

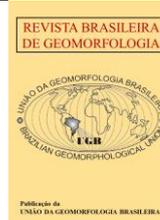


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 25, n° 3 (2024)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v25i3.2483>



Artigo de Pesquisa

Transporte de matacões e blocos por ondas no litoral brasileiro: desafio para a engenharia, realidade para a geomorfologia

Transport of large boulders by waves in the Brazilian coast: challenge for the engineering, reality for the geomorphology

Antonio Paulo Faria ¹

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Rio de Janeiro, Brasil.

antoniofaria.geo@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7481-2878>

Recebido: 02/10/2023; Aceito: 23/07/2024; Publicado: 18/08/2024

Resumo: No Brasil foram construídos aproximadamente 300 km de enrocamentos para proteger o litoral das ondas de tempestades marinhas, conforme mensurações realizadas neste trabalho. Nas costas expostas e semiexpostas os enrocamentos de aterro, guia-correntes e quebra-mares estão passando por metamorfoses devido à ação das ondas, e alguns estão sendo destruídos. Isso foi provado porque algumas dessas estruturas de engenharia apresentam formas de cuspide produzidas pelo transporte de matacões e blocos pelas ondas. A maioria dos enrocamentos não tem cúspides, mas o transporte dos fragmentos de rocha é intenso e os processos de arredondamento estão fragilizando essas estruturas. Alguns estão se transformando em praias de matacões. Nos enrocamentos da Marina da Glória e do aeroporto Santos Dumont, situados em compartimento semiexposto da Baía de Guanabara, ondas acima de 2 m de altura transportaram blocos de até 3650 kg por 10 m de distância, até o topo dos enrocamentos situados entre 3 e 5 m acima do nível do mar. Matacões grandes pesando aproximadamente 1000 kg foram carregados por 60 m. Nos litorais expostos a taxa de transporte é maior por receberem ondas mais altas e com maior frequência. Entre agosto de 2016 e setembro de 2023 foram geradas 96 tempestades que produziram ondas com altura máxima (Hmax) entre 4 e 8 m no Rio de Janeiro, registradas pelas boias do sistema SiMCosta. No guia-corrente de Saquarema (RJ) blocos de até 5400 kg foram depositados a 3 m de altura e a 23 m de distância da água. As mensurações foram feitas com metodologia inédita que consiste em mapear matacões e blocos com incrustações de cracas e ostras, que se encontram acima da linha máxima de maré. Foi feito também o monitoramento da movimentação dos fragmentos de rocha com fotografias temporais tiradas de um mesmo ponto e mesmo ângulo. Os resultados podem dar subsídios para os projetos de engenharia costeira e ajudam a geomorfologia e a geologia a entender melhor a dinâmica das praias de matacões e praias de blocos da costa rochosa brasileira

Palavras-chave: Transporte de matacões por ondas; Ondas de tempestades; Enrocamento litorâneo; Praia de matacões; Geomorfologia costeira; Engenharia oceânica.

Abstract: Were built approximately 300 km of breakwater in Brazil to protect the littoral from the storm waves, according to the measurements made in this work. On the exposed and semi-exposed coast, breakwaters and groynes are going through metamorphosis due to the waves' impact on the structures, and some of them were destroyed. It was proved because some of those structures present cuspid shaped by the storm waves transporting large boulders. The majority of the breakwaters don't have cuspid, however, the rock fragments transportation is intense, and the processes to change the boulders shape,

from angular to rounded, are weakening the structures. Some are changing into boulder beaches. In the breakwaters of Marina da Gloria and Santos Dumont Airport, situated in the Guanabara Bay, waves over 2 m in height can occasionally transport boulders as heavy as 3650 kg in a distance of 10 m, to the top of the breakwater 4 m above the sea level. Large boulders close to 1000 kg were carried for 60 m. On the exposed coast, the transportation rate is higher because the waves are bigger, and their frequency is higher as well. In the period 2016-2023 there were produced 96 storms that generated waves (H_{max}) from 4 to 8 m in height, registered by buoys of the SiMCoast system. In the Saquarema breakwater, boulders weighing up to 5400 kg were deposited 3 m high and 23 m from the shore by waves from 4 to 7 m in height. Boulders with barnacle and oyster encrustation lied above the maximum high tide level were used as methodology to measure the transportation. The rock fragments movements were also monitored with photos taken from the same spot at the same angles at different times. The results can be used to improve coastal engineering projects, and to better understand the dynamics of boulder beach on the Brazilian coast.

Keywords: boulders transported by waves; storm waves; coastal breakwater; boulder beach; coastal geomorphology; marine engineering.

1. Introdução

Se as ondas oceânicas criam praias de matacões e praias de blocos no litoral brasileiro, de acordo com Faria (2022a), igualmente elas têm competência para alterar ou até mesmo destruir quebra-mares e guia-correntes. Com base nesse contexto, esta pesquisa de campo estudou nos enrocamentos processos de transporte por ondas de matacões e blocos rochosos pesando algumas toneladas. Foram desenvolvidas metodologias para calcular a taxa de transporte que podem ser aplicadas também nos depósitos naturais, como nas praias rochosas e campos marinhos de blocos.

Existem no Brasil centenas de quilômetros lineares de enrocamento, e essas estruturas estão expostas a hidrodinâmicas complexas que produzem respostas geomorfológicas diversas e que causam desgastes. E, por isso, existem normas técnicas que sugerem matacões e blocos de rocha com peso e morfometria adequados. No entanto, muitos enrocamentos em litorais expostos e semiexpostos foram feitos com fragmentos de rocha menores que os tamanhos sugeridos, e com morfometrias inadequadas. Isso diminuiu a vida útil dessas estruturas e algumas obras sofreram colapsos, inclusive se transformando em praias de matacões.

Os enrocamentos recebem nomes diferentes de autores diversos e são usados em três aplicações distintas, de acordo com o US Army Corps of Engineers (1984), Alfredini e Arasaki (2009) e Khampuis (2020):

1. Servem para dar suporte aos aterros costeiros e evitar a erosão promovida pelas ondas; estancar a erosão nas praias instáveis;
2. São construídos paralelos ao litoral para bloquear ondas marinhas e criar zonas de águas calmas para marinas e portos e para proteger áreas urbanizadas. São conhecidos também como quebra-mar ou molhe;
3. São construídos como espigões perpendiculares ao litoral para bloquear as correntes litorâneas longitudinais e coibir a erosão nas praias. Objetiva também evitar o fechamento da foz dos canais fluviais e dos canais das lagoas pela sedimentação marinha, e nesses casos são conhecidos como guia-corrente, ou genericamente como molhe.

Bagnold (1939) e Carobene (2015) estimam que a pressão do impacto das ondas de tempestade em uma parede rochosa fica entre 15 e 30 t/m²; todavia, entre blocos rochosos a situação é diferente por causa da compressão da água quando entra nos macroporos afunilados. A energia concentrada desses fluxos move matacões e blocos, de acordo com Faria (2018). Para minimizar desgastes nos enrocamentos litorâneos situados em regiões com ondas acima de 2 m de altura, o US Army Corps of Engineers (1984) aconselha usar blocos de rocha angulares e muito angulares com peso específico de 2,65 t/m³. Isso equivale à densidade aproximada dos gnaisse e granitos (entre 2,65 e 2,75 t/m³), comuns na costa rochosa brasileira, enquanto a densidade do basalto é de 2,79 t/m³, segundo Gill (2014). Os fragmentos de rocha muito angulares proporcionam melhores encaixe e ancoragem, dificultando a movimentação desses clastos. Os deslocamentos desses fragmentos de rocha ao longo dos anos os tornam arredondados e isso cria instabilidade nas estruturas.

Em ambientes costeiros naturais já foram feitos diversos trabalhos sobre transporte de matacões e blocos por ondas. Em estudo realizado no Mar da Arábia, Khan et al. (2022) consideraram que para transportar matacões de 1100 kg são necessárias ondas acima de 2,5 m de altura. Naylor e Stepherson (2016) estudaram a dinâmica de

transporte de matacões e blocos em uma praia no sudoeste da Inglaterra, antes e depois da passagem de uma tempestade que gerou ondas com altura superior a 5 m. Esses autores perceberam que matacões de 300 kg foram transportados por distâncias de até 200 m. Cox et al. (2018) e Cox e Oboyle (2019), no Norte da Irlanda, calcularam que ondas entre 5 e 10 m de altura transportaram por dezenas de metros fragmentos de rocha de até 612.000 kg. Faria (2022a) documentou que ondas entre 5 e 10 m de altura transportaram blocos de 100.000 a 230.000 kg na Ponta da Palhoça (SC). No Rio de Janeiro esse autor registrou que ondas de até 3 m de altura arremessaram matacões com mais de 800 kg a 1,5 m de altura. Segundo Nott (2003), são diversas variáveis envolvidas nesse processo, sendo as principais: tamanho e forma dos fragmentos de rocha, inclinação e rugosidade do fundo marinho, altura e velocidade da onda na arrebentação. Nandasena et al. (2011) explicam que diversos autores tentaram, sem sucesso, desenvolver equações para definir a altura mínima da onda e a velocidade mínima do fluxo de água para iniciar o transporte de matacões, que possam ser aplicadas a todas as áreas litorâneas. Por isso, trabalhos empíricos ainda são importantes, porque cada local responde de forma diferente.

