

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS PRINCIPAIS EQUAÇÕES DE ESTABILIDADE PARA QUEBRA – MAR DE ENROCAMENTO. DIMENSIONAMENTO DA ARMADURA APLICADO NA PONTA DA PRAIA EM SANTOS - SP

*Adriano Henrique Tognato¹; Wladimir Caressato Junior²; Tiago Zenker Gireli³ & Patrícia
Dalsoglio Garcia⁴*

RESUMO – Obras de defesa dos litorais são intervenções estruturais que tem como objetivo criar uma área protegida das ondas de gravidade. Dentre elas, destacam-se os quebra-mares talude construídos com blocos de enrocamento, amplamente utilizados ao redor do mundo. Este trabalho apresenta um roteiro de dimensionamento da armadura, considerando uma hipotética aplicação das equações de Hudson (CERC, 1977; CERC, 1984), Ven der Meer (1984) e Van Gent et al. (2004), para condições observadas na região da Ponta da Praia em Santos – SP, visando esclarecer que cada método possui particularidades determinadas na origem de seus equacionamentos, além de restrições executivas de projeto. Sendo assim, por meio da análise comparativa, concluiu-se que a equação de Van Gent et al. (2004) é a que mais se adequa ao local de estudo, pois atende a todas as restrições propostas e leva em consideração a influência da forma espectral da onda, fator de importante relevância em condições de águas rasas e por fim, recomenda-se a utilização da equação de Hudson (CERC, 1984) em situações com poucos dados de onda disponíveis.

ABSTRACT – Coastal defense works are structural interventions that aim to create a protected area of the sea waves, among them, stands out the rubble mound breakwaters, widely diffused around the world. This paper presents a structural dimensioning of armor blocks, considering a hypothetical application of the Hudson equations (CERC, 1977; CERC, 1984), Ven der Meer (1984) and Van Gent et al. (2004), for the conditions observed in the region of Ponta da Praia in Santos - SP, aiming to clarify that each method has particularities determined in their origin, in addition to executive project restrictions. Through the comparative analysis, it was concluded that the Van Gent et al. (2004) equations are the one that best suits in the study site, because it meets all the proposed restrictions and takes into account the influence of the spectral waveform, an important factor in shallow water conditions and finally, it is recommended the Hudson equations (CERC, 1984) in situations with few available wave data.

Palavras-Chave – quebra-mar de enrocamento; proteção costeira; enrocamento

1) UNICAMP: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos: adriano_tognato@hotmail.com

2) UNICAMP: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos: wladimircaressato@hotmail.com

3) UNICAMP: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos: zenker@fec.unicamp.br

4) UNICAMP: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Departamento de Recursos Hídricos: dgpatriacia@fec.unicamp.br

INTRODUÇÃO

Obras de defesa dos litorais são intervenções estruturais que tem como objetivo criar uma área protegida das ondas de gravidade, permitindo a criação de bacias portuárias e protegendo os canais de acesso em embocaduras, além de atuar no balanço do transporte de sedimentos, estabilizando ou ampliando a linha de costa, agindo contra a erosão costeira, (Alfredini e Arasaki, 2009). De acordo com Vidal *et al.* (2006), dentre estas obras, destaca-se os quebra-mares talude construídos com blocos de enrocamento, amplamente utilizados ao redor do mundo, face a simplicidade da técnica construtiva, disponibilidade do material e eficiência no amortecimento da energia das ondas.

Contudo, para a garantir a eficiência adequada da estrutura de proteção é essencial realizar o correto dimensionamento dos blocos de enrocamento empregados na construção da armadura do quebra-mar (Guler, 2014). Na etapa do dimensionamento, além da correta caracterização do local de implantação e do conhecimento das forças atuantes (ondas de ataque), é fundamental que seja realizada uma criteriosa análise do método de dimensionamento a ser empregado, visto que, em função de todas as vantagens supracitadas, atualmente existe expressiva produção técnica sobre o tema e, cada método possui particularidades determinadas na origem de seus equacionamentos que devem ser analisadas, além de restrições executivas de projeto.

