

Dimensionamento de Tetrápodes: Alternativa Tecnológica Vantajosa

André Luiz Pimentel Leite da Silva Junior¹

Resumo

O presente artigo tem como objetivo apresentar uma análise comparativa de alternativas de dimensionamento de molhes e quebra-mares, considerando a utilização de blocos de rocha, tetrápodes moldados com concreto convencional e tetrápodes moldados com concreto de maior peso específico.

Busca-se demonstrar, com base nos critérios clássicos de estabilidade hidráulica, os efeitos da variação do peso específico do material na estabilidade da carapaça, especialmente quanto à redução da suscetibilidade ao deslocamento das peças sob ação das ondas, ao aumento da reserva de segurança da estrutura e à possibilidade de otimização geométrica das unidades de proteção.

O artigo também visa evidenciar as vantagens técnicas associadas à adoção de concretos mais densos em obras marítimas expostas, nas quais a estabilidade da camada externa é fator determinante para o desempenho global da estrutura.

Além disso, o artigo pretende contribuir para o aprimoramento dos critérios de projeto e execução de estruturas de proteção marítima, fornecendo subsídios técnicos para a avaliação de soluções construtivas mais seguras, duráveis e compatíveis com as condições ambientais de exposição, particularmente em cenários de maior severidade de ondas, elevação do nível médio do mar e necessidade de maior resiliência das obras costeiras.

Palavras-chave: Tetrápodes. Molhes. Concreto. Fórmula de Hudson.

Abstract: This article aims to present a comparative analysis of alternative design methods for breakwaters and jetties, considering the use of rock blocks, tetrapods molded with conventional concrete, and tetrapods molded with higher specific weight concrete, as well as highlighting the technical advantages associated with the adoption of denser concretes in exposed maritime structures.

Keywords: Tetrapods. Breakwaters. Jetties. Concrete. Hudson.

I - Introdução

¹ Engenheiro Civil, com Habilitação em Engenharia de Produção pela UFSC. Pós Graduado em Logística Empresarial pela Univali. Pós Graduado em Engenharia de Segurança do Trabalho pela UFSC. Diretor Técnico da Superintendência do Porto de Itajaí entre 2009 e 2020. Consultor de Portos e Vias Navegáveis. Assessor Executivo Especial da Empresa Municipal de Água e Saneamento - EMASA. E-mail: engportoandre@gmail.com.

As obras marítimas destinadas à proteção de acessos aquaviários, canais de navegação, molhes e áreas portuárias exigem soluções estruturais capazes de responder a solicitações hidráulicas, geotécnicas e operacionais cada vez mais severas. Em portos localizados em ambientes estuarinos, essas exigências tornam-se ainda mais relevantes em razão da elevada complexidade hidráulico-sedimentológica, da recorrência de processos de assoreamento, da necessidade de dragagem permanente e da manutenção de condições seguras para a navegação de embarcações de grande porte.

Os portos passam constantemente por processo de evolução dos parâmetros operacionais esteve associada a sucessivas intervenções de engenharia, incluindo dragagem, alargamento do canal, implantação de nova bacia de evolução, obras de enrocamento, deslocamento de molhe, estudos ambientais, modelagem matemática, simulações náuticas e estudos de manobrabilidade. Tais ações foram necessárias para permitir a operação segura de navios porta-contêineres de maior comprimento e boca, em um canal restrito e sujeito a fortes condicionantes ambientais.

Nesse contexto, a estabilidade das estruturas de proteção marítima assume papel estratégico. A carapaça externa de molhes e quebra-mares, quando executada com elementos artificiais de concreto, tem a função de dissipar a energia incidente das ondas, reduzir processos erosivos, proteger o núcleo da estrutura e contribuir para a preservação geométrica do canal de acesso. Entre esses elementos, os tetrápodes destacam-se por sua geometria tridimensional, capacidade de intertravamento e desempenho hidráulico em taludes sujeitos à ação direta ou oblíqua das ondas.

