absorção ativa de ondas 3D. O fundo e as paredes da bacia são feitos de concreto, e um reservatório com volume idêntico ao da bacia é localizado abaixo da mesma, equipado com duas bombas para rápidos enchimentos e esvaziamentos. O fundo da bacia é plano e horizontal, e o molhe testado possui aproximadamente 8,6 m de largura e 14 m de comprimento. A bacia dispõe de uma ponte rolante de 5.000 kg, e de um absorvedor passivo de ondas de 6 m de comprimento, feito de chapas de aço.

O molhe foi integralmente construído na bacia, e três diferentes escalas foram utilizadas ao longo dos ensaios, a saber: 1:42,2, 1:46 e 1:50. Em toda sua extensão, uma seção convencional com uma camada de núcleo, uma de filtro e outra de armadura foi utilizada. A armadura do molhe testado na bacia apresentou 2 tipos de material, tetrápodes e pedras. A armadura com tetrápodes contou com 2 camadas com tamanhos das peças de 16 t (escala de 1:42,2), 21 t (escala de 1:46), e 26 t (escala de 1:50), a depender do ensaio realizado. A armadura com pedras contou com 2 a 3 camadas com massas entre 6 e 12 t. As variações das configurações do molhe incluíram 3 diferentes extensões totais dos molhes, com uma alteração total de 30 m entre os comprimentos extremos. O talude de todo o molhe é de 1:2. A Figura 2 apresenta uma vista genérica da bacia de ondas e o molhe construído para uma das configurações testadas.

A batimetria foi construída no topo do fundo da bacia existente e reproduziu as condições existentes no sítio estudado, conforme informações provenientes de levantamentos batimétricos. O pé do talude do cabeço da estrutura construída com maior extensão situou-se na cota batimétrica de -9,5 m DHN, portanto para uma coluna d'água com 9,6 m, 10,2 m e 10,7 m—para níveis de maré testados de +0,1 m, +0,7 m e +1,2 m, respectivamente.



Figura 2 – Vista da bacia sem estrutura (esquerda) e do molhe construído (direita).

### 3.2 Seções do Quebra-Mar Testadas e Construção

Uma seção representativa da transição entre a parte do molhe com armadura de pedras e a com tetrápodes está apresentada na Figura 3, enquanto a Figura 4 mostra uma seção típica do cabeço, onde a armadura é constituída de tetrápodes.

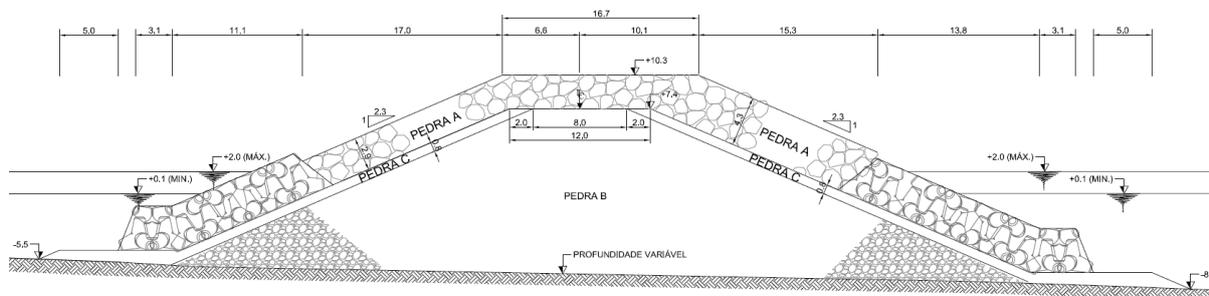


Figura 3 – Seção representativa da transição entre a parte do molhe com armadura com pedras e com tetrápodes.

A construção do molhe começou com a colocação das pedras do núcleo, seguidas das pedras do filtro e as da armadura. A colocação dos tetrápodes seguiu um método segundo o qual as primeiras fileiras de baixo para cima foram as primeiras a serem instaladas, onde uma distância fixa entre os tetrápodes foi determinada. Posteriormente, a segunda camada de tetrápodes foi colocada, sendo que as patas dos tetrápodes da segunda camada se apoiaram entre dois tetrápodes adjacentes da primeira camada. Na transição entre pedras e tetrápodes, primeiramente a camada de tetrápodes foi colocada, e em seguida as pedras. A forma de colocação dos tetrápodes foi aleatória, ou seja, houve tetrápodes apoiados com três patas e outros com apenas uma pata.