2. Materiais e Métodos

Foi calculada a extensão total dos enrocamentos litorâneos no Brasil, em quilômetro linear por estado, usando imagens Google Earth, replicando técnica usada por Faria (2024). Os trabalhos de monitoramento e mensuração dos processos de transporte de matacões e blocos foram realizados em nove áreas testes, situadas em áreas protegidas, semiprotégidas, semiexpostas e expostas às ondas de tempestades no estado do Rio de Janeiro, de acordo com classificações de Blamey e Branch (2009) e Lins-de-Barros et al. (2018). Foram considerados três tipos de enrocamentos: quebra-mar, guia-corrente e enrocamento de contenção de aterro, de acordo com Alfredini e Arasaki (2009). Neste trabalho é sugerido um quarto tipo, “enrocamento de rejeito”. Os resultados obtidos foram posteriormente aplicados para diagnosticar experimentalmente a situação de alguns dos grandes enrocamentos das regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil. (Figura 1 e Tabela 1).

Para analisar o comportamento hidrodinâmico das áreas de estudo, foram utilizados dados de ondas das boias do sistema SiMCosta entre julho de 2016 e setembro de 2023. A boia RJ3 tem base em profundidade de 17 m, instalada em frente ao Forte de Copacabana (22° 58' 59" - 43° 10' 28"). A RJ4 tem base a 18 m e foi instalada em frente à Ilha de Cotunduba, na entrada da Baía de Guanabara (22° 58' 18" - 43° 09' 01"). Foram usados dados de altura máxima das ondas (Hmax) para cada 30 minutos para tempestades que produziram ondas com altura a partir de 3 m, mas que geraram ondas significativas (Hs) acima de 4 m. Ou seja, ondas com energia para realizar o transporte de matacões e blocos, segundo Khan et al. (2022). De acordo com os dados do SiMCosta, ondas com altura entre 3 e 7 m tem período médio de 12 segundos. Com isso foi possível calcular o número total de ondas para cada tempestade, dividindo o tempo de duração do evento (em segundos) pelo período médio das ondas, que é de 12 segundos. Para os objetivos deste trabalho, o tempo de duração das tempestades inicia quando as ondas atingem altura de 3 m e termina quando diminuem para abaixo deste nível. Este tipo de análise é uma adaptação de outras formas, como as trabalhadas por Bulhões et al. (2016) e Eguchi e Klumb-Oliveira (2023), que consideram 5% dos valores mais altos de Hmax.

De acordo com Cox et al. (2018) e Khan et al. (2022), para análise do fluxo de energia em uma onda individual, considera-se a energia total (cinética e potencial) por unidade de área. Assim, de forma simplificada, pode-se representar o fluxo de energia (P) através da equação 1:

$$P = (H_s)^2 \times T_p / 2 \quad kW/m \quad (1)$$

Onde P é a potência média por metro de frente de onda, Hs é a altura significativa das ondas e Tp é o período de pico das ondas.

A granulometria utilizada neste trabalho é uma combinação adaptada de propostas de classificação de Shepard (1967), Gordon e Finlayson (1996) e Blair e McPherson (1999) que considera os diâmetros: areia (0,06 – 2 mm); grânulo ou cascalho (2 – 4 mm); seixo (4 – 60 mm), calhau (60 – 200 mm), matacão pequeno (200 – 400 mm), matacão médio (400 – 600 mm), matacão grande (600 – 1000 mm) e bloco (≥ 1000 mm). O peso foi estimado multiplicando o volume pela densidade da rocha, segundo tabela de Gill (2014). Quanto às formas, foi adotada a classificação de arredondamento descritiva de Shepard (1967): muito angular, angular, subangular,

subarredondada, arredondada e bem arredondada. Para mensurar a granulometria e descrever as formas geométricas dos fragmentos de rocha, foi aplicado o sistema de grade, conforme sugerido por Gordon e Finlayson (1996).

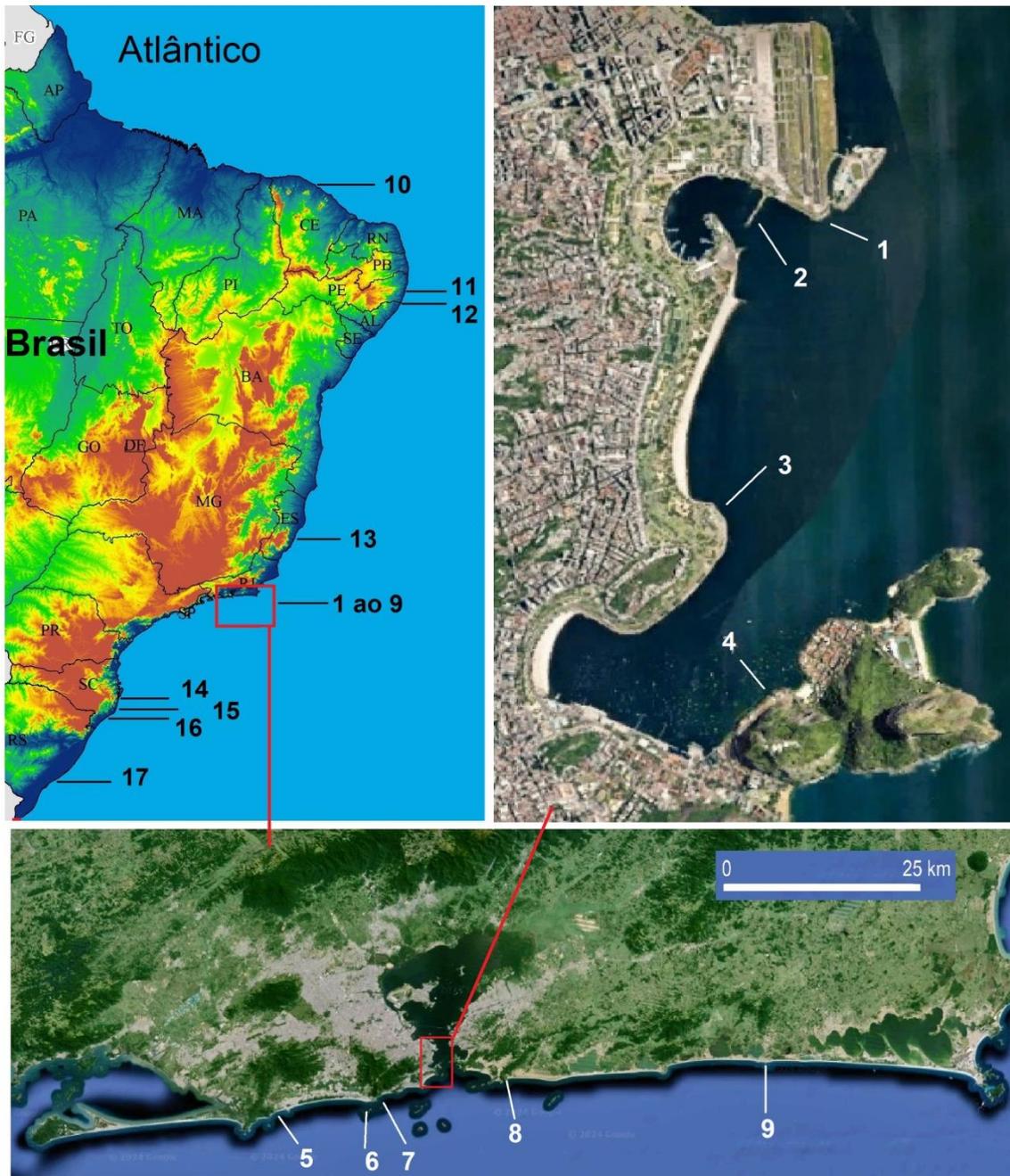


Figura 1. Mapa de localização dos enrocamentos. De 1 a 4 estão situados os que foram monitorados em áreas protegidas, semiprotetidas e semiexpostas às ondas de tempestades dentro da Baía de Guanabara: 1 Aeroporto Santos Dumont, 2 Marina da Glória, 3 Aterro do Flamengo e 4 Aterro da Urca. De 5 a 9 localizam-se os enrocamentos monitorados em litoral exposto no estado do Rio de Janeiro: 5 Praia da Macumba, 6 Barra da Tijuca, 7 Joá, 8 Itaipuaçu e 9 Itaúna. Os resultados dos estudos foram aplicados nos enrocamentos: 10 Jacaraquenga (CE), 11 Olinda (PE), 12 Recife (PE), 13 Ubu (ES), 14 Itajaí (SC), 15 Imbituba (SC), 16 Laguna (SC) e 17 Lagoa dos Patos (RS). Imagens: IBGE e Google Earth.