A adoção de diferentes pesos específicos de concreto na fabricação de tetrápodes representa uma alternativa técnica relevante para otimizar o desempenho dessas estruturas. Ao modificar o peso específico do concreto, altera-se diretamente o peso próprio das unidades de carapaça e, por consequência, sua estabilidade frente ao arrancamento, rolamento ou deslocamento induzido por ondas e correntes. Essa abordagem permite avaliar se o aumento da densidade do concreto pode reduzir dimensões unitárias, melhorar o intertravamento, ampliar a segurança estrutural ou, alternativamente, gerar benefícios executivos e econômicos em relação ao uso de concretos convencionais.

Dessa forma, o presente artigo tem por objetivo analisar a adoção de diferentes pesos específicos de concreto em obras marítimas compostas por carapaça de tetrápodes, avaliando seus efeitos sobre a estabilidade hidráulica, o desempenho estrutural e a aplicabilidade em ambientes portuários complexos.

Busca-se, com isso, contribuir para o aprimoramento dos critérios de projeto e execução de estruturas de proteção marítima, considerando a necessidade de compatibilizar segurança, eficiência construtiva, durabilidade e economicidade em obras associadas à operação portuária contemporânea.

II – Premissas e Dimensionamento do Peso Unitário Médio dos Blocos (W)

Do ponto de vista hidráulico, tanto os blocos de rocha quanto os tetrápodes podem ser dimensionados por formulações clássicas, como a fórmula de Hudson, tradicionalmente apresentada no Shore Protection Manual do U.S. Army Corps of Engineers.

Para o cálculo do peso do bloco da seção correspondente ao molhe ou quebra-mar, foram consideradas as possibilidades de utilização de blocos de rocha (naturais) ou artificiais (tetrápodes). Considera-se no presente artigo um cabeço fora da zona de arrebentação.

Com a Fórmula de Hudson, estima o peso individual necessário dos blocos para resistir à ação das ondas.

$$W = \frac{Y_r H_s^3}{K_d (S_r - 1)^3 \cot g \theta}$$

Onde:

Y_r - Peso específico do material do bloco;

H_s - Altura da Onda de Projeto;

K_d - Coeficiente de estabilidade;

S_r - Relação entre peso específico do material do bloco e a água do mar;

θ - Ângulo de inclinação do talude da estrutura.

θ - Ângulo de inclinação do talude da estrutura.

Como premissas:

Peso específico do material do bloco:

Y_r rocha = 2,65 t/m³

Y concreto leve = 2,40 t/m³

Y_r concreto pesado = 2,88 t/m³

Concreto pesado: Traço concreto pesado não armado $f_{ck}=40\text{Mpa}$ consumo cimento de 435 Kg/m³ e densidade aparente de 2.988 Kg/m³. Cimento CP V – ARI RS, com uso de aditivo superplastificante e slump 6+-1. Agregado miúdo: carepa de óxido de ferro (co-produto de usinagem) com módulo de finura superior a 2,5mm.

Concreto leve: Traço de concreto não armado $f_{ck}=40\text{Mpa}$, consumo de cimento 400 Kg/m^3 . Cimento CP V – ARI RS (Alta resistência inicial – resistente a sulfatos) sem aditivos e slump 6+ -1. Agregado miúdo: areia industrial.

Hs: Altura da Onda de Projeto: Variável entre 1,0m e 5,0m

Kd - Coeficiente de estabilidade:

Kd rocha = 3,2

Kd concreto = 6,6

Sr - Relação entre peso específico do material do bloco e a água do mar (Y_r/Y_a)