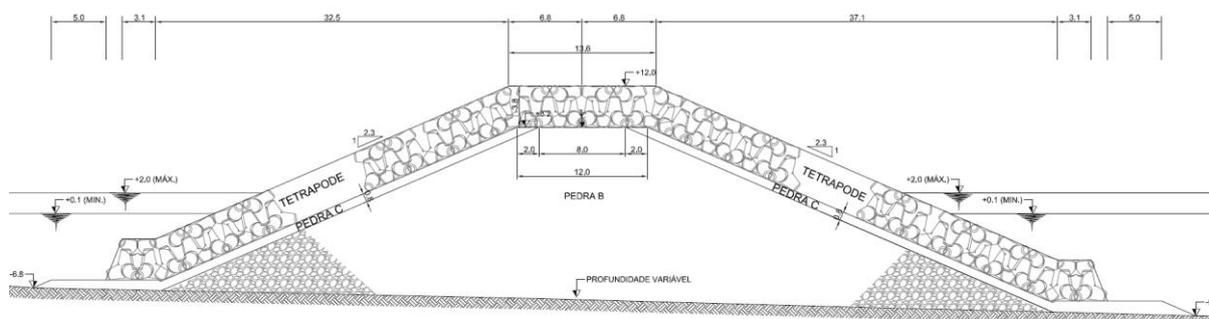


Figura 4 – Seção representativa do cabeço do molhe.

### 3.3 Instrumentação

As condições de ondas para os ensaios em modelo físico foram sintetizadas utilizando o espectro de JONSWAP ou TMA, dependendo do número de Ursell. As ondas foram medidas utilizando sensores do tipo resistivo, que operam medindo a corrente que escoa entre duas hastes submersas de aço inoxidável, de modo que essa corrente é convertida para uma voltagem que é proporcional à profundidade emersa, e o erro é de  $\pm 40$  mm em protótipo. Nove sensores foram instalados no modelo 2D e dez no modelo 3D. Quatro desses sensores (no 2D e no 3D) foram colocados na cota batimétrica de -15 m DHN para análise da energia da onda incidente. A calibração das ondas foi realizada para esses sensores, ou seja, foi imposto que o estado de mar desejado fosse obtido na profundidade dos mesmos, ou 15 m DHN. O processo de calibração consistiu no ajuste dos sinais de comando para gerar as ondas até que o erro relativo entre a onda incidente na batimétrica de -15 m DHN e a altura da onda desejada estivesse dentro da incerteza de  $\pm 5\%$ , e considerou uma situação sem o molhe. Os demais sensores foram utilizados para o estudo da propagação da onda.

### 3.4 Quantificação dos Danos

Um conjunto de câmeras foi instalado com o objetivo de capturar o deslocamento ou desprendimento dos tetrápodes ao longo das tempestades. A técnica de ‘flickering’ foi utilizada para o estudo dos deslocamentos, e, portanto, para a avaliação de danos. Para os ensaios em 2D, duas câmeras foram instaladas, uma do lado do mar e outra do lado abrigado. Para os ensaios em 3D, três câmeras foram utilizadas ao longo do contorno do cabeço.

A quantificação dos danos foi baseada na proporção entre o número de tetrápodes deslocados sobre o número total de tetrápodes numa área específica da estrutura. O critério para verificação do deslocamento do tetrápode levou em consideração a distância ( $d$ ) que ele se moveu em relação à sua posição inicial. A dimensão característica do tetrápode utilizada foi sua altura  $H$ . Assim, três limites de deslocamentos foram definidos:

- 1 – Deslocamento medido maior do que a altura do tetrápode ( $d > H$ );
- 2 – Deslocamento entre uma vez e metade da altura do tetrápode ( $H/2 > d > H$ ); e
- 3 – Deslocamento entre metade e um quarto da altura do tetrápode ( $H/2 > d > H/4$ ).