Partindo da análise comparativa entre as três principais equações empíricas de estabilidade, desenvolvidas por Hudson (CERC, 1977; CERC, 1984), Ven der Meer (1984) e Van Gent *et al.* (2004), o presente trabalho apresenta uma roteiro para o dimensionamento da armadura de enrocamento para quebra-mar de talude, considerando uma hipotética aplicação para as condições observadas na região da Ponta da Praia em Santos – SP, visando esclarecer que, nem sempre é possível a utilização de um determinado método em determinado local.

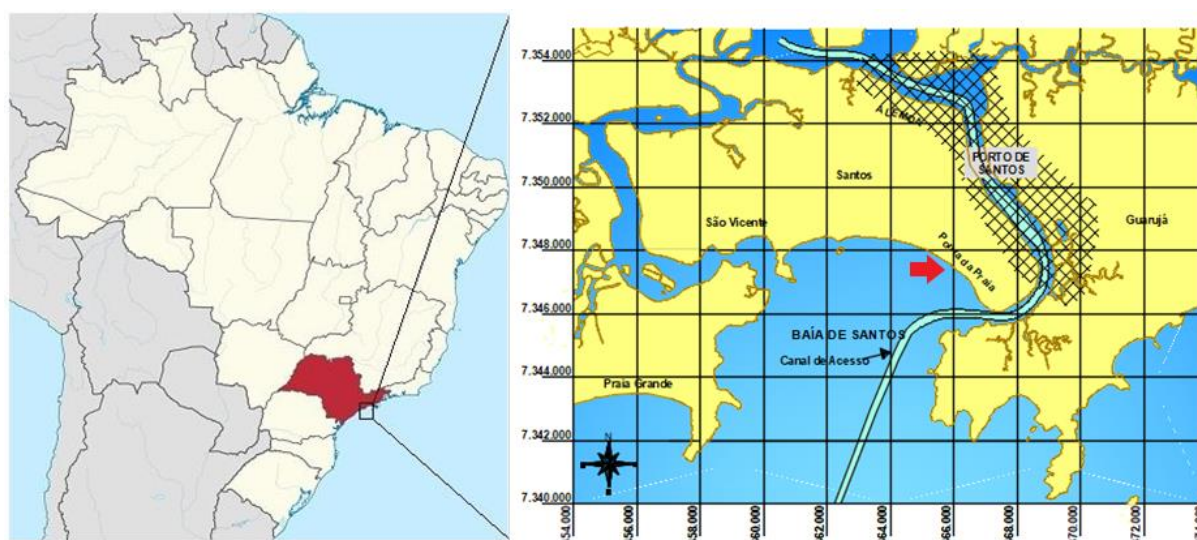


Figura 1: Localização do estudo de caso.

MATERIAIS E MÉTODOS

As equações empíricas de Hudson (CERC, 1977; CERC, 1984), Ven der Meer (1984) e Van Gent *et al.* (2004) relacionam parâmetros de ondas, ocorrência ou não de arrebentação, tipo de arrebentação, características do local de instalação do quebra-mar, características do material utilizado e nível aceitável de dano à estrutura para a obter o peso médio dos blocos de armadura W50 e o comprimento equivalente do cubo D50 (Vidal *et al.*, 2006).

De acordo com Guler *et al.* (2013) a Equação de Hudson (1) é a equação clássica. Foi concebida a partir de experimentos realizados com modelos físicos usando ondas regulares e estabelece uma relação entre as forças de sustentação, que são representadas pela densidade submersa do material empregado e comprimento médio da rocha utilizada, e as forças de arraste representadas pelo valor de altura de onda. A abordagem de 1977 recomenda a utilização da altura de onda significativa (H_s), quando considerada a quebra sobre a estrutura e a altura de onda significativa na ponta da estrutura ($H_{s.toe}$), quando a onda não quebra. Entretanto, a abordagem de 1984 recomenda a altura média das 10 maiores ondas do trem ($H_{10\%}$) quando ocorre a quebra sobre a estrutura e altura média das 10 maiores ondas do trem na ponta da estrutura, quando a onda não quebra ($H_{10\%.toe}$).

$$W50 \geq \frac{(H^3) \gamma_s}{K \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_a} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

sendo (γ_s) peso específico da rocha de enrocamento, (γ_a) peso específico da água, ($\cot \alpha$) cotangente do ângulo do talude e por fim (K) o coeficiente de estabilidade para situação de quebra ou não de onda. O valor de W50 é dado em toneladas.

