

## Um projeto piloto de recuperação de uma praia utilizando um quebramar submerso - Ponta da Praia, Santos, Brasil

### *A pilot project for beach restoration using a submerged breakwater - Ponta da Praia, Santos, Brasil*

Patrícia Dalsoglio Garcia<sup>1</sup>, Tiago Zenker Gireli<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Email: [pdgarcia@unicamp.br](mailto:pdgarcia@unicamp.br)

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Email: [zenker@fec.unicamp.br](mailto:zenker@fec.unicamp.br)

**RESUMO:** A ocupação desordenada da costa causa grandes prejuízos ambientais, económicos e sociais. Atualmente a costa brasileira apresenta vários pontos de intensa erosão. Em especial, o processo erosivo em andamento na região da Ponta da Praia em Santos, um dos municípios mais relevantes da costa sudeste do Brasil, tem-se acentuado consideravelmente nos últimos anos. Além de perdas expressivas de extensão da faixa de areia, houve um aumento do número de ressacas fazendo com que, nestes eventos, o mar invadissem as estruturas urbanas, causando grandes prejuízos ao município. A proposição de soluções tem, historicamente, se baseado em modelação física ou numérica. Entretanto, em regiões de hidrodinâmica complexa, os modelos podem não reproduzir adequadamente os fenómenos reinantes, tornando necessária a busca por alternativas que permitam avaliar previamente os impactos das estruturas propostas. Neste sentido, a implementação e monitorização de projetos piloto constituem-se em uma alternativa viável a curto prazo. Neste artigo são apresentadas as principais premissas utilizadas no projeto piloto executado na Ponta da Praia em Santos, bem como o seu dimensionamento e as primeiras impressões após a sua implantação. A obra é constituída por um quebramar submerso de 515 m de comprimento feito em geotubos preenchidos com areia da própria praia. A obra foi implantada e os primeiros resultados mostram-se promissores.

Palavras-chave: erosão costeira; quebramar submerso; obras leves, projeto piloto

**ABSTRACT:** The irregular occupation of the coast is one of the main reasons for many environmental, economic and social damages. Presently, there are several stretches of Brazilian coastline under serious erosion. The erosive process has increased over the last years at Ponta da Praia in Santos, which is one of the most important cities of Brazilian Southeast region. Besides significant losses in extension of sand beach, the frequency of storm surges has been higher resulting in structural damages in avenues, streets, sidewalks, and walls used to protect the beachfront infrastructure. Solution proposals have been made and they were based on physical or numerical modelling. Meanwhile, the models can not simulate adequately the local phenomena when the hydrodynamics of the modelled region is very complex. From this perspective, it is important to find options to previously evaluate the impacts of different building designs. Thus, the implementation and monitoring of pilot projects to be accomplished in the coastal region are a viable alternative in the short term. The most relevant points of the pilot project built at Ponta da Praia are reported in this article. Moreover, the structural design and the first impressions of the pilot project after its implementation are presented. The designed pilot project resulted in a submerged breakwater with 515 m long, which is made of geotubes filled with sand beach. This structure was implemented and the primary results are promising.

**Keywords:** beach erosion; submerged breakwater; soft building, pilot project

## 1. INTRODUÇÃO

A região costeira sempre teve grande importância econômica em função das atividades portuárias. Por outro lado, o atrativo turístico das praias, somado à ocupação irregular e desordenada da linha de costa, acentuou, nas últimas décadas os processos erosivos locais (Voorde *et al.* 2009). Segundo IBGE (2011), o Brasil segue a tendência mundial de crescimento da ocupação populacional da zona costeira, sendo que parte significativa desta população está ocupada em atividades de turismo, produção de petróleo e gás natural, pesca e serviços ligados às atividades econômicas das cidades.

A ocupação desordenada da zona costeira é certamente um dos grandes agentes modificadores do ambiente costeiro, trazendo consequências ambientais, sociais e econômicas. Além disso, o próprio ambiente sofre com a ação de vários agentes naturais de difícil previsão tais como, ondas, marés, correntes, ventos e aporte fluvial,

tornando a análise destes processos um assunto de grande complexidade e relevância (Ângulo, 2014). O litoral Paulista, por exemplo, apresenta vários pontos com progressiva erosão tais como, Ilha Comprida, Peruíbe e Mongaguá, Massaguaçu (Caraguatatuba), Ponta da Praia (Santos), Guarujá, entres outros (Muehe,2018).

Neste contexto encontra-se o município de Santos (Figura 1), com uma população aproximada de 430.000 habitantes, sendo uma das quinze maiores cidades do estado de São Paulo. A cidade lidera o ranking das melhores cidades brasileiras (Delta, 2014) e apresenta grande destaque no setor econômico visto que abriga o Porto de Santos, o maior complexo portuário da América Latina (Nightingale, 2017).

O crescimento desordenado da cidade, a ocupação irregular da linha de costa e as necessidades de ampliação da infraestrutura urbana, aliados à ampliação das atividades portuárias e à necessidade de ampliações

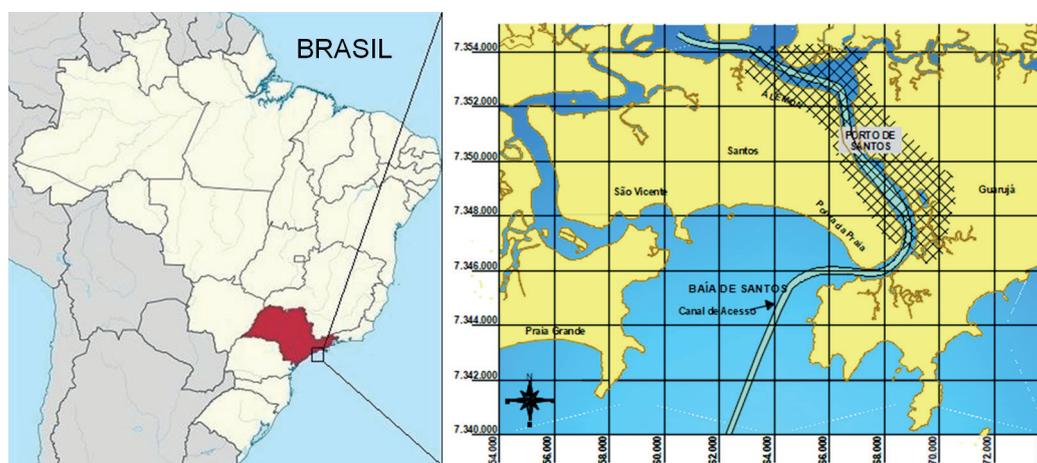


Figura 1. Localização da região de estudo – Santos - Brasil (adaptado de Garcia *et al.*, 2018).

Figure 1. Location of studied area – Santos - Brazil (adapted from Garcia *et al.*, 2018).

nas dimensões dos canais e acesso ao porto estão entre as principais causas antrópicas associadas à erosão costeira progressiva nas praias de Santos (Italiani, 2014; Venancio, 2018). Destacam-se também as alterações na dinâmica costeira devidas a causas naturais, tal como o notório aumento do número de eventos de ressacas que ocorrem no local (FUNDESPA, 2013). Na Figura 2 são apresentadas as principais intervenções antrópicas realizadas na orla de Santos.

Estas intervenções ocorreram em períodos de tempo distintos, desde 1905, provocando alterações na dinâmica costeira de maneira cumulativa, sendo difícil analisar o efeito isolado de cada uma (Tabela 1). Apesar de historicamente haver uma tendência erosiva na região, Venancio (2018) verificou que após 2010 houve uma intensificação do processo erosivo, justamente após a dragagem de alargamento e aprofundamento do canal do Porto de Santos, localizado próximo a Ponta da Praia e diretamente afetada por esta intervenção. A partir de modelação matemática, Venancio (2018) verificou que a dragagem promoveu uma mudança na hidrodinâmica local, indicando que esta intervenção, em particular, foi responsável pela aceleração do processo erosivo, que de 2010 a 2017 com observação de recuo horizontal de faixa de praia de 57 m no trecho mais erodido.

Tabela 1. Resumo das intervenções antrópicas na orla de Santos. Fonte: Venancio (2018).

Table 1. Summary of anthropogenic interventions on Santos coastline. Source: Venancio (2018).