As fórmulas utilizadas para o cálculo da porcentagem de danos (%D) estão mostradas na equação (3) e na equação (4).

$$\%D = \frac{N_D}{N_T} \quad (3)$$

$$N_D = N_{d>H} + 0,4 \left( N_{\frac{H}{2}>d>H} + N_{\frac{H}{4}>d>\frac{H}{2}} \right) \quad (4)$$

onde  $N_D$  é número total de tetrápodes deslocados,  $N_T$  é o número total de tetrápodes,  $N_{d>H}$  é número total de tetrápodes que se deslocaram uma distância  $d > H$ ;  $N_{\frac{H}{2}>d>H}$  é número total de tetrápodes que se deslocaram uma distância  $H/2 > d > H$  e  $N_{\frac{H}{4}>d>H/2}$  é número total de tetrápodes que se deslocaram uma distância  $H/4 > d > H/2$ , sendo todos relacionados a uma área específica.

Tais frações de deslocamentos foram assumidas porque elas possuem o potencial de produzir uma falha (quebra) do tetrápode devido à fratura ou movimento excessivo.

O presente trabalho considerou a computação dos danos para toda a região ocupada por

tetrápodes, sendo obtido um número percentual total que não foi separado em regiões tais como cabeça ou tronco. No final de cada segmento de tempestade, foi realizada uma avaliação utilizando ‘flickering’, medindo o deslocamento da posição inicial (antes do começo do segmento de tempestade) de cada tetrápode para obtenção da porcentagem de danos total. Os tetrápodes que se deslocaram uma distância maior do que sua altura foram contados apenas uma vez, ou seja, no segmento seguinte os danos relativos a ele não foram novamente calculados.

### 3.4 Programa de Testes

O programa de ensaios foi desenvolvido durante a realização do projeto de um molhe com objetivo de fixação da barra de uma embocadura. As relações de escala nos ensaios utilizaram a similitude do número de Froude, que considera a magnitude relativa das forças gravitacionais e inerciais. Como a mecânica das ondas e as interações onda estruturas são governadas por um balanço entre forças gravitacionais e inerciais agindo em partículas de água, a utilização da similitude do número de Froude em conjunto com a similitude geométrica é conveniente para reproduzir uma simulação realística destes processos.

Os valores característicos de escala do modelo e do protótipo estão apresentados na Tabela 1, onde por simplicidade apenas a escala de 1:42,2 está apresentada. A seleção das pedras assumiu as diferenças de massas específicas entre a água doce utilizada e a massa específica das pedras disponíveis para uso no laboratório.

Tabela 1 – Relações entre escalas do modelo e do protótipo.

Quantidade	Fator de Escala	Valor típico escala protótipo	Valor correspondente no modelo
Número de Froude	$\lambda_{Fr} = \frac{\lambda_v}{\sqrt{\lambda_g \lambda_l}} = 1.0$	1.0	1.0
Comprimento (distância, profundidade)	$\lambda_l = 42.2$	190 m	4.502 m
Tempo (tempo, período)	$\lambda_t = \sqrt{\lambda_l} = 6.496$	12 s	1.84 s
Velocidade (comprimento/tempo)	$\lambda_v = \frac{\lambda_l}{\lambda_t} = \sqrt{\lambda_l} = 6.496$	1.0 m/s	0.154 m/s
Aceleração (comprimento/[tempo] <sup>2</sup> )	$\lambda_a = \frac{\lambda_l}{\lambda_t^2} = 1.0$	9.81 m/s <sup>2</sup>	9.81 m/s <sup>2</sup>
Massa específica da água	$\lambda_{\rho_w} = 1.025$	1025 kg/m <sup>3</sup>	1000 kg/m <sup>3</sup>
Massa	$\lambda_M = \lambda_l^3 \lambda_{\rho} = 75151.4 \lambda_{\rho}$	16000 kg	156.1 g

O objetivo principal do estudo foi verificar o desempenho do molhe projetado submetido a uma série de níveis e de ondas de projeto. Os ensaios de estabilidade hidráulica consistiram na realização de uma série de condições de ondas, reproduzindo eventos de tempestades específicos do sítio em questão. Cada tempestade corresponde a uma série de segmentos, sendo que para cada segmento um estado de mar com uma altura significativa e um período de pico de ondas, e uma altura do nível d’água são determinados. Para cada segmento, a estabilidade da armadura foi medida, sendo obtido um valor de danos após cada condição de onda e de nível d’água. A Figura 5 apresenta uma série temporal de uma tempestade genérica, onde cada segmento correspondeu a um intervalo de 3 h. Ressalta-se que a variação do período de pico não está mostrada na Figura 5, mas foi considerada para cada segmento de tempestade.