Peso específico da água do mar (Y_a): $Y_a = 1,03\text{ t/m}^3$

Sr rocha = $2,65\text{ t/m}^3 / 1,03\text{ t/m}^3 = 2,57$

Sr concreto leve = $2,40\text{ t/m}^3 / 1,03\text{ t/m}^3 = 2,33$

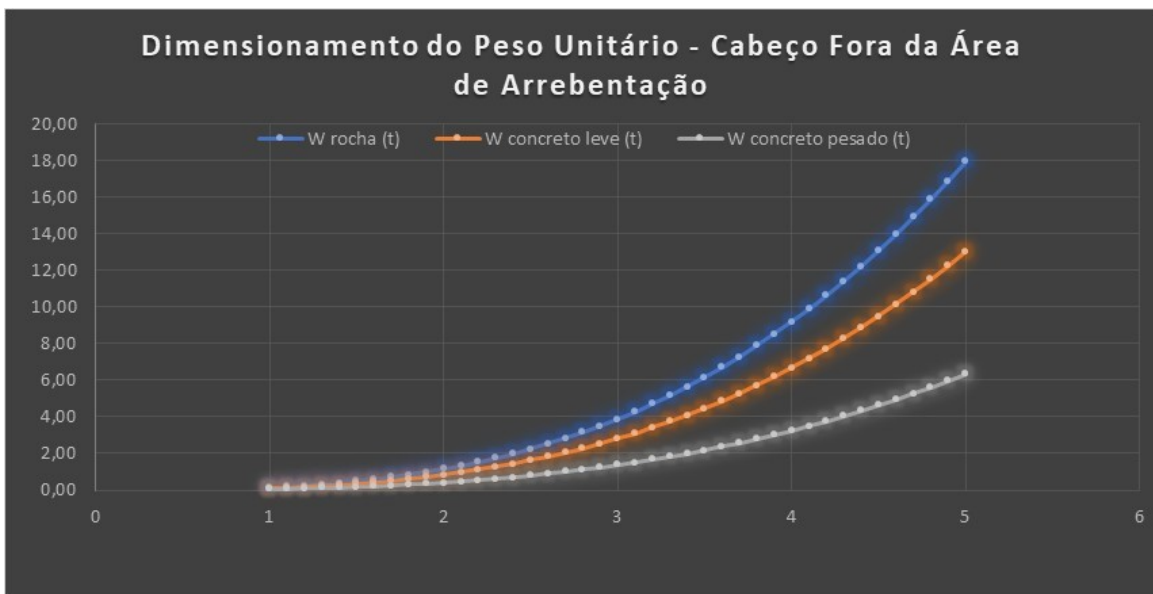
Sr concreto pesado = $2,88\text{ t/m}^3 / 1,03\text{ t/m}^3 = 2,80$

θ - Ângulo de inclinação do talude da estrutura: Considerado talude da estrutura V=1:H=1,5, que corresponde a 34° , cotangente 1,48m.

Aplicando a fórmula de Rudson, para altura de onda (Hs) variando de 1,0m a 5,0m, teremos os valores de unitários do peso dos blocos (W rocha, W concreto leve e W concreto pesado), conforme planilha a seguir:

Hs	θ	$\cotg \theta$	Ya	Yr rocha	Yr concreto leve	Yr concreto pesado	Sr rocha	Sr concreto leve	Sr concreto pesado	Kd rocha	Kd concreto	W rocha (t)	W concreto leve (t)	W concreto pesado (t)
1	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	0,14	0,10	0,05
1,1	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	0,19	0,14	0,07
1,2	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	0,25	0,18	0,09
1,3	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	0,32	0,23	0,11
1,4	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	0,39	0,29	0,14
1,5	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	0,48	0,35	0,17
1,6	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	0,59	0,43	0,21
1,7	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	0,71	0,51	0,25
1,8	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	0,84	0,61	0,30
1,9	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	0,98	0,71	0,35
2	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	1,15	0,83	0,41
2,1	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	1,33	0,97	0,47
2,2	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	1,53	1,11	0,54
2,3	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	1,75	1,27	0,62
2,4	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	1,98	1,44	0,70
2,5	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	2,24	1,63	0,79
2,6	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	2,52	1,83	0,89
2,7	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	2,83	2,05	1,00
2,8	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	3,15	2,29	1,12
2,9	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	3,50	2,54	1,24
3	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	3,88	2,81	1,37
3,1	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	4,28	3,11	1,51
3,2	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	4,70	3,42	1,66
3,3	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	5,16	3,75	1,83
3,4	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	5,64	4,10	2,00
3,5	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	6,16	4,47	2,18
3,6	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	6,70	4,86	2,37
3,7	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	7,27	5,28	2,57
3,8	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	7,88	5,72	2,79
3,9	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	8,52	6,18	3,01
4	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	9,19	6,67	3,25
4,1	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	9,89	7,18	3,50
4,2	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	10,64	7,72	3,76
4,3	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	11,41	8,29	4,04
4,4	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	12,23	8,88	4,33
4,5	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	13,08	9,50	4,63
4,6	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	13,97	10,15	4,94
4,7	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	14,91	10,82	5,27
4,8	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	15,88	11,53	5,62
4,9	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	16,89	12,26	5,98
5	34	1,48	1,03	2,65	2,4	2,88	2,57	2,33	2,80	3,2	6,6	17,95	13,03	6,35