INTERVENÇÃO	PERÍODO (anos)
Canais de Drenagem Pluvial	1905 a 1927
Sinais da presença da avenida da praia (composta de areia)	1921
Jardins de Orla (Canais 2 e 3)	1935 a 1939
Inauguração do Aquário Municipal	1945
Aterramento tómbolo Ilha Porchat	1946
Inauguração do Emissário Submarino	1978
Alargamento da avenida da praia entre os canais 4 e 5 (pavimentada)	Início da década de 1980
Expansão do Aquário Municipal	2006
Expansão do Emissário Submarino e Inauguração do Parque Roberto Mário Santini	2009
Atividades de dragagem de aprofundamento e alargamento do canal do porto	2010

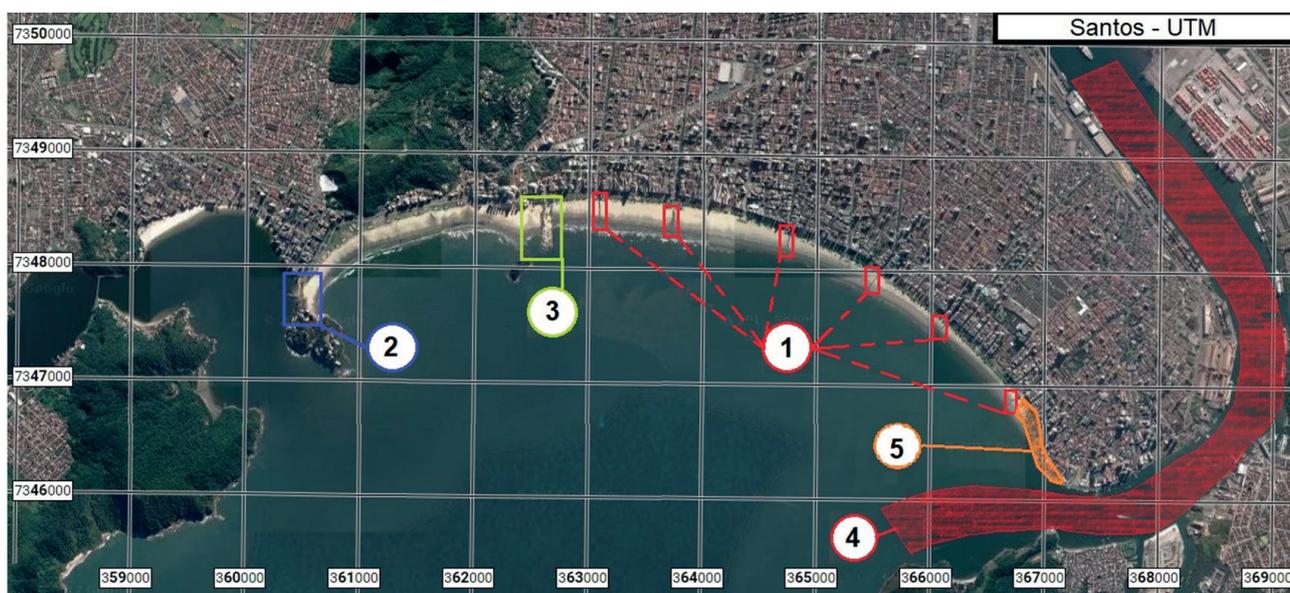


Figura 2: Localização das intervenções na região da Baixada Santista. 1: canais de drenagem conhecidos pelos números de 1 ao 6 (da esquerda para a direita); 2: tómbolo da Ilha Porchat; 3: enraizamento do Emissário Submarino; 4: canal de acesso ao Porto de Santos; 5: muros de praia, enrocamentos e muretas na região da “Ponta da Praia”. Fonte: Venancio (2018).

Figure 2: Interventions at Santos coastal region. 1: artificial pluvial drainage channels from 1 to 6 (from left to right); 2: Porchat Island tombolo; 3: emerged platform from Marine Outfall; 4: Santos’ Port Channel; 5: seawalls, rubble-mound revetments and short walls at “Ponta da Praia” region. Source: Venancio (2018).

As complexas alterações na dinâmica costeira e os consequentes problemas causados requerem estudos específicos para apontar causas e soluções eficientes para conter os avanços da erosão costeira (USACE, 1984). A região de Santos, por sua grande importância econômica e social no país, apresenta uma grande quantidade de estudos que tiveram por objetivo apontar os principais agentes causadores da erosão progressiva entre a Ponta da Praia até ao Canal 4 (região crítica) e medir ao longo dos últimos anos o recuo da linha de costa (Garcia *et al.*, 2018). Contudo, a complexa morfo-hidrodinâmica da região dificulta os estudos de obras e/ou ações definitivas para conter a erosão local.

As soluções convencionais usualmente adotadas para controle da erosão costeira, tais como muros e revestimentos de praia, esporões e quebramares emersos, além de exigirem grandes investimentos financeiros, causam grandes impactos nas áreas adjacentes, além de alterarem significativamente as características originais da praia protegida (Kim *et al.*, 2013; Oyegbile e Oyegbile, 2017). Das Neves *et al.* (2009) reforça que as intervenções tradicionais, chamadas de engenharia dura, ao invés de inibirem a ocupação humana nas áreas de risco têm efeito contrário, acentuando o problema de erosão costeira. Neste sentido, estruturas leves, submersas, e que utilizam materiais mais baratos e de fácil remoção como os geossintéticos, que vêm sendo adotados como uma alternativa para prevenção e controle dos processos erosivos nas praias (Oh e Shin, 2006).

Somado a isto, Garcia *et al.* (2018) aponta que a região em estudo apresenta uma grande complexidade morfo-hidrodinâmica e que a representação dos efeitos das ondas em águas rasas, em especial a difração e a reflexão, não se mostram fiéis à realidade local quando são utilizados modelos matemáticos consagrados. Os estudos apontaram diferenças significativas entre os resultados obtidos em modelo e os observados em campo. Neste sentido, a utilização apenas desta ferramenta não é suficiente para estudos de intervenções definitivas.

Com base nisso, a prefeitura de Santos procurou uma parceria junto da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – através de um Convênio de Cooperação de Pesquisa sem transmissão de recursos no qual se comprometeria a utilizar o recurso que dispunha, fruto de uma multa aplicada do Ministério Público ao Porto de Santos e que deveria ser utilizada para recuperação da região da ponta da praia. Com base no valor disponível pela prefeitura para compra do material empregado e execução da obra, foi projetada uma estrutura submersa composta de geotubos preenchidos com areia da própria praia e disposta à frente de um pequeno trecho da área erodida, entre a Ponta da Praia e o Canal 6, constituindo

um projeto piloto. Esta obra, além de melhorar, a curto prazo, as condições no trecho onde foi instalada, será monitorizada e contribuirá para avaliar o desempenho da estrutura projetada na retenção de areia para recomposição do perfil da praia e, conseqüentemente, na melhora da proteção daquele trecho de orla contra os efeitos das ressacas. Além disso permitirá ampliar os conhecimentos sobre os impactos nas áreas adjacentes e indicar intervenções definitivas para as demais regiões afetadas e/ou de interesse.

Neste artigo são apresentadas as principais premissas utilizadas no projeto, o dimensionamento da obra e as primeiras impressões após sua implantação, constituindo-se em um exemplo de solução de engenharia leve para recuperação de áreas costeiras erodidas, que pode ser generalizado para outras localidades. Complementarmente, soluções como esta apresentada, com utilização de geotubos em obras submersas, não possuem uma metodologia de dimensionamento consolidada na literatura, de forma que o método aqui proposto, contribui para o estado-da-arte, trazendo aspectos relevantes e de interesse para estudos de engenharia costeira.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Posicionamento da obra

Tendo em vista a complexa dinâmica hidro-sedimentológica da região, foi necessário estabelecer um levantamento topobatimétrico de referência e associá-lo a um datum vertical para servir de base para o projeto da estrutura. Levando-se em conta as datas mais recentes das campanhas de medição e a área de cobertura de interesse, optou-se por utilizar o levantamento batimétrico realizado em outubro de 2016, associado ao levantamento topográfico de abril de 2017, ambos realizados pela equipe da UNICAMP. Todas as cotas foram referenciadas ao Nível de Redução da Marinha do Brasil – NR.

A partir dos resultados obtidos a partir da modelação hidrodinâmica apresentada por Garcia *et al.* (2018), foi definido o eixo da obra (Figura 3), constituindo-se de dois segmentos lineares, sendo:

um segmento transversal enraizado junto ao muro de praia e avançando mar adentro por 275 m, com rumo de 280,15° em relação ao Norte Verdadeiro, em profundidades próximas de 3,5 m em relação ao Nível de Redução da Marinha na região – NR;

um segmento longitudinal concebido com 240 m de extensão e rumo de 347,53° em relação ao norte verdadeiro, praticamente acompanhando a isóbata de 3,5 m em relação ao NR.