2.1. Transporte de matacões e blocos nos enrocamentos

Para medir o transporte de fragmentos de rocha pelas ondas e correntes nos enrocamentos, foram feitas comparações temporais entre fotografias tiradas de um mesmo ponto e mesmo ângulo. Esse tipo de metodologia foi usado por Naylor e Stepherson (2016) e Cox et al. (2018).

Linhas formadas por cracas e ostras têm sido usadas como biomarcadores para estudar mudanças no nível do mar, conforme estudos de Faria (2020), porque esses crustáceos e moluscos vivem na faixa de oscilação de maré. Baseado nessa condição, os matacões e blocos com incrustações desses seres que estão em posições acima da linha de maré alta de sizígia podem ter sido transportados. Essa ideia foi testada neste trabalho e é, portanto, inédita.

As cracas (*Balanus*) e as ostras (*Crassostrea rhizophorae* e *Crassostrea cucullata*) habitam duas faixas distintas: a primeira é formada pelas cracas e na segunda, abaixo, estão as ostras. Segundo Oliveira (1947) e Faria (2020), na Baía de Guanabara as cracas tem como limite superior a cota 110 cm acima da maré “zero” local, o limite inferior é a cota 90 cm. O limite para as ostras fica abaixo da cota 90 cm. De acordo com Kaye (1964), esses limites se formam porque esses crustáceos morrem se ficarem mais de seis dias fora da água, e os moluscos morrem se ficarem mais de cinco dias emersos. Essas linhas são conhecidas como “limite letal”. A cota “zero” foi nivelada pelas marés baixas de sizígia mais frequentes no local, definidas pela estação maregráfica da Ilha Fiscal, da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. A maré mais alta de sizígia nesse compartimento chega a 130 cm. Foram elaborados mapas com a localização dos clastos com cracas e ostras. As posições foram obtidas com GPS e, para a calibragem de campo, foram usadas trenas.

2.2. Alterações nas estruturas dos enrocamentos

Algumas características encontradas nos depósitos de praia e fluvial que indicam mobilização de sedimentos, foram procuradas nos enrocamentos, na tentativa de diagnosticar processos de transporte de matacões e blocos. Assim, foram procuradas estruturas de cúspide e matacões imbricados.

Foram feitos transectos transversais para estudar mudanças nos ângulos das faces dos enrocamentos devido aos impactos das ondas e ação dos fluxos de água arremessados por elas. As mensurações foram feitas com clinômetro. Nesses mesmos perfis foram feitas medições de granulometria para analisar o selecionamento pelo transporte, conforme exposto por Cox et al. (2018). Em relação à batimetria, nas áreas que não contam com carta náutica detalhada, a profundidade da base dos enrocamentos foi medida com o uso de trena com peso na extremidade e apoio de caiaque.

Tabela 1. Tipos de mensurações realizadas nos enrocamentos

Localização e tipo de mensuração	Tipo de enrocamento	Exposição
1 Aeroporto Santos Dumont ^{1,4}	Enrocamento de aterro	Semiexposta: SE
2 Marina da Glória ^{1,2,3 e 5}	Quebra-mar (molhe)	Semiexposta: SE
3 Flamengo ⁵	Enrocamento de aterro	Semiprotégida: SE
4 Urca ^{1 e 5}	Enrocamento de aterro	Protégida das tempestades
5 Praia da Macumba ^{1,2,3 e 5}	Guia-corrente	Exposta: SW, S, SE
6 Praia da Barra da Tijuca ⁵	Guia-corrente (molhe)	Exposta: SW, S
7 Joá ⁵	Enrocamento de rejeito	Exposta: S, SE
8 Praia de Itaipuaçu ⁵	Guia-corrente	Exposta: S, SE
9 Praia de Itaúna ^{1,2,3 e 5}	Guia-corrente	Exposta: SW, S, SE

¹ Mensuração de transporte de clastos com incrustação de cracas e ostras.

² Mapeamento de clastos com incrustação de cracas e ostras.

³ Monitoramento transporte de clastos.

⁴ Diagnóstico de transporte de clastos pela presença de estruturas de cúspide.

⁵ Mensuração das alterações morfológicas dos clastos e da estrutura do enrocamento

3. Resultados

3.1 Extensão dos enrocamentos litorâneos no Brasil e definição de enrocamento de rejeito

De acordo com as mensurações realizadas nas imagens Google Earth, calculou-se que o Brasil conta com aproximadamente 300 km lineares de enrocamentos litorâneos dos tipos: quebra-mar, guia-corrente e enrocamento de contenção de solo e aterro. Esse comprimento é equivalente à extensão da costa da Holanda ou da Polônia. Os estados brasileiros que contam com as maiores extensões com essas estruturas são: Rio de Janeiro (82 km), Santa Catarina (63 km), Pernambuco (39 km), Ceará (31 km), Espírito Santo (20 km), Rio Grande do Sul (12 km), Sergipe (8 km) e São Paulo (6 km). Alagoas, Bahia, Maranhão, Paraíba, Paraná e Rio Grande do Norte também apresentam enrocamentos litorâneos, mas com extensões mais modestas, cada um com menos de 5 km.

Em relação às cidades, Rio de Janeiro e Niterói contam, juntas, com 26 km de enrocamentos. Recife e Olinda também têm 26 km e Fortaleza tem 18 km. Essas estruturas são comuns nos portos, e as mais extensas estão no complexo portuário de Rio Grande (RS) com 11 km; no Porto de Vitória (ES) com 8 km; e no Porto de Recife (PE) com 7 km. Esses enrocamentos são formados por matacões e blocos de paragnaisse, ortognaisse, granito, sienito, gabro, pegmatito, diabásio e basalto. A maioria conta com uma mistura de algumas dessas rochas.

A classe enrocamento de rejeito, sugerida neste trabalho, não tem necessariamente a função de proteger o litoral; essas estruturas surgiram em áreas de descarte de fragmentos de rocha e de entulhos dos cortes do relevo para construção de ruas, rodovias e edifícios. Parte do material extraído é jogada à jusante das encostas litorâneas. Em certos lugares formaram-se depósitos totalmente artificiais, mas, em outros, os fragmentos de rocha foram misturados aos campos marinhos de blocos e às praias de matacões. Nos enrocamentos planejados que seguem normas técnicas, a granulometria é formada por matacões grandes e blocos. Nos enrocamentos de rejeito, a granulometria é bastante variada, inclusive com material pedogenético (argila, silte e areia), que posteriormente é removido pela ação das ondas (Figura 2).

Esses depósitos ocorrem em certos trechos de litoral com morros e montanhas dos estados do Rio de Janeiro, São Paulo e Santa Catarina. A extensão total não foi mensurada devido às dificuldades de observação nas imagens Google Earth; todavia, eles cobrem áreas consideráveis. Somente o município do Rio de Janeiro tem 1,7 km com esse tipo de enrocamento.



Figura 2. Enrocamento de rejeito formado durante a construção do Elevado do Joá e abertura de quatro túneis. Matacões e blocos de granito e gnaisse foram jogados e se misturaram aos clastos que formavam os depósitos naturais. A) Os fragmentos situados fora da zona de ação das ondas permaneceram com as formas subangular, angular e muito angular por cinco décadas. B) Os fragmentos que estão na zona de influência das ondas tiveram suas formas metamorfoseadas para arredondada e muito arredondada. O espriamento e selecionamento dos clastos transformou essa faixa em praia de matacões. Fotos do autor.

3.2. Dinâmica das ondas de tempestades na área de estudo

Quando a frequência das ondas massivas é alta, os macroporos dos depósitos de fragmentos de rocha podem ficar saturados aumentando a pressão interna durante os impactos, segundo Carobene (2015). No caso dos enrocamentos, isso pode facilitar a mobilização e transporte dos matacões e blocos. Assim, foram analisados dados de altura máxima (H_{max}) das ondas, tempo de duração das tempestades e o número total de ondas por tempestade, tendo como base a altura mínima de 3 m. Entretanto, foram consideradas apenas as tempestades que produziram ondas com altura máxima superior a 4,00 m. As alturas das ondas foram fornecidas pelas boias RJ3 e RJ4 do sistema SiMCosta. Em algumas situações esses dados foram comparados com as informações de altura de ondas na zona de arrebentação, ou altura da face da onda ao quebrar. Para análise do fluxo de energia na frente de ondas individuais, considerando períodos entre 8 e 12 segundos, foi calculado para ondas de 3 m de altura energia entre 36 e 54 kW/m; para ondas de 4 m ficou entre 64 e 96 kW/m; ondas de 5 m ficou entre 100 e 150 kW/m, para ondas de 6 m entre 144 e 216; e ondas de 7 m, 196 e 294 kW/m.