O dimensionamento acima é ilustrado no gráfico a seguir:



Para o valor de $H_s = 4,0\text{m}$, teremos:

$W_{\text{rocha}} = 9,19 \text{ t}$

$W_{\text{concreto leve}} = 6,67 \text{ t}$

$W_{\text{concreto pesado}} = 3,25 \text{ t}$

Já para o valor de $H_s = 5,0\text{m}$, teremos:

$W_{\text{rocha}} = 17,95 \text{ t}$

$W_{\text{concreto leve}} = 13,03 \text{ t}$

$W_{\text{concreto pesado}} = 6,35 \text{ t}$

III - Comparação entre blocos de rocha e tetrápodes

Em obras de molhes, quebra-mares ou estruturas de abrigo marítimo em talude, a camada externa de proteção — normalmente chamada de camada de armadura, manto resistente ou capapaça, tem a função de resistir à ação das ondas, dissipar energia e proteger as camadas internas do maciço. Essa armadura pode ser executada com blocos naturais de rocha, também denominados enrocamento ou quarrystone/riprap, ou com unidades artificiais de concreto, como os tetrápodes. A escolha entre uma solução e outra deve considerar não apenas a estabilidade hidráulica, mas também disponibilidade de materiais, logística, execução, manutenção, comportamento frente a danos e custo global da obra.

A principal diferença técnica entre as alternativas está no mecanismo de estabilidade. Os blocos de rocha resistem principalmente por peso próprio, atrito, rugosidade e algum grau de imbricamento entre peças. Já os tetrápodes são unidades geométricas de concreto projetadas para promover maior intertravamento e maior porosidade da camada de armadura. Na formulação de Hudson, o peso necessário da unidade de armadura é função cúbica da altura de onda.

Isso indica que, para condições geométricas e hidráulicas comparáveis, os tetrápodes podem atingir estabilidade com unidades individualmente menores que os blocos naturais de rocha.

A solução com blocos de rocha apresenta como vantagens a simplicidade construtiva, a robustez, a boa capacidade de acomodação a recalques diferenciais e a facilidade relativa de inspeção e reposição de peças deslocadas. Estruturas compostas por unidades lançadas aleatoriamente, como blocos de rocha e algumas unidades de concreto, tendem a se reajustar sob ação das ondas e possuem certa “reserva de estabilidade”, não apresentando necessariamente falha catastrófica diante de pequenos danos iniciais. Além disso, quando há jazidas próximas com rocha de boa qualidade, dimensão adequada e custo competitivo, o enrocamento costuma ser uma solução econômica e operacionalmente simples.

Por outro lado, a adoção de blocos de rocha depende fortemente da disponibilidade de pedreiras capazes de fornecer blocos com peso, forma, resistência, durabilidade e graduação adequados. Em climas de onda mais severos, o peso necessário dos

blocos pode tornar a exploração, seleção, transporte e colocação economicamente desfavoráveis ou até inviáveis.

Os tetrápodes, por sua vez, são vantajosos quando há limitação de fornecimento de grandes blocos naturais ou quando se deseja maior eficiência hidráulica da armadura.