Ven der Meer (1988) desenvolveu equações empíricas considerando ondas irregulares para águas relativamente profundas e intermediárias. A equação leva em conta fatores como a permeabilidade global (P), período de onda médio (T_m), nível de dano (S), coeficiente de mergulho (Cpl), coeficiente de ascendência (Cs), número de ondas que atacam a estrutura (N) e aceleração da gravidade (g). De início, é necessário obter o parâmetro de similaridade de surf (ξ_m) e o parâmetro crítico de similaridade de surf (ξ_{cri}) através das Equações (2) e (3) para classificar o tipo de quebra de onda. Se $\xi_m > \xi_{cri}$, o tipo de quebra é ascendente, ocorrendo a situação oposta $\xi_m < \xi_{cri}$, o tipo de quebra é mergulhante. Se a condição for de quebra ascendente utiliza-se a Equação (4) e se for mergulhante a Equação (5), para a obtenção do comprimento equivalente do cubo (D50) e consequentemente o peso médio dos blocos (W50). As equações de Ven der Meer (1988) também podem ser utilizadas em condições de águas rasas, entretanto, deve-se multiplicar os coeficientes de mergulho 6,2 e ascendência 1 por 1,4. Neste caso, altura de onda deve ser a altura significativa na ponta da estrutura excedida em 2% ($H_{s,toe} 2\%$), obtida por meio da distribuição de Rayleigh.

$$\xi_m = \tan. \alpha / \sqrt{(2\pi/g) Hs.toe / Tm^2} \quad (2)$$

$$\xi_{cri} = \left(\frac{Cpl}{Cs} P^{0,31} \sqrt{\tan. \alpha} \right)^{\frac{1}{P+0,5}} \quad (3)$$

$$D50 = Hs.toe / \left(\frac{Ys}{Ya} - 1 \right) Cs P^{-0,13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \cot q. \alpha \xi_m^P \quad (4)$$

$$D50 = Hs.toe / \left(\frac{Ys}{Ya} - 1 \right) Cpl P^{0,18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \xi_m^{-0,5} \quad (5)$$

As equações de Van Gent *et al.* (2004) possuem desenvolvimento semelhante a Ven der Meer (1988), sendo necessário em primeiro instante definir o tipo de quebra de onda. $\xi_{m-1,0} > \xi_{cri}$, quebra de onda ascendente e $\xi_{m-1,0} < \xi_{cri}$ quebra de onda mergulhante. Contudo, foi desenvolvida para ser aplicada em condições de águas rasas onde a influência de forma espectral, fator de importante relevância nesta condição, é adicionada a equação por meio do período de onda de energia média espectral ($Tm-1,0$). Os valores dos coeficientes de mergulho (Cpl) e surgimento (Cs) foram obtidos por meio de modelos físicos e são respectivamente 8,4 e 1,3 (Ozbahceci e Ergin, 2008).

$$\xi_{m-1,0} = \tan. \alpha / \sqrt{(2\pi/g) Hs.toe / Tm-1,0^2} \quad (6)$$

$$D50 = Hs.toe / \left(\frac{Ys}{Ya} - 1 \right) Cs P^{-0,13} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \cot q. \alpha \xi_m^P \quad (7)$$

$$D50 = Hs.toe / \left(\frac{Ys}{Ya} - 1 \right) Cpl P^{0,18} \left(\frac{S}{\sqrt{N}} \right)^{0,2} \xi_m^{-0,5} \quad (8)$$

Segundo Guler (2014), existem restrições que afetam os resultados do dimensionamento devido ao efeito de águas rasas. As restrições mais comuns são a relação entre a profundidade na ponta da estrutura e a altura de onda significativa na ponta da estrutura ($h / Hs.toe < 3$) que serve como parâmetro adimensional para classificar águas rasas e ($H2\% / Hs.toe > 1,4$) para a utilização de Ven der Meer (1988) em águas intermediárias e rasas. Alfredini e Arasaki (2009), apresentam recomendações e restrições de projeto, como a relação entre a diferença entre o nível médio de repouso do mar e o nível superior do enrocamento, que deve ser superior a 1,25 H, largura da crista do quebra mar ($n > 3D50$), restrições sobre o tamanho do bloco de enrocamento em função da capacidade de transporte até a obra e restrições de ordem geotécnica.