3.2.1. Litoral exposto

Os enrocamentos da Praia da Macumba, Barra da Tijuca, Joá, Praia de Itaipuaçu e Praia de Itaúna situam-se em litoral exposto às ondas de tempestades. Entre julho de 2016 e setembro de 2023, foram geradas 74 tempestades que produziram ondas H_{max} entre 4 e 5 m; 15 tempestades com ondas entre 5 e 6 m; 5 tempestades com ondas entre 6 e 7 m; e 3 tempestades com ondas entre 7 e 8 m. O total para o período foi de 96 tempestades, não considerando as que produziram ondas de até 3 m. Alguns anos são mais ativos que outros, como em 2020, quando foram gerados 7 eventos de grande energia. No entanto, em ano menos ativo pode ser gerada uma única tempestade, e pode ser extrema, como em 2018.

Em 8 anos ocorreram 23 tempestades que produziram ondas com altura máxima superior a 5 m. O maior evento registrado ocorreu em 2019, quando uma tempestade durou 162 horas, gerando aproximadamente 48.600 ondas com até 5,57 m de altura (Tabela 2). Em média cada uma dessas tempestades produziu 20.000 ondas com altura entre 3 e 8 m, considerando um período médio de 12 segundos. Candella e Souza (2013) descreveram que somente entre os anos 1997 e 2000, a boia de Arraial do Cabo (RJ) registrou 6 eventos com ondas H_s maiores que 5 m, com ondas H_{max} de até 12 m. Estes dados mostram a força das ondas que chegam ao litoral do Rio de Janeiro.

Tabela 2. Tempestades que geraram ondas acima de 5,01 m no Rio de Janeiro, entre 2016 e 2023. Período médio das ondas 12s. Dados do sistema SiMCosta.

Ano	Dia/mês	Duração (h)	Nº de ondas > 3 m	H_{max} (m)
2016	28/07 – 01/08	96	28.800	5,13
2016	28/10 – 01/11	76	22.800	7,03
2016	18/11 – 21/11	67	20.100	5,58
2017	11/08 – 16/08	130	39.000	5,33
2018	20/05 – 24/05	90	27.000	7,22
2019	04/07 – 08/07	85	25.500	5,42
2019	16/07 – 23/07	162	48.600	5,57
2020	22/02 – 24/02	41	12.300	5,40
2020	04/04 – 06/04	48	14.400	6,11
2020	08/04 – 12/04	94	28.800	5,89
2020	27/05 – 29/05	33	9.900	6,06
2020	02/07 – 04/07	48	14.400	5,58
2020	14/07 – 17/07	61	18.300	6,05
2020	30/10 – 01/11	34	10.200	6,26
2021	14/04 – 15/04	24	7.200	5,04

2021	21/04 – 24/04	38	11.400	6,37
2021	28/07 – 02/08	38	11.400	5,14
2022	10/06 – 14/06	86	25.800	5,35
2022	09/08 – 14/08	120	36.000	7,40
2022	20/12 – 23/12	71	21.300	5,07
2023	28/03 – 30/03	37	11.100	5,28
2023	17/05 – 19/05	45	13.500	5,37
2023	14/07 – 16/07	32	9.600	5,01

Em Saquarema (RJ), o último episódio com ondas Hmax de até 7 m quebrando na praia ocorreu em 03/04/2023, de acordo com o www.surfguru.com e filmagens do G1 Globo. Nesse mesmo evento a boia RJ3 registrou ondas de até 4,85 m. Esta diferença é explicada porque a altura das ondas tende a aumentar quando chegam em águas rasas e a morfologia do litoral influencia, conforme Bird (1969). Tem trechos que concentram a energia das ondas e outros dispersam.

Nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, as tempestades anuais com ondas Hmax entre 3 e 4 m podem ser consideradas normais. Santa Catarina é o segundo estado com a maior extensão de enrocamentos, com 63 km, e recebe ondas acima de 4 m com frequência. Faria (2022a) mensurou que ondas entre 6 e 10 m de altura transportaram blocos de até 230.000 kg na Ponta da Palhoça (SC), possivelmente pela tempestade de 11/08/2017 que produziu ondas dessa magnitude no local (Figura 3). A boia RJ3 registrou nessa mesma tempestade ondas Hmax de até 5,33 m, considerando que fica a 770 km de distância e pode ter perda de energia ao longo do percurso.



Figura 3. Onda com altura máxima estimada em 10 m de face, considerando o corpo inclinado do surfista em 1,5 m. Onda como essa produz energia equivalente a 500 kW/m, enquanto que uma onda de 3 m de altura produz 36 kW/m. Praia do Cardoso, Santa Catarina, em 11/08/2017. As gaivotas indicam o tamanho dos blocos, o corpo desse pássaro mede 0,63 m. Medição feita pelo autor sobre foto de James Thisted.

3.2.2. Litoral semiexposto

Os enrocamentos do Santos Dumont e da Marina da Glória ficam no compartimento leste da Baía de Guanabara, considerado como semiexposto. Talvez em função da morfologia do fundo marinho, porque a área fica ao lado do cânion submarino da Guanabara e isso afeta a refração de ondas, de acordo com Bird (1969). Segundo Pereira e Klumb-Oliveira (2015) e Lins-de-Barros et al. (2018) as ondas de tempestades de SE são menos frequentes, 20% do total, mas geralmente são as de maior energia. Normalmente é noticiado que ondas dessa direção entram na Baía de Guanabara atingindo a Marina da Glória e o Santos Dumont com altura máxima de 3 m. No entanto, registros fotográficos históricos dos anos 1917, 1921 e 2010 mostram que as ondas passaram de 3 m de altura antes e depois da construção da Marina da Glória, conforme foi medido na Figura 4. Faria (2024) disserta que com a construção do aterro do aeroporto Santos Dumont, a Ilha das Cobras, situada atrás, deixou de receber

ondas com altura de até 3 m, porque existia praia de matações no local. Assim, a ilha passou de litoral semiexposto para litoral protegido. O Aterro do Flamengo fica situado em área semiprotégida e, por isso, sofre menos com as tempestades. O Aterro da Urca situa-se em área protegida.

Bulhões (2011) fez simulações de ondas para o litoral do Rio de Janeiro, e para o enrocamento da Marina da Glória a altura máxima ficou entre 2 e 3 m; para o Santos Dumont ficou entre 3 e 4 m; e para a Ilha de Villegagnon entre 4 e 5 m. Talvez os modelos mais recentes mostrem uma realidade um pouco diferente porque a Marina da Glória recebe ondas mais altas que 3 m.