As desvantagens dos tetrápodes estão associadas à necessidade de fabricação industrial ou em canteiro, com formas, pátio de concretagem, controle de traço, cura, manuseio, estocagem e transporte. Embora cada unidade possa ser menor que um bloco natural equivalente, a solução exige controle rigoroso da qualidade do concreto e da integridade das peças, pois fissuração, quebra durante o manuseio ou fratura por impacto e rotação sob ondas podem comprometer o intertravamento da camada. A manutenção também tende a exigir equipamentos adequados para recolocação de unidades específicas, e a recomposição de uma camada danificada pode ser menos simples que a reposição de blocos naturais de rocha.

Assim, a escolha entre blocos de rocha e tetrápodes deve ser feita por análise técnico-econômica. Blocos de rocha tendem a ser preferíveis quando há rocha local de boa qualidade e em dimensões compatíveis com a onda de projeto, quando se busca maior simplicidade construtiva e manutenção mais direta, e quando o peso requerido das unidades permanece viável. Tetrápodes tendem a ser mais atrativos quando as solicitações hidráulicas exigiriam blocos naturais muito grandes, quando há restrição de jazida, ou quando a redução de runup, maior porosidade e maior coeficiente de estabilidade compensam os custos de fabricação e controle tecnológico.

IV – Vantagens na Utilização de Concreto de Maior Peso Específico em Molhes

A adoção de concreto de maior peso específico em tetrápodes permite aumentar a estabilidade hidráulica da carapaça, reduzir deslocamentos sob ação de ondas, conferir maior reserva de segurança à estrutura e, quando o projeto é reotimizado, possibilitar a redução das dimensões ou volumes das unidades de armadura, contribuindo para uma solução mais compacta e robusta em obras de moles e quebra-mares. As principais vantagens são:

Maior estabilidade hidráulica da carapaça: O concreto mais denso aumenta o peso submerso efetivo da peça. Em ambiente marítimo, o tetrápode de 2,88 t/m³ não é apenas 20% mais pesado no ar; ele apresenta cerca de 35% mais peso efetivo submerso por unidade de volume. Isso reduz a tendência de deslocamento, rolamento, extração ou acomodação das peças sob ação de ondas.

Aumento da reserva de segurança sem alterar a geometria da peça: Caso sejam mantidos os mesmos moldes e dimensões dos tetrápodes, cada unidade passa a ter maior massa e maior estabilidade submersa. Assim, a obra ganha margem adicional contra eventos extremos, incertezas de projeto, variações executivas na colocação e ondas superiores às inicialmente previstas.

Possibilidade de reduzir o tamanho nominal dos tetrápodes: Se o projeto for reotimizado para a mesma onda de dimensionamento, o concreto de maior peso específico permite empregar peças de menor volume. Pela relação de Hudson,

mantendo-se os demais parâmetros constantes, a unidade de concreto de 2,88 t/m³ poderia atingir estabilidade equivalente com aproximadamente 41% do volume da peça convencional de 2,40 t/m³. Isso pode reduzir dimensões características, área de pátio, volume de formas e consumo volumétrico de concreto.

Redução potencial da espessura da camada de armadura: Como a espessura da carapaça depende da dimensão nominal das unidades, peças menores e mais densas podem permitir uma camada de proteção mais compacta. Isso pode reduzir a largura de bermas, espessuras de proteção e volumes associados de subcamadas, desde que o arranjo mantenha o intertravamento, a porosidade e o desempenho hidráulico adequados.

Melhor desempenho em zonas críticas da estrutura: O uso de concreto mais denso é particularmente vantajoso em trechos mais solicitados, como cabeça do molhe, transições, zonas de arrebentação, regiões próximas ao pé do talude e áreas sujeitas a ondas oblíquas ou concentração de energia. Nessas regiões, a estabilidade adicional pode reduzir a necessidade de aumento expressivo da seção ou da classe de peso dos tetrápodes.

Menor suscetibilidade a danos progressivos: Em quebra-mares de talude, a retirada ou deslocamento de algumas unidades pode iniciar processos progressivos de dano, expondo a subcamada e reduzindo o intertravamento da carapaça. Com maior peso submerso, a probabilidade de início desses deslocamentos tende a diminuir, aumentando a robustez global da proteção.