Vários eventos de tempestades foram simulados nos testes, sendo que as alturas significativas de ondas variaram entre 2,8 m e 6,3 m, os períodos de picos entre 9 s e 17 s, e os níveis d'água entre +0,1 m e +1,2 m. As durações das tempestades variaram entre 1 e 2 dias. Previamente à construção do molhe, ensaios de calibração foram realizados de modo a assegurar que as condições de mar desejadas fossem alcançadas, utilizando técnicas padrão no domínio do tempo, da frequência e análises estatísticas dos dados medidos nos sensores de ondas.

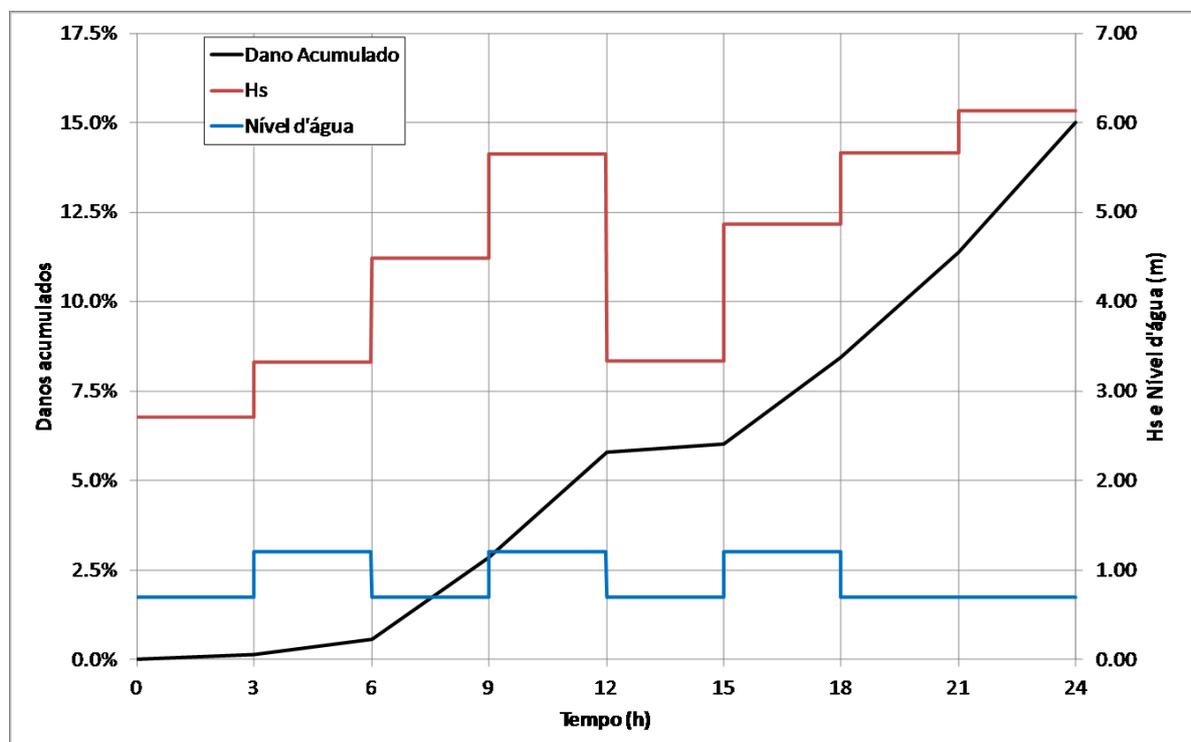


Figura 5 – Segmentos de onda e danos acumulados durante uma tempestade genérica.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente trabalho optou por apresentar os danos acumulados ao longo de cada tempestade como medida representativa da porcentagem de danos para comparação com os dados encontrados na literatura.

Os ensaios em laboratório reproduziram um molhe com talude de 1:2 incluindo efeitos de arrebenção de ondas. Conforme mencionado anteriormente, os manuais publicados pelo Corpo de Engenharia do Exército Americano (USACE) apresentaram diversos valores de coeficientes de estabilidade na medida em que resultados relevantes eram publicados na literatura. A compilação dos valores destes manuais que se relacionam com o presente estudo está apresentada na Tabela 2, onde os coeficientes de estabilidade reproduzem uma situação sem danos. Vale observar que o 'Shore Protection Planning and Design' (USACE, 1961) não apresenta um valor específico para o coeficiente de estabilidade no talude de 1:2, tendo sido considerado, portanto, o único valor disponível em tal manual. É interessante notar que o 'Shore Protection Manual' (USACE, 1984) faz uma ressalva em relação aos coeficientes de estabilidade para situações de onda arrebenando, afirmando que tais valores são recomendados apenas para projetos preliminares.