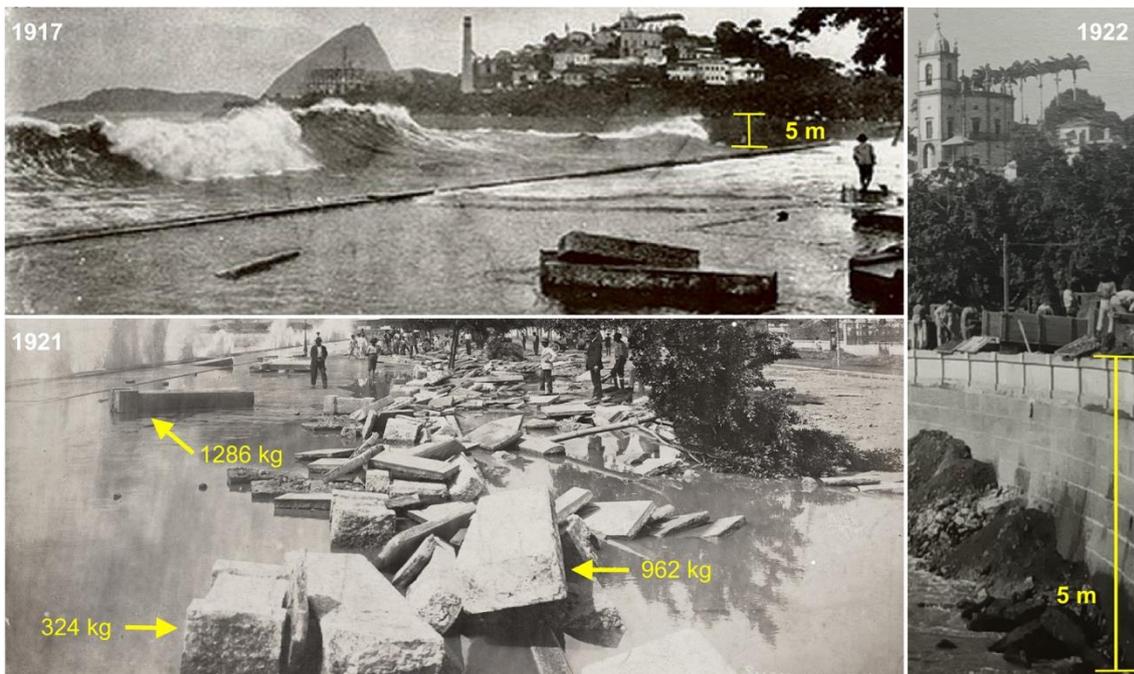


Figura 4. Ano 1917 – Praia do Russel com ondas que destruíram a parte superior do muro de contenção com 5 m de altura. Ano 1921 – Novamente outra ressaca que destruiu o muro. O impacto das ondas e os fluxos de água transportaram paralelepípedos de gnaissos por mais de 20 m, alguns pesando 1286 kg. O imbricamento dos matações também mostra a energia desses fluxos. Ano 1922 - Detalhes do muro reconstruído e que serviram de base para as mensurações. Ele sofreu danos também em 1906 e 1913, como mostram outras fotografias históricas. As medidas foram feitas em uma parte que sobrou do muro. O matação com 962 kg tinha como medida padrão: 193 cm de comprimento e 33 cm de espessura. A largura de 56 cm serviu de base para calcular a altura da estrutura. A área foi aterrada e a linha de costa avançou mais de 300 m, onde posteriormente foi construído o aeroporto Santos Dumont, e na década de 1950, a Marina da Glória. Fotos: Augusto Malta e Luciano Ferrez, publicadas por Ermakoff (2003 e 2009).

3.3. Mensuração de transporte usando ostras e cracas como biomarcadores

De acordo com os trabalhos de Oliveira (1947) e Faria (2020), no Rio de Janeiro o limite letal das ostras fica a 90 cm acima da maré mais baixa de sizígia, e para as cracas o limite é de 110 cm. Assim, considerou-se que os matações e blocos com esses moluscos e crustáceos incrustados que ficam acima desses limites podem ter sido transportados. Esses limites só valem para o compartimento da Baía de Guanabara onde estão situadas as áreas de teste, porque a maré tem alturas distintas nos diferentes compartimentos dessa baía.

Segundo Oliveira (1947), a densidade de ostras varia em função do ambiente: pode ser grande nos litorais protegidos, média nos litorais semiprotégidos e muito pequena ou inexistente nos litorais expostos. Nos litorais expostos as ostras habitam os macroporos existentes entre os clastos, no interior dos enrocamentos ou nos campos marinhos de blocos, onde entra alguma luz, de acordo com estudos de Zalmon e Masi (2008). A hidrodinâmica turbulenta que se forma entre os matações e blocos mistura os limites letais e essas linhas podem ficar distorcidas, mas não influenciam nos resultados das mensurações (Figura 5).

O contraponto para os testes é o enrocamento do Aterro da Urca, situado em área protegida das ondas de tempestades, onde raramente chegam a 0,5 m de altura. O aterro foi feito no final da década de 1910 para ser inaugurado em 1922 e conta com matacões e blocos de gnaiss facoidal de angular a muito angular. A obra está estável há um século e não foram achados matacões com incrustações acima da cota de 130 cm, considerando a turbulência promovida pelas pequenas ondas dentro dos macroporos, ou buracos.

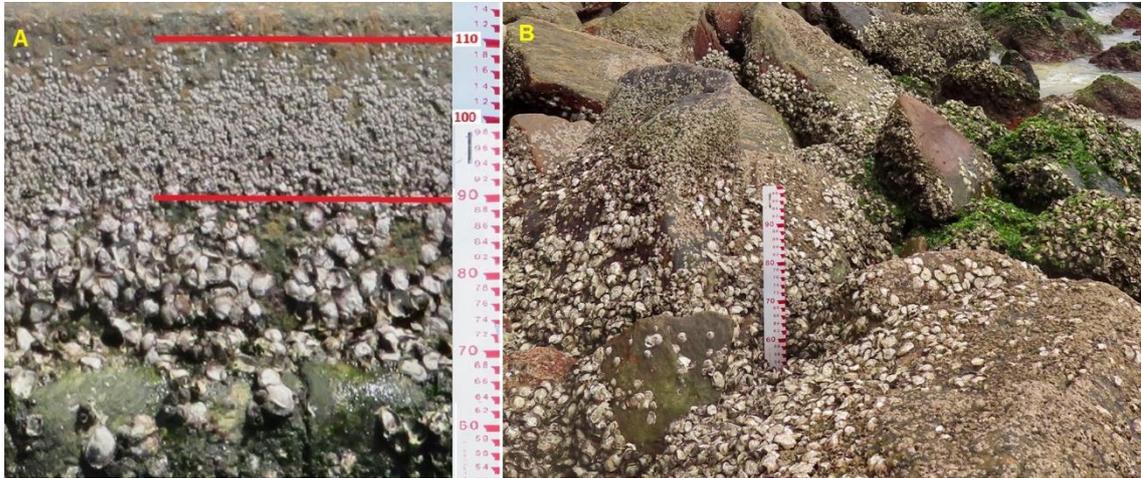


Figura 5. A) Zoneamento vertical na Marina da Glória considerando a maré astronômica local que tem oscilação de até 130 cm: as cracas ficam na faixa de maré entre 90 e 110 cm, e as ostras se situam abaixo de 90 cm. B) Situação dos incrustamentos das ostras e cracas nos matacões e blocos do Santos Dumont, cujos limites ficam misturados devido à turbulência hidrodinâmica. Esses enrocamentos acabam se tornando recifes artificiais para inúmeras espécies, embora não tenham sido planejados para isso. Fotos do autor.

3.3.1. Litoral exposto

O guia-corrente da Praia de Itaúna fica em litoral exposto às tempestades de SW, S e SE, com ondas Hmax que passam de 4 m com certa regularidade. A profundidade local oscila em função da maré e da mobilização do substrato arenoso. Durante a maré alta, as ondas de tempestades quebram diretamente sobre o enrocamento e transportam clastos. Foram mapeados blocos de até 5400 kg com ostras e cracas relativamente novas, em altura de 3 m, além de muitos matacões de até 1838 kg com ostras, depositados a 5 m de altura. Diversos fragmentos de rocha pesando mais de 1000 kg foram transportados por até 35 m. A obra foi construída nos anos 1970 e sofreu engordamento em 2014 (Figuras 6, 7 e 8).

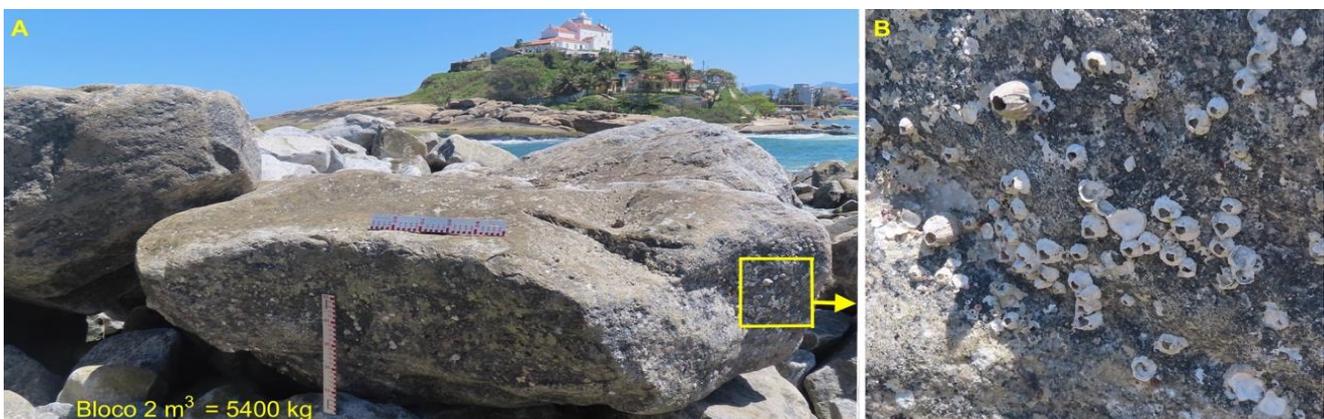


Figura 6. Guia-corrente da Praia de Itaúna. A) Bloco com volume aproximado de 2 m³, pesando 5400 kg, depositado a 3 m de altura. B) O estado de conservação das cracas indica que o clasto estava na zona de maré e que o transporte foi realizado recentemente. As régua medem 50 cm. Fotos do autor.