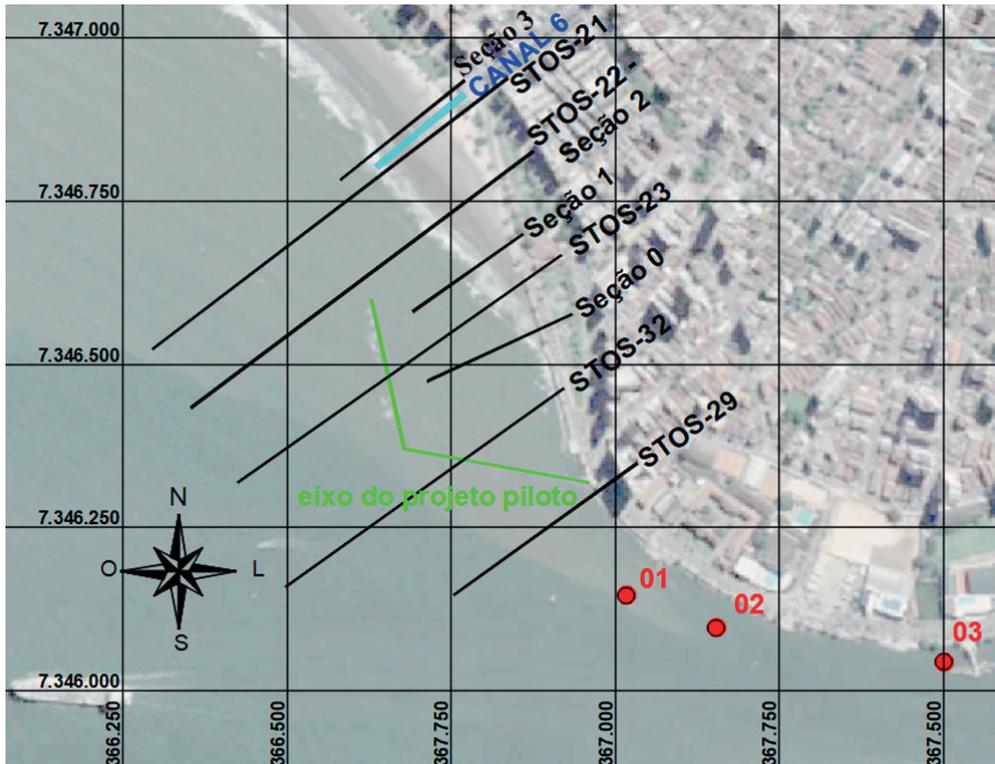


Figura 3. Posicionamento do eixo do projeto piloto, seções de levantamento topo-batimétrico e pontos de sondagem.

Figure 3. Pilot Project location, topographic and bathymetric survey profile and borehole points.

### 2.1.1 Segmento longitudinal

O segmento linear principal, aqui chamado de longitudinal, foi definido de forma a ficar paralelo à direção dos muros de proteção existentes na ponta da praia. Com isso espera-se que a refração das ondas que ocorrerá sobre a proteção proposta faça com que as ondas passem a atingir os muros com um ângulo próximo da ortogonal, diminuindo o transporte longitudinal costeiro resultante existente (Figura 4). Neste caso, a reflexão de ondas, que atualmente gera uma resultante longitudinal de corrente costeira em direção ao canal 6, conforme pode ser comprovado pela acumulação de sedimentos do lado esquerdo de quem olha para o mar junto às muretas do canal 6, (Figura 5) deverá ser praticamente eliminada.

Quanto à posição escolhida para a colocação da obra, optou-se por manter o segmento longitudinal da obra em uma região ainda estável do perfil praial, ou seja, em que as inclinações fossem baixas. Além disso, optou-se por uma distância da linha de costa que permitisse observar uma acreção na praia, capaz de minimizar os efeitos das ressacas no local, sem, contudo, verificar um avanço da praia sobre a obra piloto.

Quanto à cota de coroamento do trecho, optou-se por adotar as mesmas definições propostas por Oh e Shin

(2006) para uma obra em geotubos na cidade de Young-Jin (Coreia), em condições de nível d'água e agitação de ondas similares àquelas reinantes na Ponta da Praia em Santos. Oh e Shin (2006) afirmaram que, apesar de obterem em ensaios em modelo reduzido coeficientes de absorção de onda incidente melhores para cota de coroamento zero em comparação com a cota -0,5m, optaram por executar a obra em cotas inferiores (-1,0m) em função da questão estética e para evitar riscos à navegação. Além disso, após um ano de monitorização observaram resultados positivos em relação à eficiência da obra em reter os sedimentos entre ela e a linha de costa, recomendo a praia.

### 2.1.2 Segmento transversal

Apesar do objetivo principal da obra proposta ser a diminuição da energia da onda incidente e o realinhamento da frente das ondas em direção à costa, ambos função do eixo longitudinal da obra (paralelo à praia), os estudos em modelo hidrodinâmico (Garcia *et al.*, 2018) indicaram uma tendência, tanto em maré de enchente, quanto em certos momentos de maré de vazante, um direcionamento das correntes de maré em direção à embocadura do estuário santista, entre o eixo longitudinal da obra e a linha de costa. Esta condição não



Figura 4. Condição atual de reflexão de ondas na região da Ponta da Praia. Fonte: Garcia *et al.* (2018).

Figure 4. Current wave reflection at Ponta da Praia area. Source: Garcia *et al.* (2018).



Figura 5. Tendência resultante longitudinal de corrente costeira atual (adaptado de Google Earth, ©2015 Google apud Venancio, 2018).

Figure 5. Resultant direction of the present longshore current (adapted from Google Earth, ©2015 Google apud Venancio, 2018).

apenas reduziria a acumulação de sedimentos no tardoz da obra, pois o material seria arrastado pelas correntes em direção ao canal do Porto de Santos, como também induziria a formação de uma cava na região, podendo comprometer inclusive a estabilidade da obra. Neste sentido, optou-se por manter um trecho transversal. Contudo, este trecho começa emerso na praia e avança mar adentro submerso, acompanhando a inclinação do perfil e permitindo a circulação da corrente superficial, evitando assim a deterioração da qualidade da água e consequentemente da condição de banhar no tardoz da obra.

Por fim, em função dos riscos de vandalismo, foi sugerida a adoção de uma camada de blocos de enrocamento protegendo os primeiros 75 m da obra, que correspondem ao trecho em que ela afloraria em alguma condição de maré. O dimensionamento destes blocos de proteção foi elaborado levando-se em consideração as recomendações de USACE (1984). Como tal empregou-se a seguinte equação para o cálculo do peso médio dos blocos,

$$P = \frac{H^3 \cdot \gamma_s}{K_d \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_a} - 1\right) \cdot \cotg(\theta)} \quad (1)$$

Em que: P representa o peso de cada bloco (kN),  $\gamma_s$  o peso específico do material do bloco 26,50 kN/m<sup>3</sup> para o granito, H a altura da onda,  $\gamma_a$  o peso específico da água (10,25 kN/m<sup>3</sup>)  $\theta$  o ângulo, em graus, do talude em relação à horizontal, e  $K_d$  o coeficiente de estabilidade.

## 2.2 Dimensões e material empregado

Como se trata de um projeto piloto, atendendo à necessidade de impacto mínimo nas adjacências, o projeto foi concebido considerando as seguintes premissas: baixo impacto visual, baixo custo e fácil remoção em caso de não corresponder às expectativas. Sendo assim, optou-se por uma solução em geotubos, preenchidos com areia do trecho de praia mais a leste (entre os canais 2 e 3 - Figura 2), nos quais a prefeitura de Santos sistematicamente já fazia o desassoreamento dos canais de drenagem e lançava o material na região de estudo. Com isso, caso o projeto não fosse adequado e/ou causasse impactos negativos nas adjacências, facilmente os geotubos poderiam ser rasgados e retirados com auxílio de rebocadores e a areia seria redistribuída pelas ondas ao longo do perfil praiar, constituindo-se assim, uma alimentação artificial de praia. Quanto aos comprimentos adotados para os geotubos que compõem ambos os segmentos da obra, foram analisados:

- a disponibilidade do material no mercado nacional, atendendo à urgência na execução da obra para aproveitar o período de calmaria de ondas, típico de verão, que se aproximava;
- o peso próprio dos geotubos após o preenchimento suficiente para mantê-los estáveis face à ação das ondas;
- facilidade de manuseamento e disposição dos geotubos durante a instalação tendo em vista os equipamentos necessários para tal e técnicas a serem utilizadas no enchimento, com vista à redução dos custos finais de execução da obra, uma vez que os recursos que a prefeitura dispunha para execução da obra eram limitados.
- Em função da utilização dos geotubos expostos ao ambiente costeiro, sujeitos à incidência direta de raios solares e à abrasão devido à movimentação de areia frente à ação das ondas e correntes, visando a maior durabilidade do material, optou-se por uma solução em geocomposto de poliéster de alta tenacidade, alta capacidade filtrante e proteção UV, tal como recomendado por Bezuijen e Vastenburg (2013). Além disso, este tipo de composição dificulta que elementos como madeira, pregos e outros objetos cortantes ou perfurantes rompam o tecido. Por fim, a escolha do poliéster está relacionada com a estabilidade geométrica da obra, pois este material possui menor deformabilidade e fluência do que outros polímeros como, por exemplo, o polipropileno (Bezuijen e Vastenburg, 2013).