Pelo fato de a altura significativa de ondas ( $H_s$ ) ser mais utilizada no exercício da engenharia costeira, o presente estudo adotou como altura da onda característica  $H_s$ , em detrimento da

$H_{1/10}$ . Vale observar que o ‘Coastal Engineering Manual’ (USACE, 2002) recomenda a utilização da última no lugar da primeira.

Após a realização dos ensaios e da computação dos danos seguindo a metodologia descrita anteriormente, foram calculados os coeficientes de estabilidade utilizando a equação 1, sendo que a onda considerada foi a altura significativa medida por um sensor próximo ao molhe, localizado imediatamente antes da onda o atingir. Os resultados mostrados a seguir estão separados nos obtidos no canal (2D) e na bacia (3D).

Tabela 2 – Compilação de valores de coeficientes de estabilidade de tetrápodes para situação sem danos (adaptado de USACE, 1961,1973,1977, 1984).

<b>Cabeço</b>	<i>breaking wave</i> (onda na arrebentação)	<i>nonbreaking wave</i> (onda antes da arrebentação)
<b>cot a = 2</b>	<b><math>K_D</math></b>	<b><math>K_D</math></b>
Shore Protection Manual, 1984	4,5	5,5
Shore Protection Manual, 1977, 1973	5,5	6,1
Shore Protection Planning Design, 1961	5	6,5
<b>Tronco</b>	<i>breaking wave</i> (onda na arrebentação)	<i>nonbreaking wave</i> (onda antes da arrebentação)
<b>cot a = 2</b>	<b><math>K_D</math></b>	<b><math>K_D</math></b>
Shore Protection Manual, 1984	7	8
Shore Protection Manual, 1977, 1973	7,2	8,3
Shore Protection Planning Design, 1961	6,6	8,3

A Figura 6 apresenta a relação entre todos os coeficientes de estabilidade calculados em relação aos danos acumulados de cada evento de tempestade. Observa-se que o ajuste de uma curva de potência para os resultados das simulações na bacia de ondas (3D) apresenta uma correlação razoável, ao passo que o mesmo tipo de ajuste para os resultados do canal (2D) não produz tão boa correlação.

Assumindo que uma porcentagem de danos de até 5% configura uma situação de estabilidade de projeto (‘sem danos’), a Figura 6 mostra que os danos acumulados de 5% correspondem ao coeficiente de estabilidade de 7,9 para a curva potência referentes aos pontos 2D. Tal valor é similar ao recomendado pelo ‘Shore Protection Manual’ (USACE, 1984) para uma situação sem ondas arrebentando no tronco da estrutura (vide Tabela 2). Os ensaios em 2D representam uma situação de tronco de molhe com arrebentação de ondas. Portanto, o valor de  $K_D \approx 8$  encontrado nos ensaios 2D representa um coeficiente que agrega mais estabilidade do que o recomendado no manual.

Adicionalmente, a Figura 6 mostra que os danos acumulados de 5% correspondem ao coeficiente de estabilidade de 4,5 para a curva potência referente aos pontos 3D. O valor de  $K_D \approx 4,5$  é similar ao valor do ‘Shore Protection Manual’ (USACE, 1984), conforme mostrado na Tabela 2 para ondas no cabeço e em situação de arrebentação. Considerando que os ensaios em modelo físico 3D computaram os danos em conjunto nas regiões do tronco e do cabeço do molhe, e que há arrebentação de ondas, conclui-se que a tendência geral mostrada pelos resultados obtidos em laboratório está de acordo com os valores recomendados no ‘Shore Protection Manual’ (USACE, 1984).