A espessura das camadas (armadura, intermediária e núcleo) pode ser determinada a partir do peso médio dos blocos, utilizando a equação (9) e informações apresentadas na figura 2, sendo (n) neste o número de camadas.

$$\text{Espessura da camada} = n \sqrt[3]{\frac{P}{\gamma_s}} \quad (9)$$

Peso dos blocos	Camada	Graduação dos Blocos %
P	Armadura	75 a 125
P/10 a P/15	Intermediária	70 a 130
P/200 a P/6000	Núcleo	30 a 170

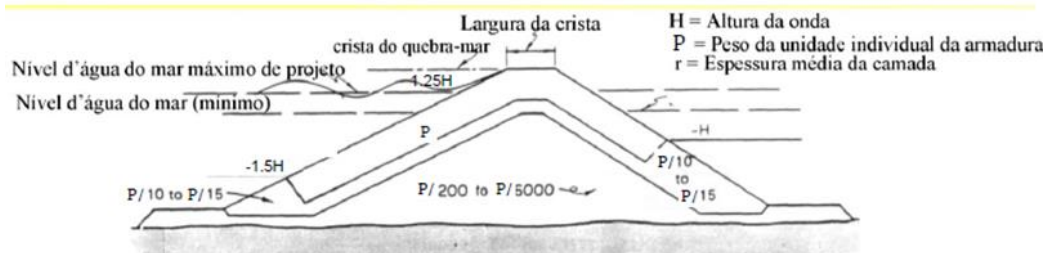


Figura 2: Seção transversal recomendada. Fonte: Alfredini e Arasaki, 2009.

Os parâmetros necessários para análise no local foram extraídos do relatório “Avaliação da Estabilidade do Talude do Canal de Navegação e Modelagem Morfodinâmica na Baía de Santos” da FUNDESPA (2015), já o perfil topográfico da seção denominada Santos – 32 foi levantado pela equipe do Laboratório de Hidráulica Marítima e Fluvial, com auxílio técnico do Departamento de Geotecnia e Transportes (DGT), pertencentes a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo (FEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). A tabela 01 apresenta todos os parâmetros necessários para o dimensionamento, considerando as três equações descritas:

Tabela 1: Parâmetros de projeto.

Dados Gerais		Ven der Meer (1988) e Van Gent (2004)	
Profundidade na ponta da estrutura (h) =	3,14 m	Permeabilidade global (P) =	0,4
Cotang. A (inclinação da face da estrutura) =	3	Nível de dano (S) =	2
Tang. A (inclinação da face da estrutura) =	0,33	Numero de ondas (N) =	1000
Peso específico do sólido (γ_s) =	2,5 tf/m ³	Período médio (T _m) =	6,62 s
Peso específico da água (γ_a) =	1,025 tf/m ³	Altura de onda na ponta da estrutura excedida por 2% das ondas (H _{s.toe} 2%) =	3,43 m
Altura significativa de onda na ponta da estrutura (H _{s.toe}) =	2,45 m		
Hudson (CERC 1977; CERC 1984)		Período de onda de energia média espectral (T _m - 1,0) =	9,4 s
Altura de onda na ponta da estrutura excedida por 10% das ondas (H _{s.toe} 10%) =	3,11 m	Parâmetro de similaridade de surf, Van der Meer (ϵ_m) =	2,58
Parâmetro de estabilidade, quebra de onda sobre a estrutura (K _d , breaking) =	2	Parâmetro crítico de similaridade de surf, Van der Meer (ϵ_{cri}) =	4,08
Parâmetro de estabilidade, onda não quebra sobre a estrutura (K _d , N breaking) =	4	Parâmetro de similaridade de surf, Van Gent (ϵ_m -1,0) =	4,33
		Parâmetro crítico de similaridade de surf, Van Gent (ϵ_{cri} ,vg) =	4,27

RESULTADOS

As restrições aplicadas e resultados obtidos são apresentados nas tabelas 2, 3, 4, 5 e 6, enquanto as figuras 3, 4, 5 e 6 elucidam as seções obtidas através de cada método utilizado.