Possibilidade de manter a mesma classe geométrica com desempenho superior: Em vez de aumentar o tamanho físico dos tetrápodes, pode-se manter a mesma geometria e elevar a densidade do concreto. Isso é útil quando há limitações de fabricação, transporte, içamento, posicionamento, calado de equipamentos ou espaço de canteiro. A unidade fica mais estável sem exigir peças mais volumosas.

Redução de volume de concreto para uma mesma condição de estabilidade: Quando o projeto é recalculado para explorar a maior densidade, pode haver redução do volume individual das unidades e, potencialmente, do volume total de concreto da carapaça. Esse benefício deve ser avaliado economicamente, pois agregados pesados podem ter custo maior; ainda assim, a redução volumétrica pode compensar em obras expostas ou com peças convencionais muito grandes.

Maior eficiência estrutural por unidade de volume: O concreto de 2,88 t/m³ entrega mais estabilidade por metro cúbico moldado. Em termos práticos, cada metro cúbico de peça contribui mais para resistir à ação das ondas, pois possui maior massa e maior densidade relativa submersa.

Possibilidade de adaptação a cenários futuros mais severos: Em obras marítimas sujeitas a aumento do nível do mar, alteração do clima de ondas ou maior frequência de eventos extremos, o uso de concreto mais denso pode funcionar como margem adicional de segurança. Isso é especialmente relevante quando se deseja aumentar a resiliência da estrutura sem ampliar significativamente sua geometria.

Menor necessidade de aumento da seção transversal: Para atender a uma mesma solicitação hidráulica, o concreto de maior densidade pode evitar o crescimento excessivo das peças e da seção do molhe. Isso pode ser vantajoso quando há restrição de faixa de implantação, profundidade, interferências náuticas, canal de acesso ou limitação ambiental da área ocupada pela obra.

Potencial redução de manutenção corretiva: Com menor tendência ao deslocamento das unidades, a carapaça pode apresentar menor necessidade de recomposição após ressacas, desde que o concreto tenha resistência mecânica, durabilidade e controle tecnológico compatíveis com o ambiente marinho.

V – Observação quanto a Cota de Coroamento

O fenômeno do galgamento está intrinsecamente relacionado com o de espraiamento e ocorre quando o coroamento do quebramar não tem altura suficiente para impedir que a massa de água que o atinge passe por cima deste, atingindo a zona posterior da estrutura, ou seja, quando o nível, R_u , que o espraiamento atinge é superior à cota de coroamento da estrutura.

A geometria do molhe vai influenciar o espraiamento e, conseqüentemente, o nível de galgamento a que a estrutura estará sujeita, para um determinado estado de agitação. Um molhe suficientemente alto pode garantir que apenas será galgado por borrifos, permitindo o aligeiramento do manto resistente do talude interior. No entanto, o aumento da cota originará um aumento do volume de material empregue, pelo que é necessário encontrar um equilíbrio entre o nível de galgamento admissível e economia.

A cota de coroamento de uma obra de molhe é determinada com base na altura vertical, acima do nível d' água, que a onda galga quando incide sobre a face da estrutura. A essa altura se dá o nome de "Runup". É função principalmente das características da onda, talude e tipo de estrutura e profundidade local.

A continuidade das emissões de dióxido de carbono — CO_2 — e demais gases de efeito estufa intensifica o aquecimento global e produz efeitos diretos sobre os oceanos. O aumento da temperatura média do planeta provoca a expansão térmica da água do mar e acelera o derretimento de geleiras e mantos de gelo continentais, adicionando volume aos oceanos. Esses dois processos estão entre os principais responsáveis pela elevação progressiva do nível médio do mar.