O cálculo da resistência à tração do tecido foi feito a partir do software GeoCoPS 3.0, considerando o elemento mais solicitado de cada trecho, e a aplicação de um fator de segurança de 4,95, em função dos efeitos não considerados no cálculo (variação da maré e ação direta das ondas).

Para garantir a estabilidade geotécnica e hidráulica da estrutura proposta, foram utilizados tapetes anti-socavação, uma vez que contribuem para distribuição da sobrecarga decorrente da instalação da estrutura sobre o solo local e possui capacidade de se deformar e proteger o pé da estrutura na ocorrência de socavação pela ação hidrodinâmica. O referido tapete acautela assim a erosão junto da estrutura que pode colocar em causa a sua estabilidade.

### 2.2.1 Definição da abertura mínima dos poros dos geotubos ( $O_{90}$ )

A definição da abertura mínima dos poros dos geotubos ( $O_{90}$ ) foi feita a partir da curva granulométrica dos sedimentos coletados no pós-praia (Figura 6), próximo

ao Canal 2, que foram definidos para preenchimento dos geotubos, utilizando-se o método descrito em Bezuijen e Vastenburg (2013). Este método estabelece o critério de retenção de areias pelo geotêxtil em função da solicitação dinâmica do fluxo de correntes hidráulicas e da ação hidráulica das ondas, tal como apresentado na Tabela 1.

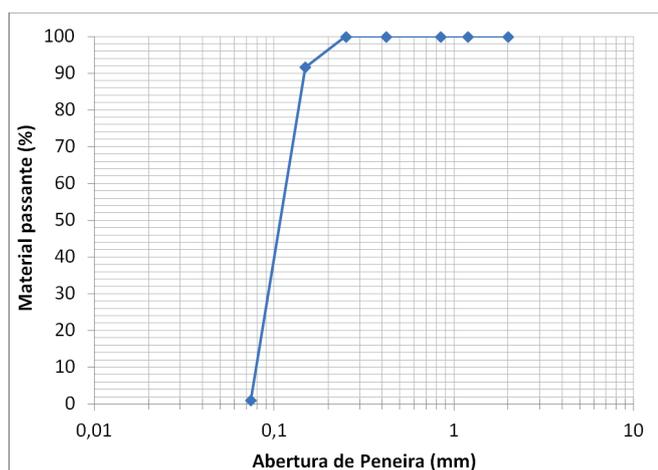


Figura 6. Análise Granulométrica dos sedimentos coletados no pós-praia junto ao canal 2 de Santos.

Figure 6. Granulometric curve of a beach sediment obtained from backshore zone, near to Channel 2 – Santos.

Tabela 2. Critério de retenção de areia pelo geotêxtil. (adaptado de Bezuijen e Vastenburg, 2013).

Table 2. Recommended design retention criteria for geometrically closed geotextiles. (adapted from Bezuijen e Vastenburg, 2013).

Areia (D > 60 µm)	
Solicitação dinâmica do fluxo de correntes hidráulicas	$O_{90} < 5 \cdot D_{10} \cdot C_u^{1/2}$ e $O_{90} < 2 \cdot D_{90}$
Ação hidráulica de ondas	$O_{90} < 1,5 \cdot D_{10} \cdot C_u^{1/2}$ e $O_{90} < D_{90}$
$O_{90}$ = Abertura aparente dos poros do material geotêxtil constituinte do tubo [mm] $D_{90}$ = Tamanho de peneira (abertura) onde passa 90 % do material da amostra [mm] $C_u$ = Coeficiente granulométrico de uniformidade ( $C_u = D_{60}/D_{10}$ ) $D_{60}$ = Tamanho de peneira (abertura) onde passa 60 % do material da amostra [mm] $D_{10}$ = Tamanho de peneira (abertura) onde passa 10 % do material da amostra [mm]	

### 2.2.2 Análise de estabilidade geotécnica

A análise da estabilidade geotécnica da obra foi avaliada com base no software Slide e na sondagem SP-01 apresentado em FUNDESPA (2015). O Ponto de Sondagem à Percussão utilizado é o mais próximo do local de implantação da obra que se obteve (ponto 01), conforme apresentado na Figura 3.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Posicionamento da obra

Na Figura 7 é apresentada a obra projetada, inserida na batimetria local, com a cota de coroamento a -0,5m DHN (relativo ao zero da Diretoria de Hidrografia e Navegação).

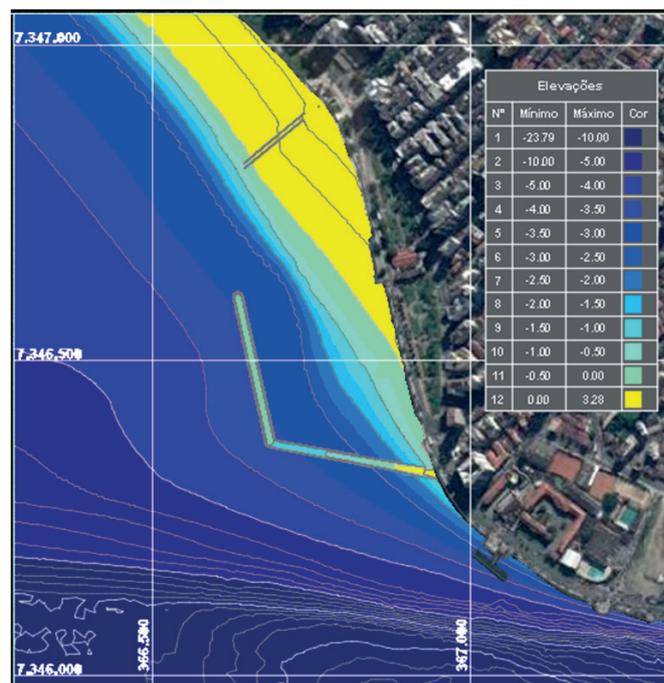


Figura 7. Posição definida para o projeto piloto inserida na batimetria local. Fonte: Garcia et al. (2018).

Figure 7. Final position of pilot project and the bathymetric survey in study area. Source: Garcia et al. (2018).

Para atender às cotas previstas no projeto, as facilidades na aquisição e execução no curto espaço de tempo em função da janela meteorológica favorável no período de verão onde as ondas são menos energéticas, foi feita uma consulta aos principais fabricantes de geotubos. Foram analisados que materiais estariam disponíveis para aquisição sem necessidade de importação, o que acarretaria tempo para a compra e não permitiria a execução da obra ainda no verão de 2017-2018. Os fabricantes apresentaram os materiais mais adequados para a obra em questão. Esta consulta, aliada ao cálculo de estabilidade estática realizado com o programa GeoCoPS permitiu várias das definições de material apresentadas na seção 3.2. Em especial, resultou na definição do máximo perímetro de geotubo de 12m e no comprimento de 20 m que seria suficiente para manter o elemento estável sob ação de ondas e correntes, já

que cada geotubo teria um peso submerso aproximado de  $1,10 \times 10^3 \text{ kN}$  (perímetro de 9 m) a  $1,70 \times 10^3 \text{ kN}$  (perímetro de 12 m), considerando um índice de vazios de 30%.

Realça-se que os níveis d'água representados nas Figuras dos cortes das seções da obra têm as seguintes definições:

- MLHW (Mean Lower High Water): média das preia-mares de quadratura;
- MHHW (Mean Higher High Water): média das preia-mares de sizígia;
- MSL (Mean Sea Level): nível médio do mar;
- MHLW (Mean High Low Water): média da baixa-mares de sizígia;
- MLLW (Mean Lower Low Water): média da baixa-mares de quadratura;
- NR (Nível de redução): média das maiores baixas-mares de sizígia. Representa o Zero da DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação.

### 3.1.1 Segmento longitudinal

Este segmento foi projetado contendo duas camadas de geotubos, a primeira, composta por duas linhas justapostas de geotubos de 20 m de comprimento e 9 m de perímetro cada, totalizando 24 geotubos (12 por linha), já a camada superior foi projetada com uma única linha composta por 12 geotubos de 20 m de comprimento e 12 m de perímetro. Na Figura 8 é apresentado um corte ao longo do eixo do segmento longitudinal da obra piloto proposta.

Esta configuração permite que a cota de coroamento

da estrutura alcance a cota -0,5m DHN, considerando a profundidade aproximada de instalação do trecho longitudinal (3,5m DHN), ficando, assim, nivelada conforme os critérios estabelecidos, mantendo a estabilidade dos geotubos (detalhado na secção 3.2) e maximizando a superfície de contato da obra com as ondas. Na Figura 9 é apresentada a seção transversal típica do segmento longitudinal da obra. Os elementos indicados com as letras de A a D são referentes aos materiais empregados que serão apresentados na secção 3.2.