Tabela 2: Resultados e restrições aplicadas.

Resultados e Condições	Hudson (1977)	Hudson (1984)	Ven der Meer (1988)	Van Gent et al. (2004)
Peso médio blocos de armadura (W50)	2,06 toneladas	4,21 toneladas	0,80 toneladas	3,60 toneladas
Diâmetro médio blocos de armadura (D50)	0,94 m	1,19 m	0,69 m	1,13 m
Condição de quebra	Quebrando	Quebrando	Quebrando	Quebrando
Tipo de quebra de onda	Não considera	Não considera	Mergulhante	Ascedente
Condição de águas rasas ($h / H_{s.toe} \leq 3$)	0,78	0,99	1,10	0,78
Van der Meer (1988) em águas intermediárias e rasas ($H_{2\%} / H_{s.toe} \geq 1,4$)	Somente Ven der Meer (1988)	Somente Ven der Meer (1988)	1,40	Somente Ven der Meer (1988)
Diferença entre o nível médio de repouso do mar e o nível superior do enrocamento $\geq (1,25 H)$	$(1,25 \cdot 2,45) = 3,06 \text{ m} \rightarrow \text{OK}$	$(1,25 \cdot 2,45) = 3,06 \text{ m} \rightarrow \text{OK}$	$(1,25 \cdot 2,45) = 3,06 \text{ m} \rightarrow \text{OK}$	$(1,25 \cdot 2,45) = 3,06 \text{ m} \rightarrow \text{OK}$
Lagura da crista do quebra - mar ($n \geq 3D_{50}$), n defined ($n \geq 3,0 \text{ m}$)	2,82 m	3,57 m	2,07 m	3,39 m

Tabela 3: Dimensionamento dos blocos - Hudson (1977).

Armadura	Peso do bloco	2,06 ton.
	Espessura da camada	2,76 m
Intermediária	Peso do bloco	161,37 kg
	Espessura da camada	0,79 m
Núcleo	Peso do bloco	1,84 kg

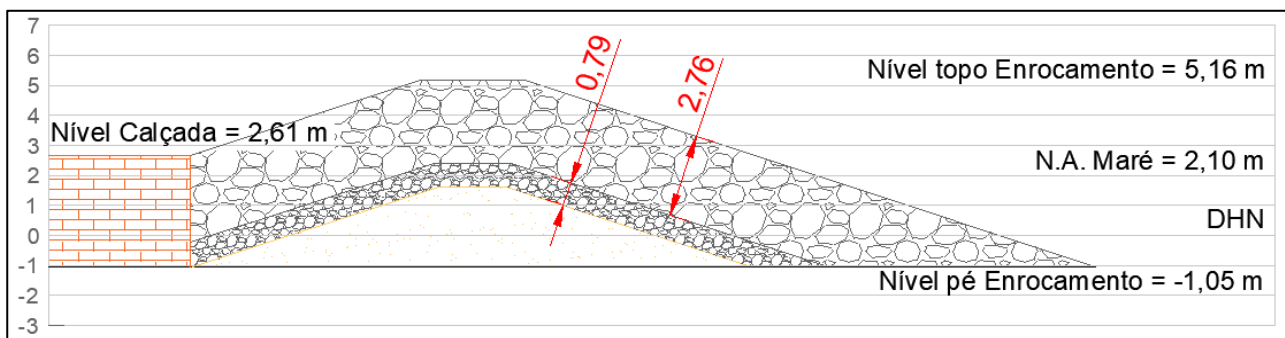


Figura 3: Seção transversal - Hudson (1977).

Tabela 4: Dimensionamento dos blocos - Hudson (1984).