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas — IPCC AR6 —, é praticamente certo que o nível médio global do mar continuará subindo ao longo do século XXI. O relatório indica que, em relação ao período de referência 1995–2014, a elevação média global provável até 2050 situa-se entre 0,15 m e 0,23 m em cenário de emissões muito baixas e entre 0,20 m e 0,29 m em cenário de emissões muito altas. Para o ano de 2100, as projeções aumentam significativamente, variando de 0,44 m a 0,76 m em cenário intermediário de emissões e de 0,63 m a 1,01 m em cenário de emissões muito altas.

Dessa forma, a consideração da elevação futura do nível do mar torna-se indispensável no dimensionamento, verificação de estabilidade e análise de vida útil de obras marítimas, incluindo molhes, quebra-mares, enrocamentos e carapaças de elementos artificiais de concreto, como tetrápodes, especialmente quanto a definição da cota de coroamento. A incorporação desse parâmetro aos estudos de projeto contribui para aumentar a resiliência das estruturas, reduzir riscos de galgamento, instabilidade hidráulica e danos progressivos, além de compatibilizar a concepção da obra com as tendências climáticas projetadas para as próximas décadas.

VI – Considerações Finais

O presente artigo buscou apresentar uma análise comparativa de alternativas de dimensionamento para molhes e quebra-mares, considerando a utilização de blocos naturais de rocha, tetrápodes moldados com concreto convencional e tetrápodes moldados com concreto de maior peso específico. A abordagem adotada evidenciou que a escolha da solução de proteção marítima deve considerar não apenas o peso individual das unidades de armadura, mas também o mecanismo de estabilidade, a disponibilidade de materiais, as condições de execução, a durabilidade, a manutenção e o desempenho hidráulico da estrutura ao longo de sua vida útil.

A aplicação dos critérios clássicos de dimensionamento, em especial da Fórmula de Hudson, demonstrou que o peso específico do material exerce influência direta sobre o peso unitário requerido para as unidades de proteção. Nesse contexto, observou-se que a adoção de concreto de maior densidade em tetrápodes pode proporcionar ganhos significativos de estabilidade hidráulica.

Os resultados comparativos indicam que, para uma mesma altura de onda de projeto e mantidas as demais premissas de cálculo, os tetrápodes executados com concreto pesado demandam peso unitário inferior ao das alternativas com concreto convencional e blocos de rocha. Essa condição revela uma vantagem técnica relevante, pois permite otimizar o dimensionamento das unidades de carapaça, ampliar a reserva de segurança da estrutura ou, alternativamente, reduzir dimensões e volumes.

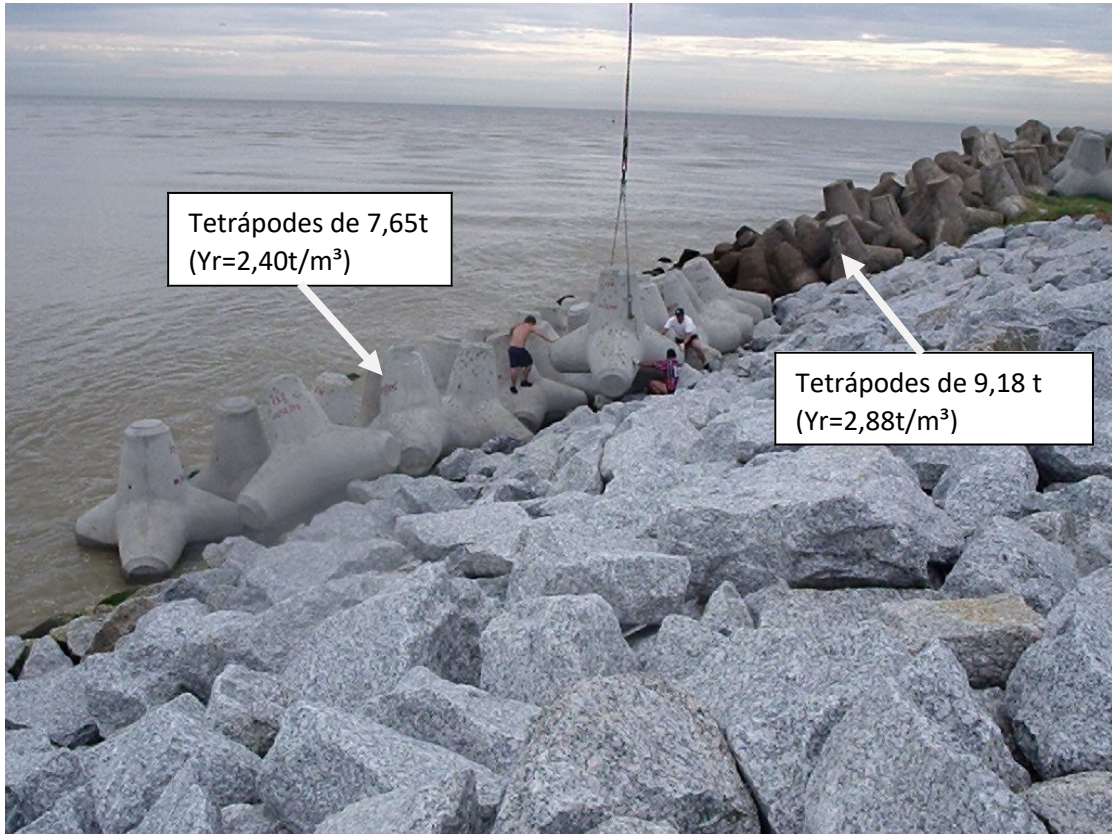
A comparação entre blocos de rocha e tetrápodes também demonstrou que não há solução universalmente superior, devendo a escolha ser fundamentada em análise técnico-econômica específica.