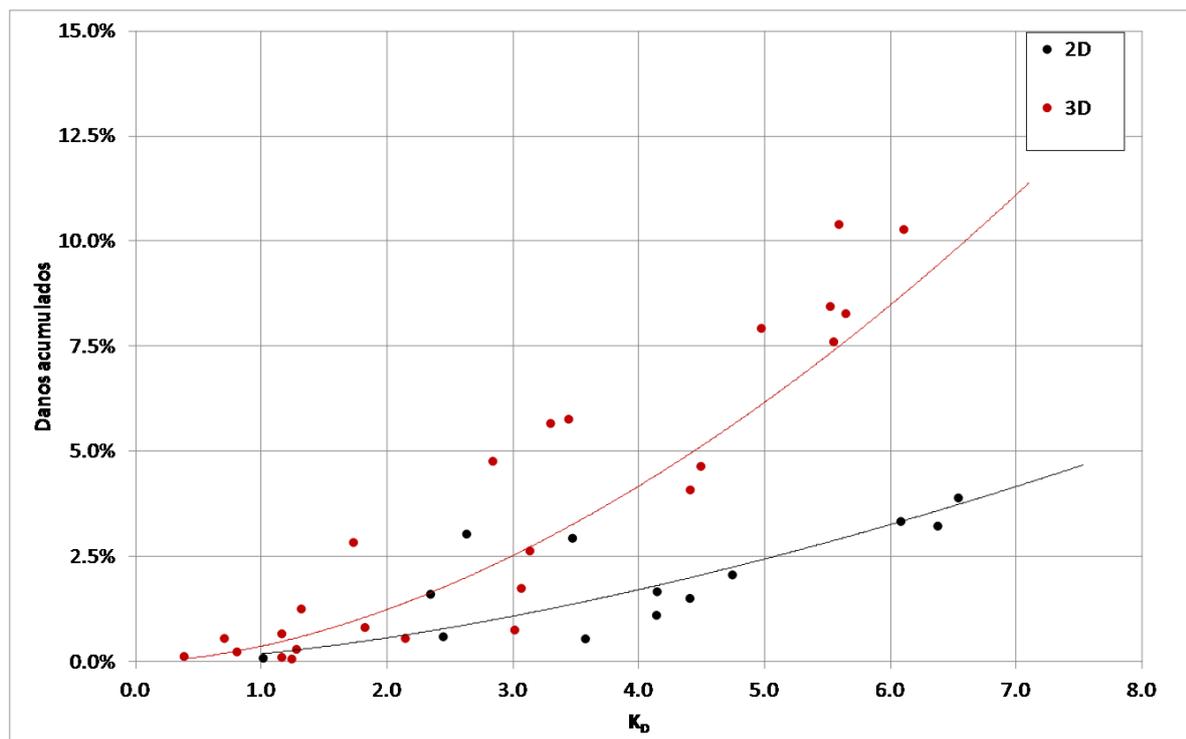


Figura 6 – Relação entre os coeficientes de estabilidade e os danos acumulados obtidos em laboratório.

Há de ser ressaltado que existem alguns casos na Figura 6 em que os danos acumulados são superiores a 5%, devido à dispersão dos dados medidos, e logo mostram um coeficiente de estabilidade inferior a 4,5. Portanto, os resultados dos ensaios em laboratório mostram que a utilização do coeficiente de estabilidade tabelado para uma situação sem danos (danos inferiores a 5%) não obrigatoriamente é adequada, corroborando a necessidade compulsória de realização de ensaios em laboratório no exercício do projeto de estruturas costeiras com tetrápodes.

Também foram calculados os coeficientes relacionando o número de estabilidade  $N_S$  (que é igual a  $H_s/(\Delta D_n)$ ) com os danos acumulados, conforme a equação 2 e utilizando a altura  $H$  do tetrápode como sua dimensão característica  $D_n$ . Os resultados estão apresentados na Figura 7. Nota-se que uma curva potência pode ser ajustada para os resultados da bacia (3D) e do canal (2D), onde na primeira (3D) a correlação é razoável enquanto que na segunda (2D) a dispersão dos dados em relação à curva ajustada é maior.

Comparando as curvas ajustadas de potência da relação entre o número de estabilidade  $N_S$  e o coeficiente de estabilidade  $K_D$  com os danos acumulados para os resultados da bacia (3D), nota-se que para as situações em que os danos são superiores a 5% o número de estabilidade apresenta um melhor resultado. É importante advertir que a curva potência obtida com o cruzamento entre coeficiente de estabilidade e os danos acumulados (Figura 6) tende a subestimar os pontos obtidos nos ensaios. Já o cruzamento do número de estabilidade com os danos (Figura 7) possui o potencial de representar de maneira mais satisfatória as condições de danos superiores a 5%, havendo pontos acima e abaixo da curva de potência ajustada.