Armadura	Peso do bloco	4,21 ton.
	Espessura da camada	3,50 m
Intermediária	Peso do bloco	329,78 kg
	Espessura da camada	1,00 m
Núcleo	Peso do bloco	3,75 kg

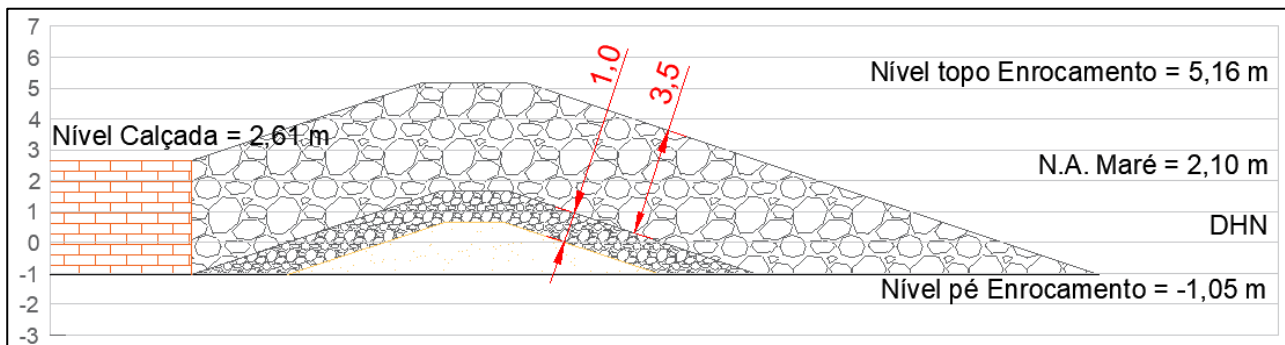


Figura 4: Seção transversal - Hudson (1984).

Tabela 5: Dimensionamento dos blocos - Ven der Meer (1988).

Armadura	Peso do bloco	0,80 ton.
	Espessura da camada	2,01 m
Intermediária	Peso do bloco	62,67 kg
	Espessura da camada	0,57 m
Núcleo	Peso do bloco	0,72 kg

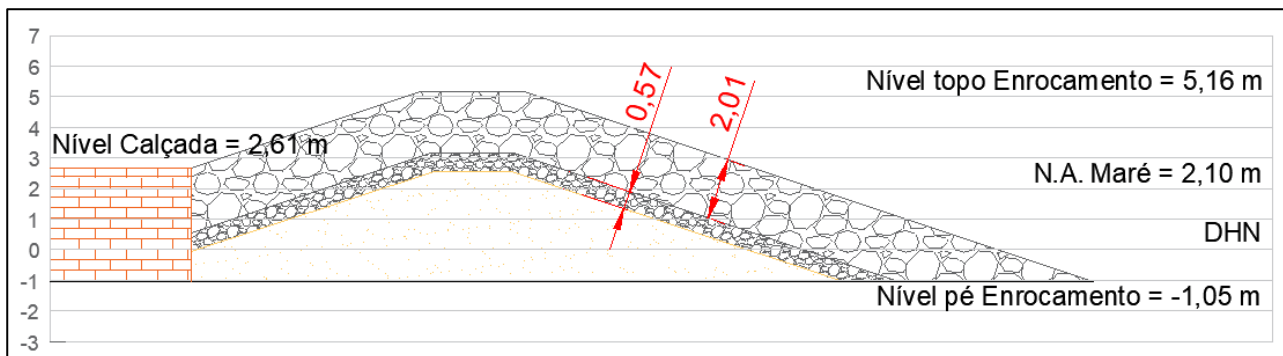


Figura 5: Seção transversal - Ven der Meer (1988).

Tabela 6: Dimensionamento dos blocos - Van Gent *et al.* (2004).

Armadura	Peso do bloco	3,60 ton.
	Espessura da camada	3,32 m
Intermediária	Peso do bloco	282,00 kg
	Espessura da camada	0,95 m
Núcleo	Peso do bloco	3,21 kg