### 3.1.2 Segmento transversal

Foram considerados geotubos de duas dimensões distintas para este eixo da obra: os primeiros 3, com 25 m de comprimento e perímetro de 9 m cada (trecho com a proteção de enrocamento), e, na sequência mais 10 geotubos, com 20 m de comprimento e perímetro de 12 m cada. Na Figura 10 é apresentado o corte ao longo do eixo do segmento transversal da obra piloto proposta. Já na Figura 11 e na Figura 12 são apresentadas as seções transversais típicas deste segmento da obra nos trechos emerso e submerso, respetivamente. Os elementos indicados com as letras de A a G são referentes aos materiais empregados que serão apresentados na secção 3.2.

Para a determinação do peso dos blocos de proteção do trecho inicial da obra a partir da Equação (1), proposta por USACE (1984), é necessário saber a altura de onda máxima sobre a estrutura, dado este não disponível pela falta de medições de campo próximas ao local aliado à dificuldade de modelações matemáticas calcularem adequadamente os valores irradiados de ondas medidas em locais mais profundos. Neste sentido, optou-se por empregar a maior altura de onda que quebraria sobre

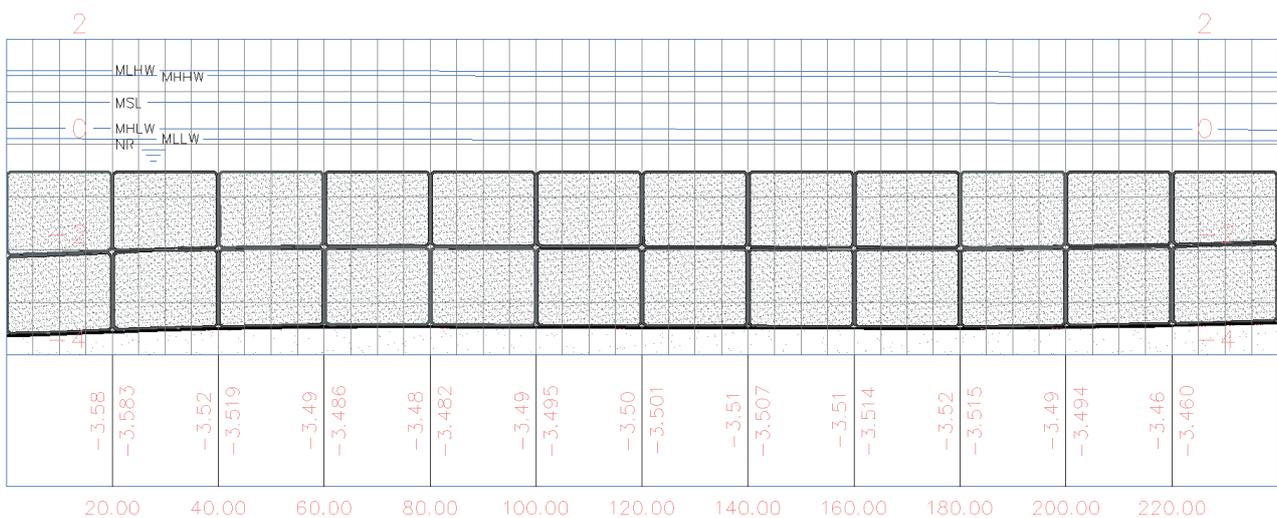


Figura 8. Corte ao longo do eixo do segmento longitudinal da obra piloto proposta.

Figure 8. Longitudinal section from center line of the longitudinal stretch of the pilot project.

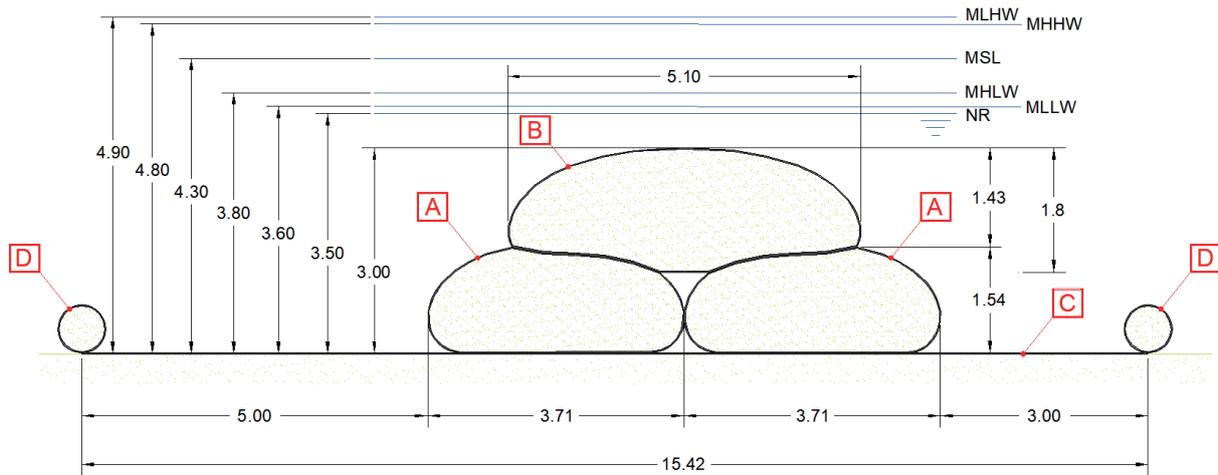


Figura 9. Seção transversal completa do segmento longitudinal da obra piloto.

Figure 9. Cross-section from center line of the longitudinal stretch of the pilot project.

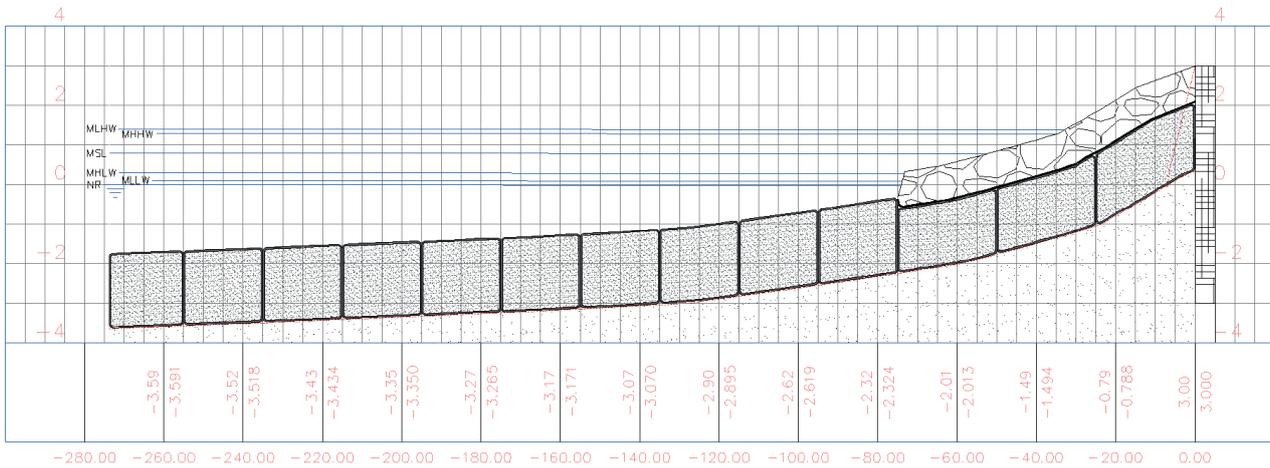


Figura 10. Corte ao longo do eixo do trecho transversal do projeto piloto proposto.

Figure 10. Longitudinal section from center line of the transversal stretch of the pilot project.

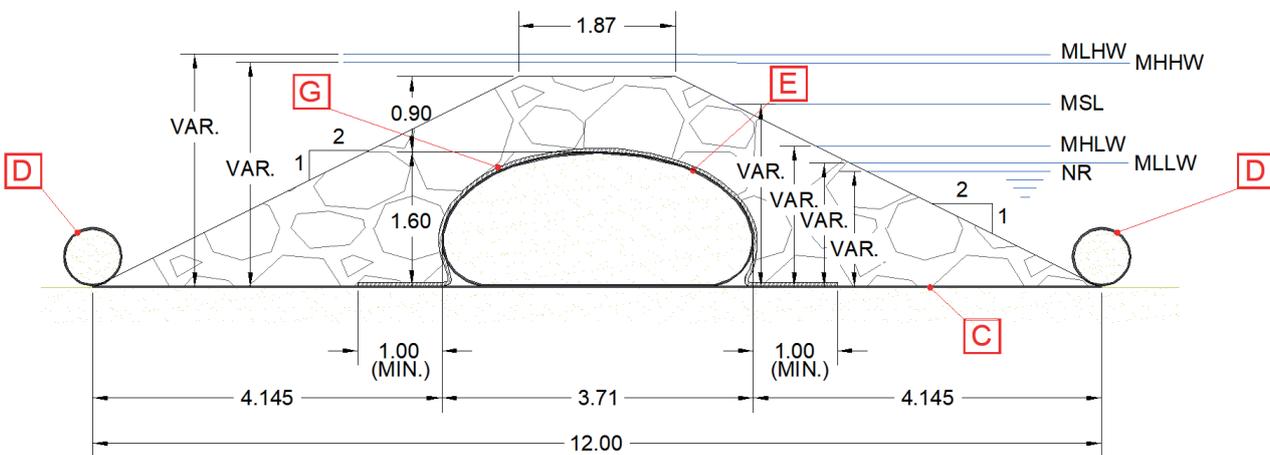


Figura 11. Seção transversal do segmento transversal da obra piloto em seu trecho emerso.