Em relação à progressão dos danos, a Tabela 3 apresenta a relação entre a onda incidente e a onda para o qual não há danos ( $H/H_{D=0}$ ) para diferentes faixas de porcentagem de danos (%D). Conforme dito anteriormente, tal tabela prevê apenas condições de ondas incidentes no tronco da estrutura, e não considera a arrebenção de ondas, sendo o seu uso limitado.

Os ensaios no canal 2D não produziram danos acumulados superiores a 5%, portanto não

foram considerados nessa análise. Já os resultados das simulações na bacia 3D foram obtidos em conjunto para o tronco e o cabeça, e incluíram a arrebentação de ondas. Ainda que o uso dos valores da Tabela 3 não seja recomendado para ondas arrebentando no cabeça, optou-se por compará-los aos obtidos no presente estudo.

A primeira etapa desta comparação foi a triagem dos segmentos de tempestade que produziram danos superiores a 5%. Posteriormente foram calculadas as ondas para as quais não houve danos utilizando a Equação 1 e o coeficiente de estabilidade de 4,5, que foi o obtido em laboratório e é o recomendado pelo ‘Shore Protection Manual’ (USACE, 1984). Finalmente, os resultados foram agrupados na Tabela 4, sendo mostrados os valores mínimos e máximos encontrados.

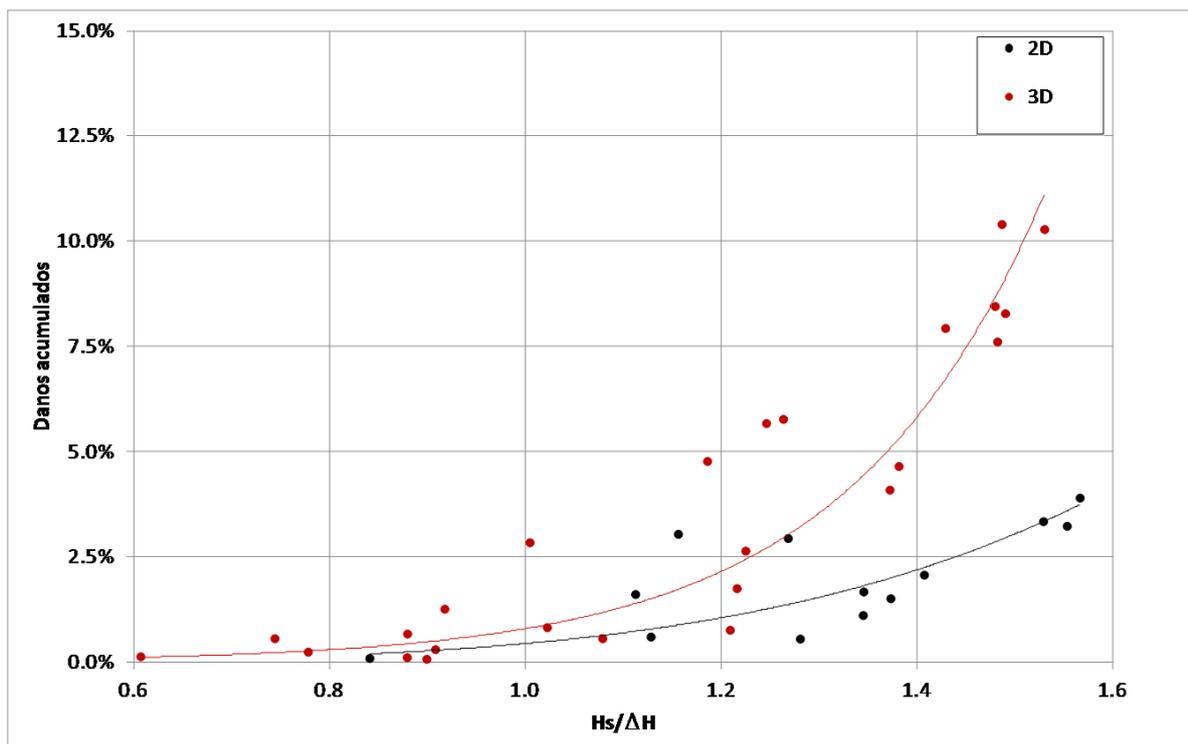


Figura 7 – Relação entre o número de estabilidade e os danos acumulados obtidos em laboratório.

Tabela 3 – Relação entre onda incidente e onda para o qual não há danos para faixas de percentagem de danos (adaptado de USACE, 1984).