Verificou-se, ainda, que o dimensionamento de molhes e quebra-mares não deve se limitar à verificação da estabilidade da carapaça. A definição da cota de coroamento, o controle do galgamento, a análise do espraiamento das ondas e a consideração da elevação futura do nível médio do mar são aspectos essenciais para garantir o desempenho global da estrutura. Em cenários de mudanças climáticas, aumento da frequência de eventos extremos e necessidade de maior resiliência das infraestruturas costeiras, tais parâmetros assumem importância ainda maior no processo de concepção e verificação de obras marítimas.

Dessa forma, conclui-se que a adoção de tetrápodes moldados com concreto de maior peso específico representa uma alternativa tecnológica relevante para o aprimoramento de projetos de molhes e quebra-mares. Sua utilização pode contribuir para o aumento da estabilidade hidráulica da carapaça, a redução de deslocamentos sob ação das ondas, a ampliação da margem de segurança estrutural e a otimização das dimensões das unidades de proteção. Contudo, sua aplicação deve ser precedida de estudos específicos de viabilidade técnica, econômica e executiva, incluindo controle tecnológico do concreto, avaliação da disponibilidade de agregados, análise de custos, verificação estrutural das peças e, quando aplicável, ensaios em modelo físico reduzido.

Destaca-se que a utilização de concreto de maior peso específico em unidades artificiais de proteção marítima não se limita a uma proposição teórica, tendo precedente prático em obra portuária nacional. No Porto de Itajaí, durante a obra de recuperação e reforço do Molhe Sul, ocorrida em 2005, foi adotado concreto pesado

na recomposição e reforço da carapaça do cabeço da estrutura, onde foram fabricados in loco 2.076 tetrápodes, sendo 500 (quinhentos) de concreto pesado com peso de 9,18t lançados no cabeço e mais 1.576 tetrápodes de concreto convencional no corpo do molhe, aumentando assim a estabilidade das unidades de proteção em trecho submetido a elevadas solicitações hidrodinâmicas.



Cabeço do Molhe Sul – Porto de Itajaí. (2005)

Esse exemplo evidencia a aplicabilidade técnica da solução em condições reais de obra, reforçando a pertinência da análise comparativa entre tetrápodes de concreto convencional e tetrápodes de concreto de maior peso específico no dimensionamento de molhes e quebra-mares.

VII - Referências

Shore Protection Manual — 4ª edição, USACE/CERC, 1984 — e documentos oficiais do U.S. Army Corps of Engineers.

Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas — IPCC AR6.