Figure 11. Cross-section from center line of the emerged transversal stretch of the pilot project.

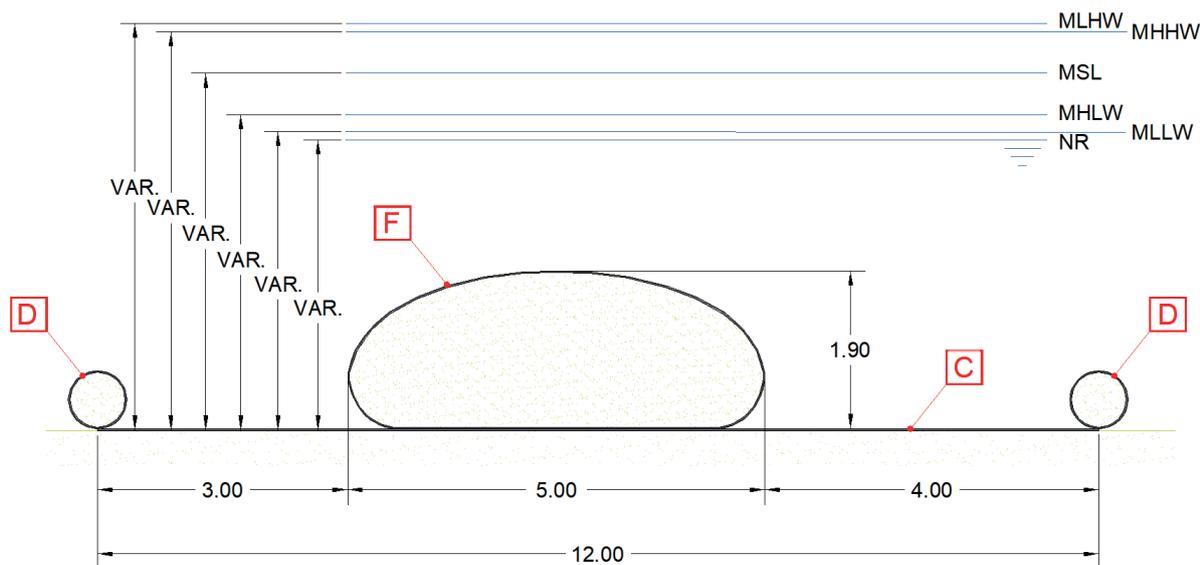


Figura 12. Seção transversal do segmento transversal da obra piloto em seu trecho submerso.

Figure 12. Cross-section from center line of the submerged transversal stretch of the pilot project.

o trecho da estrutura protegido por enrocamento (ver Figura 10), associada ao máximo nível de água local. Desta forma, qualquer onda superior a esta quebraria ainda sobre o perfil praiial, ou seja, reduziria sua energia antes de atingir este trecho da estrutura. A partir dessas premissas, a altura máxima de onda calculada foi de 2,0m. Os demais parâmetros necessários para o cálculo do peso dos blocos foram: o coeficiente de estabilidade  $K_d$  igual a 2,3 (tabelado USACE,1984 - considerando blocos naturais irregulares), a inclinação básica do talude de 1V:2H. Com base nestes valores obteve-se o peso médio dos blocos de  $1,16 \times 11,6$  kN.

Considerando que os blocos serão colocados apenas para proteção dos geotubos contra vandalismo, considera-se suficiente apenas uma camada de blocos devidamente encaixados e com diâmetro médio ( $d_{50}$ ) de 0,76m, correspondendo a 50% ou mais dos blocos da amostra. A variação do peso dos blocos deve ser de 70% a 125% do peso médio, ou seja, de 8,1 kN a 14,5 kN, e respectivamente, 0,67 m a 0,82 m de diâmetro.

### 3.2 Dimensões gerais

Na Tabela 2 são apresentados os detalhes de cada um dos elementos indicados por letras A a G nas seções transversais (Figura 9, Figura 11, Figura 12).

Com base no dimensionamento proposto por Bezuijen e Vastenburt (2013), o geotêxtil a ser empregado na confecção dos geotubos deve possuir uma abertura de poros máxima de 0,148 mm, impedindo que se desenvolvam processos erosivos de material particulado, frente à ação dinâmica das ondas que incidirão sobre as estruturas.

A resistência à tração mínima do tecido foi calculada a partir da simulação no programa GeoCoPS considerando o geotubo sujeito a condição estática crítica, ou seja, com o menor nível de água ao qual cada trecho da estrutura estivesse submetido. A ação de ondas não foi considerada nos cálculos por limitação da formulação do software. Para compensar a ausência dos efeitos da subpressão ocasionada pelas ondas, bem como considerar os danos ao tecido durante a instalação, esforço na costura dos geotubos, acomodação da superfície de apoio dos geotubos, a redução da resistência do tecido ao longo da vida útil da estrutura, foi adotado um fator de segurança mínimo de 4,95, fator este que é mais elevado do que o usualmente empregado em obras de geotubos em áreas não sujeitas a ação de ondas.

Tabela 3. Detalhes dos elementos indicados nas seções transversais.

Table 3. Cross-sections detailed elements.

Item	Elemento	Perímetro (m)	Comprimento (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Fator de Forma	Quantia	Volume de areia para enchimento dos geotubos (m <sup>3</sup> )
A	Geotubo tecido	9	20	5,0	0,460	24	2400
B	Geotubo tecido	12	20	7,8	0,374	12	1872
C	Tapete anti-socavação	15,42	20	-	-	12	-
		12	25	-	-	3	-
		12	20	-	-	10	-
D	Mini-bag tecido $\phi$ 0,7m	2, e	20 e	0,39 e	~1	44 e	339 e
		2,2	25	0,39		6	58
E	Geotubo tecido	9	25	5,0	0,460	3	325
F	Geotubo tecido	12	20	8,2	0,411	10	1640
G	Proteção não tecido	8	66	-	-	1	-
<b>Volume Total</b>							<b>6684</b>

No sentido longitudinal, a carga linear característica no tecido calculada foi de 13 kN/m, enquanto no sentido transversal foi de 17 kN/m. Desta forma, a mínima resistência à tração do tecido, já considerando o coeficiente de segurança, foi de 84 kN/m. Com base nos valores nominais empregados pelas principais fabricantes de geotubos, foi definida a resistência nominal mínima de 100 kN/m.

Sendo assim, as características do material utilizado para os geotubos estão apresentadas na Tabela 3. Já na Tabela 4 são apresentadas as características do constituinte dos tapetes anti-socavação.

Tabela 4. Características do material de confecção dos geotubos.

Table 4. Properties of textile used in geotextile tubes.

<b>Matéria Prima do Geocomposto</b>	
-Geotêxtil Tecido	Poliéster
-Geotêxtil Não Tecido	Poliéster
<b>Resistência à tração nominal mínima do tecido</b>	
-Direção longitudinal	100 kN/m
-Direção transversal	100 kN/m
<b>Deformação na resistência nominal</b>	
-Direção longitudinal	≤ 12,0 %
-Direção transversal	≤ 12,0 %
<b>Gramatura</b>	650 g/m <sup>2</sup>
<b>Permeabilidade do tecido à água</b>	≥ 10 l/m <sup>2</sup> /s
<b>Abertura dos poros - O<sub>90</sub></b>	≤ 148 μm

Tabela 5. Características do material de confecção do tapete anti-socavação.

Table 5. Properties of the anti-scouring mat

<b>Matéria Prima do Geocomposto</b>	
-Geotêxtil Tecido	Poliéster
-Geotêxtil Não Tecido	Poliéster
<b>Resistência à tração nominal mínima do tecido</b>	
-Direção longitudinal	300 kN/m
-Direção transversal	50 kN/m
<b>Deformação na resistência nominal</b>	
-Direção longitudinal	≤ 10,0 %
-Direção transversal	≤ 8,0 %
<b>Gramatura</b>	1.084 g/m <sup>2</sup>
Bolsa lateral $\Phi$ 0,7 m – Geotêxtil Tecido de PET ou PVA com distâncias entre bocais inferiores a 12,5m.	