Tetrápodes	Porcentagem de Danos (%)						
	0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20	20 a 30	30 a 40	40 a 50
H/H <sub>D=0</sub>	1.00	1.09	1.17	1.24	1.32	1.41	1.50

Tabela 4 – Resultados de laboratório da relação entre onda incidente e onda para o qual não há danos para faixas de percentagem de danos.

Tetrápodes	Porcentagem de Danos (%)	
	5 a 10	10 a 15
H/H <sub>D=0</sub>	1.03-1.08	1.07-1.11

A comparação entre os valores da Tabela 3 e Tabela 4 mostra que para os resultados obtidos em laboratório para as faixas de danos de 5% a 10% e de 10% a 15% são necessárias relações H/H<sub>D=0</sub> inferiores às mostradas na Tabela 3.

Observa-se que, pelo fato de o ângulo de ataque de ondas não necessariamente ser normal à seção transversal do molhe, a estabilidade dos tetrápodes pode ser impactada. Ademais, o incremento de energia que ocorre na arrebentação de ondas possui o potencial de alterar significativamente a progressão do dano.

Com tais resultados, prova-se que a utilização da Tabela 3 (USACE, 1984) é restrita ao tronco do molhe e sem arrebentação de ondas, não sendo recomendada a sua utilização mesmo em fases preliminares de projeto.

## 5. CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios obtidos em laboratório de hidráulica, tanto em canal bi-dimensional (2D) como em bacia de ondas tri-dimensional (3D), em tendência, são similares aos publicados na literatura técnica no que concerne ao coeficiente de estabilidade  $K_D$ . Houve casos em que os coeficientes de estabilidade mostraram-se inferiores aos recomendados, significando que o uso dos valores publicados pode conduzir a um projeto subdimensionado. Portanto, o presente estudo reitera a necessidade compulsória de realizar estudos em modelo físico para desenvolver projetos de estruturas costeiras com armadura principal de tetrápodes.

Adicionalmente, foram publicados os valores esperados da relação entre a onda incidente e a onda para o qual não há danos em relação aos danos acumulados. Os resultados mostraram que a arrebentação e o ângulo de ataque de ondas desempenham um papel importante na progressão dos danos nas estruturas costeiras durante as tempestades.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Carioca Christiani-Nielsen Engenharia pelo apoio financeiro e ao Instituto de Hidráulica Ambiental 'IH Cantabria' pela realização dos ensaios em modelo físico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**BRUUN, P. GUNBAK, A.R.** *Stability of sloping structures in relation to  $\xi = \tan\alpha/\sqrt{H/L_0}$  risk criteria in design.* Coastal Engineering, Elsevier, Vol.1, No. 4, pp. 287-322, 1977.

**CIRIA.** *The Rock Manual*, 2nd edition. Publication C683, CIRIA, CUR, CETMEF, 2007.

**DANEL, P.** *Tetrapods.* Proceedings, 4th Conference on Coastal Engineering, Chicago, Illinois, ASCE, pp. 390-398, 1953.

**HUDSON, R.Y.** *Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters.* Journal of the Waterways and Harbors Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 85, No. WW3, pp. 93-121, 1959.

**HUDSON, R.Y.** *Design of Quarry-Stone Cover Layers for Rubble-Mound Breakwaters. Hydraulic Laboratory Investigation.* Research Report No. 2-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1958.

**MELBY, J.A. AND KOBAYASHI, N.** *Damage progression on breakwaters.* Proc., 26th Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, ASCE, pp.1884-1897, 1998.

**USACE.** *Coastal Engineering Manual.* Engineer Manual 1110-2-1100, Washington, D.C, 2002.

**USACE.** *Shore Protection Manual*, 4th edition. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center (CERC), Vicksburg, MS, 1984.

**USACE.** *Shore Protection Manual*, 3rd edition. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS, 1977.

**USACE.** *Shore Protection Manual*. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS, 1973.

**USACE.** *Shore Protection, Planning and Design*. Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS, 1961.

**VAN DER MEER, J.W.** *Design of concrete armour layers*. Proceedings, Coastal Structures '99, Santander, Spain. Losada (ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 213-221, 1999.

**VAN DER MEER, J.W.** *Stability of cubes, tetrapods and accropode*. Proceedings, Breakwaters'88 Conference, Eastbourne, England, ICE, pp. 71-80, 1988.