Figura 7. Bloco com volume aproximado de 1,8 m³ com incrustação de ostras, pesando 4800 kg. Esse bloco foi depositado a 3 m de altura, depois de ter passado pela crista do enrocamento, com altura entre 4 e 5 m. Praia de Itaúna (RJ). As régua medem 50 cm. Fotos do autor.

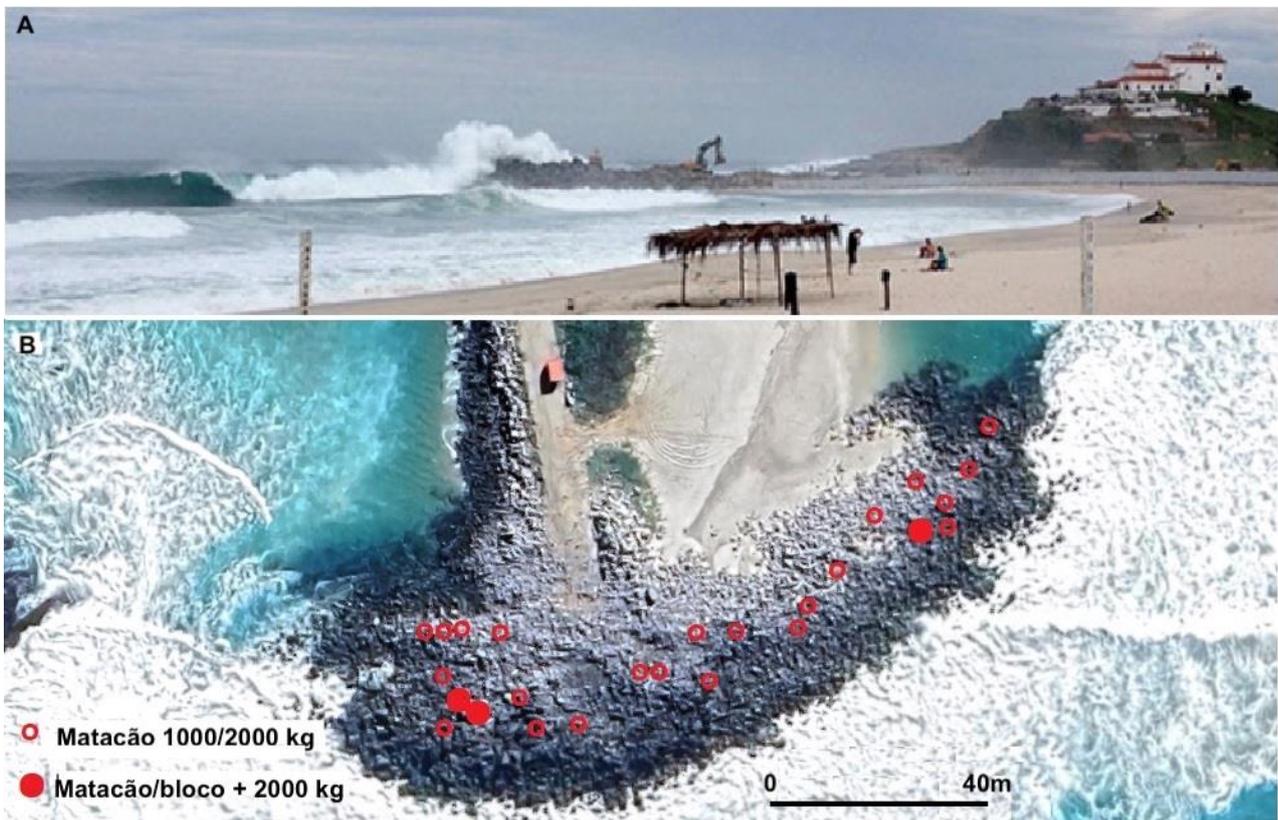


Figura 8. Guia-corrente da Praia de Itaúna, em Saquarema. A) Ondas entre 3 e 4 m de altura quebrando sobre o guia-corrente quando estava sendo engordado no ano 2014. Foto de autor anônimo. B) Localização dos matacões e blocos com incrustação de cracas e ostras que foram transportados. A imagem do Google Earth serve apenas como base porque é anterior à data do mapeamento. A movimentação dos matacões e blocos pela escavadeira foi realizada dez anos antes da coleta dos dados, não influenciando os resultados.

O guia-corrente da Praia da Macumba tem características parecidas com o da Praia de Itaúna. Foi construído no início dos anos 1970 e recebe ondas altas por ser litoral exposto, principalmente das tempestades provenientes de SW e S. Foram mapeados matacões com até 1950 kg com incrustação de ostras fora da faixa de maré, que indica que foram transportados. O maior se encontrava a 2 m de altura e a 7 m distante da linha de maré. Outros pesando

aproximadamente 1000 kg foram mapeados no topo do enrocamento, a 4 m de altura (Figura 9). Provavelmente outros clastos foram transportados a distâncias maiores, mas foram cobertos por areia após as tempestades e não puderam ser observados.

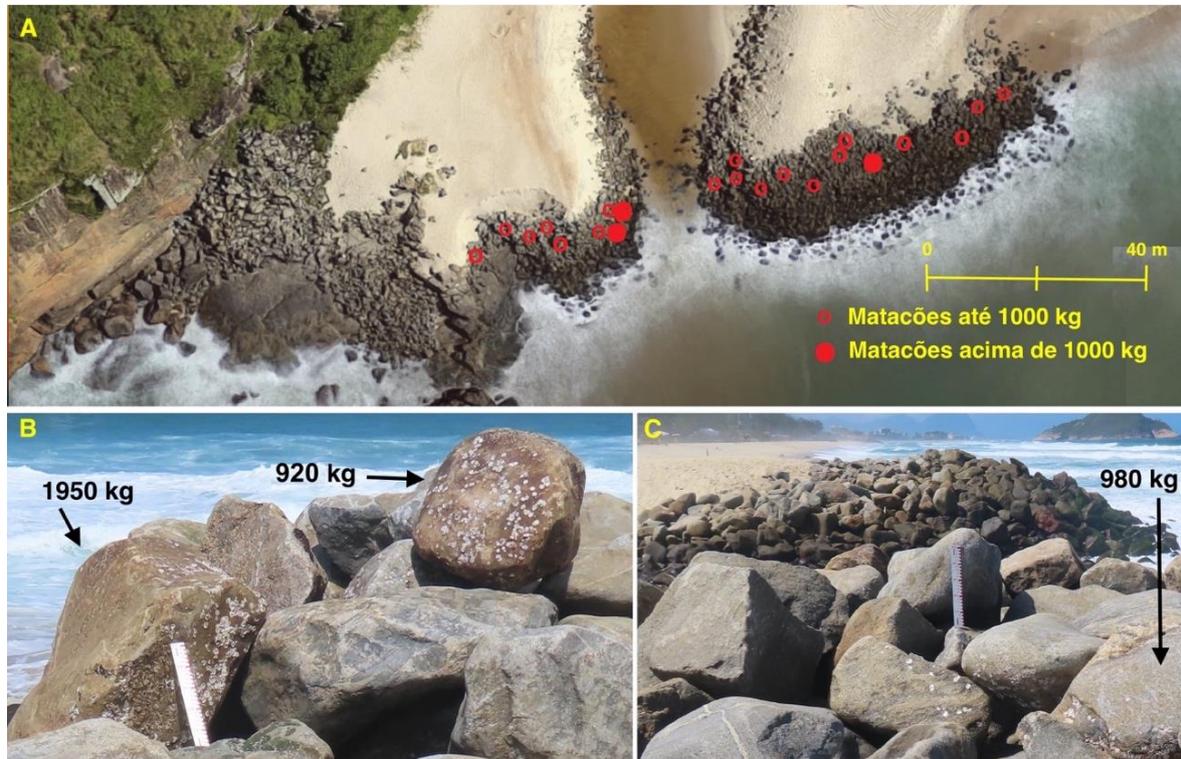


Figura 9. A) Guia-corrente da Praia da Macumba com a localização dos matações com incrustações de ostras. B) Matações com 1950 kg e 920 kg entre 2 e 3 m de altura. C) Matação com 980 kg a 4 m de altura. A imagem do Google Earth serve apenas como base porque é anterior à data do mapeamento. Fotos do autor.

3.3.2. Litoral semiexposto

Nos últimos 23 anos algumas tempestades fortes provenientes de SE produziram ondas H_{max} maiores que 3 m na Marina da Glória e no Santos Dumont. A tempestade de abril de 2010 produziu ondas que atingiu essa área com altura superior a 3 m. Esse evento foi bem documentado e foi considerado extremo porque durou 80 horas e gerou ondas significativas acima de 4 m de altura nos litorais expostos, de acordo com Fernandez et al. (2011). Talvez essa tempestade possa ser comparada as de 1917 e 1921. Outras com magnitude parecida afetaram essa parte da Baía de Guanabara entre os anos 1922 e 2023, no entanto, existem registros em trabalhos publicados de apenas algumas que ocorreram nas últimas décadas, ou foram notícias na mídia como as de 2016 e 2017.