Na Figura 13 é apresentado um resumo dos resultados do cálculo de estabilidade geotécnica aplicado à seção de maior solicitação, localizada no trecho longitudinal da obra piloto proposta.

Na tabela localizada no canto superior esquerdo da Figura 13 está inserida a resistência de projeto do material de reforço. Conforme já foi especificado, o tapete de anti-socavação foi definido de forma a contribuir para a estabilidade global da estrutura, e sendo assim, deve possuir uma resistência nominal de 300 kN/m. Já a tabela localizada à esquerda, mais abaixo apresenta as propriedades do solo de apoio, bem como do material de preenchimento da estrutura. Aqui foi considerado o modelo Mor-Coulomb para os solos arenosos e material de preenchimento e condições não drenadas para o solo mole.

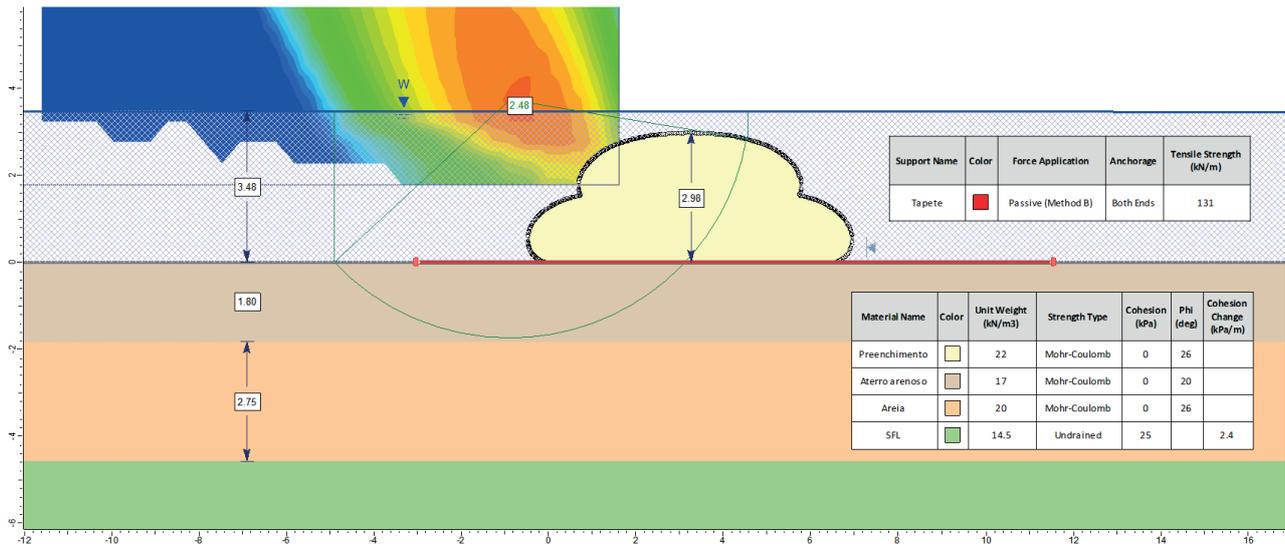


Figura 13. Saída do software Slide – Estabilidade geotécnica.

Figure 13. Output analysis software Slide – geotechnical stability

Realça-se que este modelo é uma simulação numérica da situação estática da estrutura na condição mais desfavorável, ou seja, com maior sobrecarga. Usualmente o fator de segurança (FS) adotado em aterros sobre solos moles é da ordem de 1.5. Contudo, em função da não inclusão dos efeitos dinâmicos das ondas e correntes no cálculo, considerou-se um incremento de 50% no FS mínimo, ou seja, 2,3. Note-se que o cálculo resultou em um FS global de 2,48, sendo, portanto superior ao limite mínimo considerado.

#### 4. DISCUSSÃO

A dificuldade de reprodução dos fenômenos de difração, reflexão e rebentação de ondas no modelo matemático utilizado para definição do posicionamento da obra foi o principal motivo para a proposta de uma solução piloto de dimensões reduzidas. A alternativa seria a construção de um modelo reduzido em escala adequada para reprodução dos fenômenos de deformação das ondas em águas rasas bem com das correntes induzidas pelas marés. No entanto, os custos deste modelo e o tempo para execução do mesmo inviabilizariam qualquer intervenção no local em um horizonte de curto prazo, visto que implicaria um tempo mínimo para construção, calibração, validação e estudo de obras de proteção da costa (1 a 3 anos no mínimo).

As premissas adotadas no projeto seguiram as recomendações de outros autores que propuseram obras similares e os resultados obtidos no dimensionamento mostraram coerência com os apresentados pelos mesmos autores, em especial Oh e Shin (2006).

A obra foi implantada entre janeiro e abril de 2018 seguindo as especificações apresentadas e já ocorreu acumulação de sedimentos na região de influência direta. Na Figura 14 é apresentada uma vista aérea da obra na qual se observa que a estrutura se mantém íntegra, mesmo após 10 meses que incluíram toda a temporada de ressacas de 2018.

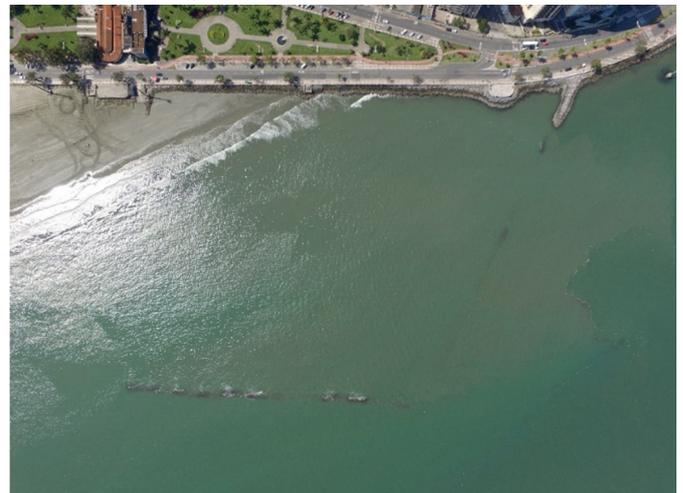


Figura 14. Foto aérea da obra após a implantação. Fonte: Prefeitura Municipal de Santos.

Figure 14. Pilot Project after the implantation of the construction. Source: Prefeitura Municipal de Santos..

A configuração das seções transversais propostas para os trechos longitudinal e transversal, bem como o comprimento adotado para cada geotubo, mostraram ser adequadas tanto para a execução quanto para a manutenção da obra até ao presente momento.

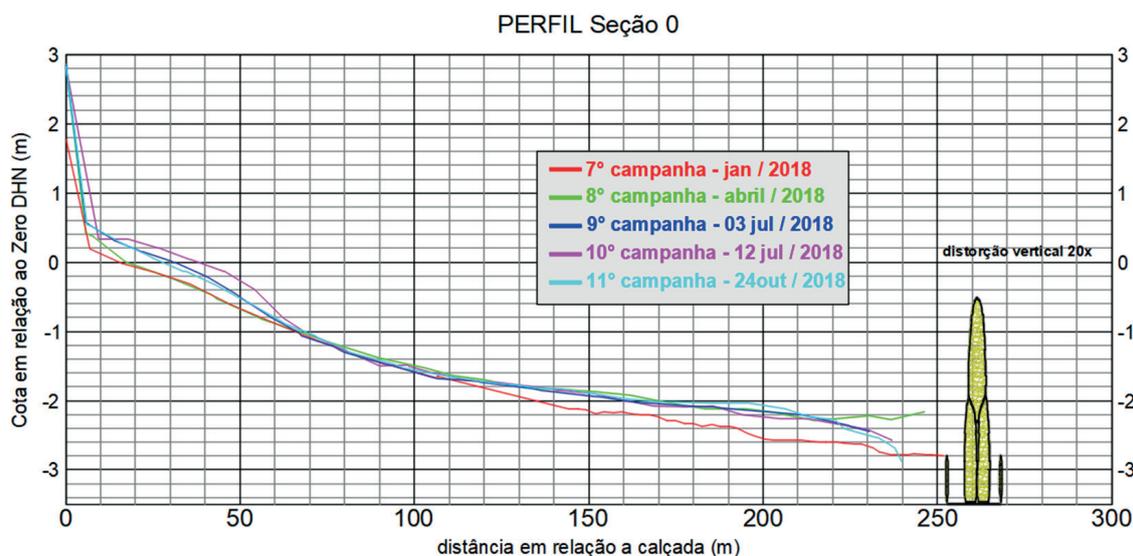


Figura 15. Perfil de praia – seção 0.

Figure 15. Beach profile – Section 0.