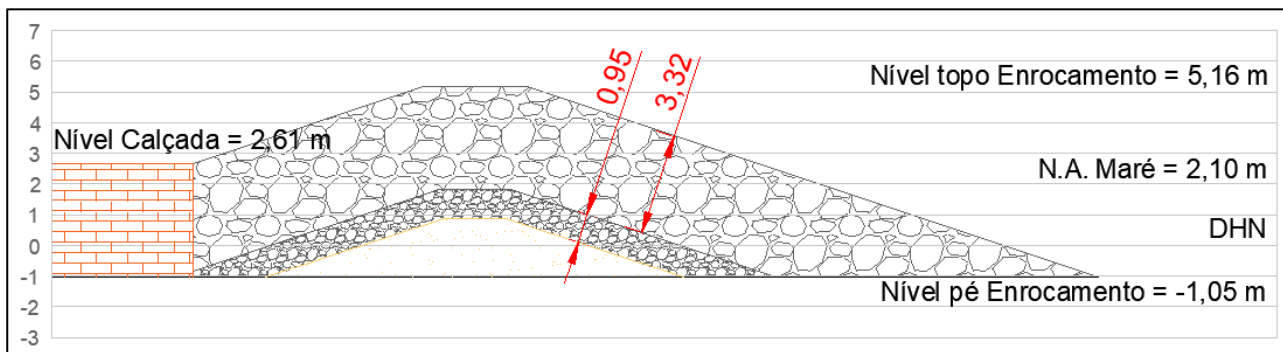


Figura 6: Seção transversal - Van Gent *et al.* (2004).

CONCLUSÕES

Por meio da análise comparativa entre os resultados, concluiu-se que a equação de Van Gent *et al.* (2004) é a que mais se adequa as condições de dimensionamento para o local de estudo. O equacionamento de Ven der Meer (1988), foi desenvolvido para condições de águas profundas e por mais que seja possível ajustar a equação para o dimensionamento em águas rasas, o resultado encontrado não leva em consideração a forma espectral da onda, que é fator de grande importância em águas rasas. Isto reflete no tipo de quebra de onda encontrado através de seu equacionamento, que é diferente do observado no local de estudo, sendo que, este fator leva ao subdimensionamento da

armadura e consequentemente não atende algumas restrições de projeto indicadas. A equação de Hudson (CERC, 1977; CERC, 1984) é uma abordagem mais simplificada que necessita de poucos parâmetros para sua utilização, entretanto, foi concebida levando-se em consideração ondas regulares, o que não ocorre em situações naturais e não leva em conta fatores de grande importância como o tipo de quebra de onda. No caso estudado, a abordagem de 1984 atende a todas as restrições propostas, mas o valor encontrado é significativamente maior que a equação de Van Gent et al. (2004), que também atende todas as restrições e leva em consideração a influência da forma espectral da onda por meio do valor do período de onda de energia média espectral e teve seu equacionamento desenvolvido especificamente para águas rasas e intermediárias. Recomenda-se a utilização do equacionamento de Hudson (1977, 1984) em águas rasas em casos onde todas as restrições são válidas e não seja possível a aplicação de Van Gent et al. (2004) por falta de dados necessários no local de estudo.

REFERÊNCIAS

ALFREDINI, PAOLO; ARASAKI, EMILIA. *Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental*. Edgard Blücher, 2009.

FUNDAÇÃO DE ESTUDOS E PESQUISAS AQUÁTICAS (FUNDESPA). *Avaliação da estabilidade do talude do canal de navegação e modelagem morfodinâmica na baía de Santos*. CODESP / FUNDESP, Anexo 7-6, 2015.

GULER, HASAN GOKHAN. *A Comparative Study on Van der Meer (1988) and Van Gent et al. (2004) Stability Formulae*. In: Ports' 13: 13th Triennial International Conference American Society of Civil Engineers. 2013.

GULER, HASAN GOKHAN; ERGIN, AYSEN; OZYURT, GULIZAR. *A Comparative Study on the Stability Formulas of Rubble Mound Breakwaters*. Coastal Engineering Proceedings, v. 1, n. 34, p. 27, 2014.

OZBAHCECI, BERGUZAR OZTUNALI; ERGIN, AYSEN. *Design weight of armour stone considering the effect of extreme waves*. Ocean Engineering, v. 35, n. 3-4, p. 393-399, 2008.

VIDAL, C.; MEDINA, R.; LOMÓNACO, P. *Wave height parameter for damage description of rubble-mound breakwaters*. Coastal Engineering, v. 53, n. 9, p. 711-722, 2006.