No enrocamento do Santos Dumont foram observados muitos matações e blocos com ostras que foram transportados por mais de 20 m. O maior registrado no local pesa aproximadamente 3400 kg e se encontra a 2 m de altura e a 10 m distante da água (Figura 11). Não foi gerado mapa para esse local devido às restrições de acesso por ser área de pouso e decolagem das aeronaves.



Figura 10. A) Crista do quebra-mar da Marina da Glória a 4 m de altura, com empilhamento de matacões com incrustações de ostras pesando entre 500 e 1000 kg. B) Matacão de 910 kg (0,34 m³) coberto por ostras, situado no topo do enrocamento. C e D) Bloco com ostras de aproximadamente 3650 kg (1,35 m³) no topo do quebra-mar. Fotos do autor.



Figura 11. A) Cabeceira da pista sul do aeroporto Santos Dumont. B e C) Bloco com ostras pesando aproximadamente 3400 kg a 2 m acima da linha de maré máxima de sizígia. D) Ostras servindo como escala. O diâmetro médio é de 2,5 cm e o volume do elipsoide é de aproximadamente 1,26 m³. Fotos do autor.

3.4. Monitoramento da movimentação dos clastos por comparação temporal de fotografias

O monitoramento da movimentação dos fragmentos de rocha através de análise temporal de fotografias tiradas de um mesmo ângulo foi aplicado em dois enrocamentos: um em litoral exposto, no guia-corrente da Praia da Macumba; e outro em litoral semiexposto, no quebra-mar da Marina da Glória.

Na Praia da Macumba, as fotos foram tiradas entre 13/08/2022 e 01/09/2023, e mostram transporte intenso dos fragmentos de gnaiss e granito metamórfico, corroborando os dados obtidos com ostras e cracas (Figura 12). Nesse período ocorreram 19 tempestades que produziram ondas Hmax acima de 4 m, sendo que uma, entre os dias 9 e 14 de agosto gerou ondas de até 7,40 m. Foram geradas ainda 4 tempestades que produziram ondas de até 5,37 m. Os deslocamentos dos fragmentos de rocha causam o choque entre eles, quebrando as arestas angulosas e tornando-os subarredondados. E devido ao substrato arenoso ser raso, com profundidade menor que 3 m, as ondas arremessam jatos de água e areia que causam o lixamento desses clastos completando o trabalho de arredondamento. Esse processo foi bem estudado por Shepard (1969) e Komar (1998). Essa metamorfose facilita ainda mais a movimentação e o transporte dos matacões e blocos e torna os enrocamentos instáveis.



Figura 12. A) Situação em 13/08/2022 do guia-corrente da Praia da Macumba, com ondas entre 3 e 4 m de altura máxima em fase de maré baixa de quadratura. B) Matacão com aproximadamente 1100 kg com ostras transportado para altura de 2 m. C) Situação em 01/09/2023 em fase de maré baixa de sizígia, mostrando que houve intensa movimentação com blocos de até 1950 kg transportados. D) Matacão arredondado de 920 kg (0,34 m³) com ostras e régua de 50 cm. Fotos do autor.

No quebra-mar da Marina da Glória a movimentação de matacões e blocos também foi intensa, mas com dinâmica diferenciada. As ondas quebram diretamente sobre o enrocamento porque a profundidade local passa de 3 m. Nessa condição as ondas maiores que 2 m passam por cima do enrocamento e afetam a enseada artificial da marina. Entre maio de 2022 e agosto de 2022, ocorreram três tempestades marinhas com energia elevada que afetaram bastante a área, e duas coincidiram com maré de sizígia e maré meteorológica. Essas tempestades foram atípicas em função da proveniência (SE), da frequência e conjunção com a maré.

No dia 16/05/2022, ondas Hmax superiores a 2 m transportaram matacões e blocos de até 3650 kg, subindo pela face do enrocamento até o topo, situado entre 3 e 4 m de altura (Figuras 13 e 14). Os maiores ficaram na crista do enrocamento, enquanto parte dos matacões menores desceram pela face oposta. Nos dias 11 e 12 de agosto outra tempestade promoveu novamente intensa movimentação dos clastos. Essas tempestades formaram (ou ampliaram) depósitos de lavagem na enseada, com certo grau de selecionamento. Predominam as classes matacão

pequeno (200 – 400 mm) e matacão médio (400 – 600 mm). Na face SE, exposta às ondas, predomina matacão grande (600 - 1000 mm).

No dia 29/09/2023 foi observado que ondas entre 1,5 e 2 m de altura arremessaram fluxos por cima do quebra-mar durante 12 h, em período de maré de sizígia. As alterações no local foram pequenas, apenas alguns matacões que estavam desequilibrados foram deslocados. Assim, considerando a hidrodinâmica local, o transporte de matacões com peso aproximado de 1000 kg deve ocorrer quando a área é afetada por ondas acima de 2 m de altura, mais provavelmente a partir de 2,5 m, corroborando os dados de Khan et al. (2022).



Figura 13. Quebra-mar da Marina da Glória. Situação em 28/07/2022, após grande movimentação dos clastos que ocorreu no dia 16/05/2022, ondas acima de 2 m transportaram matacões e blocos para o topo, a 3 m de altura. Situação em 22/08/2022. Quase todos os matacões e blocos foram transportados após outra tempestade ocorrida nos dias 11 e 12 de agosto. As escalas medem 50 cm. Fotos do autor.



Figura 14. Avanço da crista do quebra-mar da Marina da Glória. A) Posição dos clastos com cracas e ostras em 01/10/2023. B) Fluxo de água arremessado por uma onda com altura acima de 2 m movimentando matações e blocos em 12/08/2022. A imagem do Google Earth serve apenas como base porque é anterior à data do mapeamento. Foto do autor.

Quando essas tempestades coincidem com a maré alta de sizígia e/ou maré meteorológica, elas podem inundar áreas a montante do enrocamento e carrear sedimentos e fragmentos de rocha que estavam alojados no interior, dentro dos macroporos. Eles são removidos pela pressão dos jatos de água e parte é arremessada por via aérea. Posteriormente, os fluxos de água produzidos pelas ondas durante a maré alta transportam sedimentos finos, calhaus e matações pequenos por dezenas de metros, conforme foi observado no Santos Dumont em 2010 (Figura 15) e no Aterro do Flamengo em 2022 e 2023.



Figura 15. A) Ressaca no dia 8 de abril de 2010 com ondas acima de 3 m de altura na cabeceira sul do Aeroporto Santos Dumont. As setas indicam as posições de alguns matações grandes que foram transportados por até 60 m. Matações pequenos e calhaus foram depositados a 200 m de distância. Cada quadrado vermelho ou branco na pista mede 2 m de lado. B) Situação em 29/09/2023, com ondas menores que 3 m de altura em período de maré baixa de sizígia. Fotos de Roberto Fantinel (UOLFoto) e do autor.

Considerando apenas clastos acima de 60 mm de diâmetro, a distribuição granulométrica do enrocamento da Marina da Glória é composta por: 5% calhau (60 – 200 mm), 8% matacão pequeno (200 – 400 mm), 32% matacão médio (400 – 600 mm), 55% matacão grande (600 - 1000 mm) e 5% bloco (>1000 mm). Essa granulometria indica que a obra foi subestimada, porque para esse regime de ondas pressupõe-se que a maior parte precisa ser da classe bloco (\varnothing 1000 mm), com no mínimo 2,65 t/m³, de acordo com o US Army Corps of Engineers (1984). No entanto, esse enrocamento tem apenas 5% de blocos com o peso sugerido. Em cinco décadas, a movimentação dos matacões e blocos causando impactos entre eles, os tornaram arredondados, e com isso o quebra-mar ficou instável.

O guia-corrente da Praia de Itaipuaçu teve uma parte destruída no dia 06/07/2019, durante uma tempestade de 97 h de duração, com ondas Hmax entre 3 e 5,4 m. Os fragmentos de rocha já estavam arredondados. A estrutura foi reconstruída, mas no dia 24/09/2021 foi destruída outra vez por outra tempestade que durou 63 h, com ondas entre 3 e 5,3 m de altura. Os matacões foram transportados e espraçados causando o fechamento parcial do canal e impedindo a movimentação das embarcações. O molhe foi consertado novamente e recebeu nova carga de clastos. No entanto, a recarga foi feita com matacões médios e grandes, pesando em média 500 kg e com morfometria predominante subarredondada. Essas características não se ajustam a um enrocamento em litoral exposto que recebe ondas acima de 3 m quebrando sobre a estrutura. A profundidade local é maior que 2 m e a inclinação do fundo marinho é alta, produzindo praia refletiva.