Quanto às dimensões da estrutura piloto, observou-se que foram capazes de produzir alterações mensuráveis no perfil praiial, cumprindo o objetivo da obra. Na Figura 15 é observada a seção 0 (vide Figura 3) como exemplo, na qual é nítida a mudança do perfil praiial.

Quanto ao material empregado, a abertura do tecido calculada em função da granulometria do material de enchimento dos geotubos, foi um dos maiores desafios no projeto visto que não havia referências sobre o uso de aberturas tão pequenas do tecido em obras offshore. Apesar disso, foi possível o enchimento dos geotubos sem comprometimento do tecido, e as inspeções visuais não apontam qualquer fuga de sedimentos. Já os fatores de segurança adotados nos cálculos de resistência e estabilidade dos geotubos, função entre outros fatores, da não consideração dos efeitos dinâmicos das ondas e correntes, também se mostraram adequados.

Por fim, a escolha por uma obra de engenharia leve, constituída de um quebramar submerso construído em geotubos foi a forma mais barata e simples de implementar o projeto piloto, visto que os seus impactos reduzidos dispensaram qualquer licença ambiental para a execução.

## 5. CONCLUSÕES

A dinâmica das praias na Baía de Santos sofreu grandes alterações nos últimos 50 anos, consequência de várias intervenções humanas aliadas à ocupação desordenada da linha de costa. A Ponta da Praia, por estar próxima da embocadura do Estuário Santista, na qual se localiza o Porto de Santos, tem um histórico de retração da linha de

costa acentuada, causando muitos prejuízos à Prefeitura, principalmente nos grandes eventos de ressaca. Diversos estudos realizados no local recorreram a modelações matemáticas e apontaram para um comportamento das ondas e transporte de sedimentos associados contrastantes aos efeitos observados no campo.

A adoção de obras piloto, de baixo impacto e custo constituem uma alternativa viável a curto prazo, sendo capaz de auxiliar tanto na monitorização do local quanto na diminuição dos prejuízos causados quando há invasão da água do mar junto à infraestrutura urbana existente no local, tal como avenidas, farol, passarelas, além de casas e comércios.

A obra projetada já foi implantada e, mesmo com um curto período de tempo de monitorização, demonstrou ser eficaz no acúmulo de sedimentos na região afetada por ela.

Além disso, a execução bem-sucedida da obra projetada evidenciou a adequação do método aqui proposto, em especial a adoção de uma abertura da trama do tecido do geotubo inferior àquelas empregadas em outros projetos offshore da literatura, constituindo-se em uma alternativa viável para futuros projetos desta natureza.

Com a contínua monitorização dos perfis e batimetria local espera-se obter uma acreção da praia, que por sua vez voltará a proteger a orla contra os efeitos das ressacas de maneira natural. Esta acreção deve ser mais rápida, quanto maior for o volume de sedimentos lançados pela prefeitura no trecho após a instalação da obra, volume este que ao invés de ser levado pelo transporte costeiro para fora do volume de controle, passará a ser, em sua maior parte, trapeado pela estrutura proposta.

O projeto piloto constituído com geotubos submersos é

em uma solução econômica e ambientalmente interessante em comparação com soluções convencionais. No caso específico da ponta da praia de Santos, permitirá, a partir de sua monitorização, preencher as lacunas de conhecimento em relação ao comportamento dos agentes hidrodinâmicos que vem provocando o intenso processo erosivo que tem sido verificado na região.

Desta forma, caso a resposta ambiental à introdução do projeto piloto proposto não seja favorável, a remoção da estrutura terá um custo mínimo e não causará qualquer impacto na região, uma vez que o material de enchimento dos geotubos apenas retornaria para o sistema costeiro. Ainda assim, os resultados obtidos desta análise permitiriam propor novas intervenções, com maior possibilidade de solucionar os problemas verificados na região.

Por outro lado, caso o ambiente responda conforme esperado, a obra construída poderá constituir uma solução definitiva para o trecho em que foi instalada, podendo ser replicada para os quase três quilômetros compreendidos entre a ponta da praia e o canal 4, cessando de maneira definitiva o recuo que a linha de costa vem sofrendo na região e, conseqüentemente, protegendo a orla e todos os equipamentos urbanos nela instalados da ação das ressacas, sem que para isso, o santista tenha que se conformar com uma mudança significativa na vista da baía, na característica da rebentação das ondas, ou nas condições de balneabilidade das praias de Santos.

## 6. AGRADECIMENTOS

À Prefeitura por meio da Secretaria de Desenvolvimento Urbano e da Secretaria de Meio Ambiente, que tornaram possível a implantação da obra.

## REFERÊNCIAS

Ângulo, R. J. (2004) - Aspectos Físicos das Dinâmicas de Ambientes Costeiros, seus usos e Conflitos. Desenvolvimento e Meio Ambiente, Editora UFPR, n. 10, p. 175-185.

Bezuijen, A.; Vastenburg, E.W. (2013) - Geosystems - Design Rules and Applications. Delft, Netherlands.

Nightingale L. (2017) - One hundred ports. Containerization International, Lloyd's List, p. 20-21. Disponível em: <<https://sdwrecruit.co.uk/wp-content/uploads/2017/10/Lloyds-List-Top-100-Ports-2017-Report.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2018.

Delta, Delta Economics e Finance (2014) - Especial: Maiores e Melhores Cidades do Brasil: Retrato Desigual. América Economia, p. 24. Disponível em: <<https://deltaefrankings.files.wordpress.com/2014/11/rae-ranking-de-cidades-20141.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas – FUNDESPA (2013) - Anexo 3 RDC – 120612: Análise Histórica dos Registros de Ressacas ocorridos na região da Baía e Estuário de Santos (jul. 2013). Santos: CODESP/FUNDESPA.

Fundação de Estudos e Pesquisas Aquáticas – FUNDESPA (2015) - Anexo 7-6 - Avaliação da Estabilidade do Talude do Canal de Navegação e Modelagem Morfodinâmica na Baía de Santos: Codesp/Fundespa.

Garcia, P.D.; Gireli, T.Z.; Venancio, K.K. (2018) - Projeto Piloto para Monitoramento e Contenção da Erosão da Ponta da Praia – Santos (SP). Proceedings XXVIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica (Buenos Aires, Argentina), v.4, pp. 2487- 2497, ISSN 978-978-45194-7-4.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2011) -Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil. Rio de Janeiro.

Italiani, D. M. (2014) - Resposta Morfodinâmica à Alimentação Artificial da Ponta da Praia, Santos, SP. Dissertação (Mestrado) – Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Kim, K.-H., Shin, S., Widayati, A.Y.W. (2013) - Mitigation Measures for Beach Erosion and Rip Current In: Conley,D.C., Masselink, G., Russell, P.E. and O'Hare, T.J. (eds.), Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 290-295, ISSN 0749-0208

Kuang, C.; He, L.; Gu, J.; Pan, Y.; Zhang, Y.; Yang, Y.; Qiu, R., and Zhang, J. (2014) - Effects of submerged breakwater on hydrodynamics and shoreline change of the East Beach of Beidaihe, Bohai Bay, China. Journal of Coastal Research (ISSN 0749-0208), 30(3), 598–614. Coconut Creek (Florida). Available on-line at <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00173.1>

das Neves, L.; Lopes, M. L.; Veloso-Gomes, F. and Taveira-Pinto, F. (2009) - Experimental Stability Analysis of Sand-filled Geotextile Containers for Dune Erosion Control. Journal of Coastal Research, SI 56 (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium), 487 - 490. Lisbon, Portugal, ISSN 0749-0208.

Muehe, D. (org) (2018) - Panorama da Erosão Costeira no Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Territorial. Brasília, Brasil.

Oh, Y.I. and Shin, E.C. (2006) - Using Submerged Geotextile Tubes in the Protection of the E. Korean shore. Coastal Engineering, v. 53, p 879-895.

Oyegbile B. O., Oyegbile B. A. (2017) - Applications of geosynthetic membranes in soil stabilization and coastal defence structures. International Journal of Sustainable Built Environment. Volume 6, Issue 2, Pages 636-662.

U.S. Army Corps of Engineers - USACE-(1984) - Shore Protection Manual. 4th ed, Coastal Engineering. United States Dept. of the Army, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, 10.5962/bhl.title.47830.

Venancio, K. K. (2018).Evolução Hidromorfodinâmica da Região da Ponta da Praia em Santos (SP) no Período entre 2009 e 2017. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Voorde, M. ten.; Antunes do Carmo, J.S., Neves, M.G. (2009) - Designing a Preliminary Multifunctional Artificial Reef to Protect the Portuguese Coast. Journal of Coastal Research (ISSN 0749-0208), 25(1), 69–79. West Palm Beach (Florida). Available on-line at <http://www.jcronline.org/doi/abs/10.2112/07-0827.1>