O guia-corrente da Barra da Tijuca não sofreu grandes alterações no período observado porque a parte central do molhe foi concretada, fixando matacões e blocos. A granulometria predominante é de matacões grandes e blocos com morfometria subangular e angular.

3.5. Cúspide e imbricamento como indicadores de transporte de matacões e blocos nos enrocamentos

As formas de cúspide são comuns e efêmeras nas praias arenosas. Elas são produzidas pelos fluxos de água e sedimentos que sobem e descem pela face praias quando as ondas chegam com certa angulação, segundo Bird (1969). Formas parecidas e que indicam transporte de matacões são visíveis nos enrocamentos do Santos Dumont e da Ilha de Villegagnon. Na literatura, as únicas referências sobre esse tipo de formação em praia de matacões é de Sunamura (2000) e Faria (2024). As outras referências são apenas sobre praias de calhaus.

No Santos Dumont, os enrocamentos estão alinhados em três direções: Setor E (0° - 180°), Setor SE (55° - 240°) e Setor SW (120° - 300°). As ondas de SE fazem ângulos de até 30° em relação aos enrocamentos, nos setores E e SW, transportando matacões na direção NW (330°) e criando as estruturas de cúspide (Figura 16). Na face das praias arenosas, os sedimentos sobem e descem em função dos fluxos de água. No enrocamento os fragmentos de rocha sobem e tendem a não descer porque a energia dos fluxos de retorno é menor e também devido à rugosidade elevada. Isso ocorre porque a pressão causada pelo impacto das ondas no movimento de subida deixa de existir no fluxo que desce e porque parte considerável retorna por dentro do enrocamento, por entre matacões e blocos. Ou seja, a redução da energia dos fluxos superficiais de retorno é grande. Todavia, podem ocorrer desmoronamentos.

Os ângulos de inclinação das faces dos enrocamentos mudam com o transporte de clastos ao longo dos anos devido ao espraçamento desses fragmentos de rocha. Quando são construídos, os ângulos variam entre 30° e 35°, como foi medido no Aterro do Flamengo (30°), Praia da Barra da Tijuca (32°) e na Praia de Itaipuaçu (35°). Nos enrocamentos antigos os ângulos diminuíram para 9° a 20°: Praia de Itaúna (9° - 20°), Santos Dumont (15° - 20°), Praia da Macumba (12° - 18°) e Marina da Glória (15° - 20°). Como comparação, Faria (2022a) achou ângulos de 15° a 26° em 32 praias naturais de matacões.

Nas áreas com formação de cúspides do Santos Dumont e Ilha de Villegagnon, matacões com formas placoides e discoides se encontram imbricados, em ângulos entre 28 e 40°, o que indica também que foram transportados.

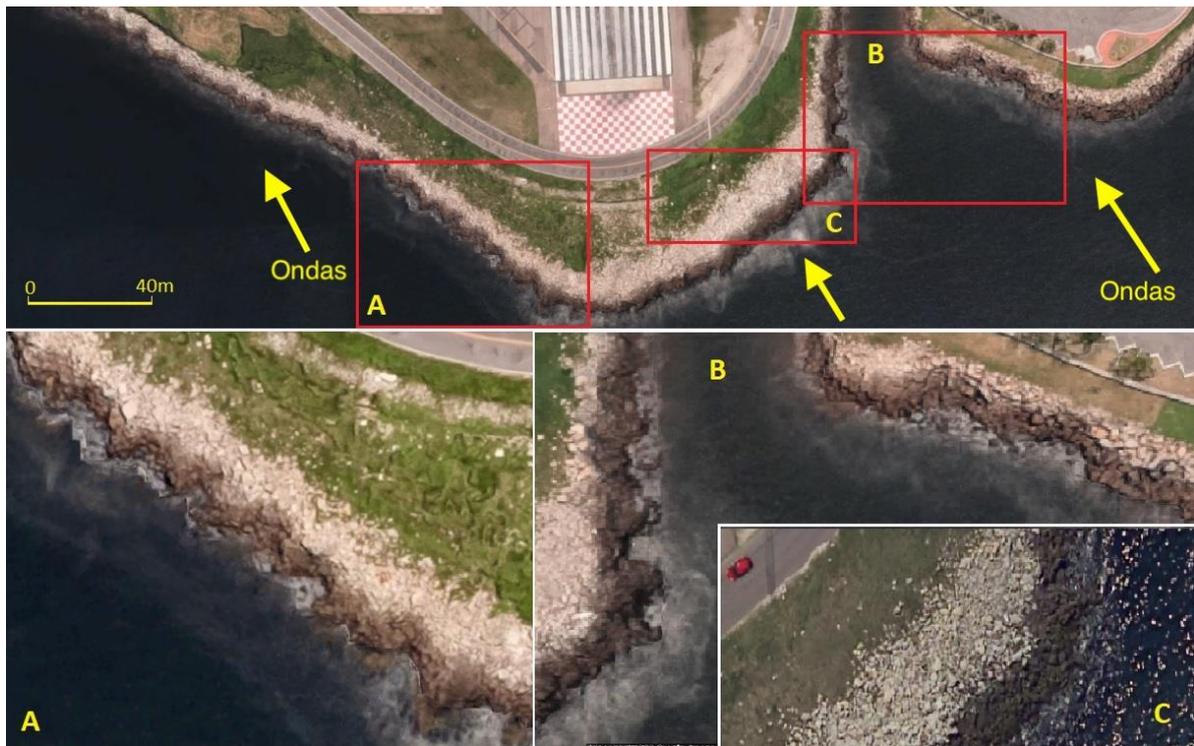


Figura 16. Aeroporto Santos Dumont e Ilha de Villegagnon com estruturas de cúspide de enrocamento. (A) Setor SW com cúspides bem desenvolvidas. (B) Setor E do aeroporto e SW da ilha com cúspides também bem desenvolvidas. (C) O setor SE do aeroporto não apresenta cúspide, o que indica que o desenvolvimento desse tipo de morfologia depende do ângulo em que as ondas se chocam no enrocamento. Imagens Google Earth.

4. Discussão

Nos últimos 23 anos algumas tempestades fortes provenientes de SE produziram ondas H_{max} maiores que 3 m na Marina da Glória e no Santos Dumont. A tempestade de abril de 2010 produziu ondas que atingiu essa área com altura superior a 3 m. Esse evento foi bem documentado e foi considerado extremo porque durou 80 horas e gerou ondas significativas acima de 4 m de altura nos litorais expostos, de acordo com Fernandez et al. (2011). Talvez essa tempestade possa ser comparada as de 1917 e 1921. Outras com magnitude parecida afetaram essa parte da Baía de Guanabara entre os anos 1922 e 2023, no entanto, existem registros em trabalhos publicados de apenas algumas que ocorreram nas últimas décadas, ou foram notícias na mídia como as de 2016 e 2017.

O número de ressacas que atingem os litorais expostos é muito maior, mas somente uma parte foi estudada. Por exemplo, Godoi et al. (2014) analisaram apenas as que ocorreram em 11/1988, 05/1997, 04/2008, 10/2009 e 04/2010. A que se formou em 05/2011 foi considerada também extrema por Candella e Souza (2013), porque gerou ondas significativas acima de 6 m de altura. Os registros diários de ondas coletados por boias foram iniciados no Brasil a partir de 1996 e isso dificulta uma análise de longo prazo. O registro informativo mais antigo relata sobre a destruição da antiga Vila de São Vicente (SP) em 1541, por ondas estimadas de até 8 m de altura, segundo Veloso (2011). De qualquer forma, parece que as tempestades chamadas de “extremas” e que eram classificadas com tempo de recorrência entre 50 e 100 anos, são, de certa forma, “normais”, porque estão sempre ocorrendo. Talvez porque temos agora mais dados disponíveis para analisar. Pelo senso popular e pela mídia, as ressacas parecem mais fortes por causa da maior destruição, mas é preciso levar em consideração que o número de construções em áreas de risco aumentou muito nas últimas décadas. Como consequência, aumentou o número de obras de defesa do litoral, totalizando 300 km de enrocamentos no Brasil, e uma parte se encontra com algum nível de desgaste.

As formas de cúspide que se desenvolveram no Santos Dumont e na Ilha de Villegagnon foram usadas para analisar as condições dos enrocamentos em outros estados brasileiros. É um diagnóstico fácil porque pode ser feita de forma remota nas imagens aéreas verticais, inclusive no Google Earth. Foi constatado que alguns dos grandes quebra-mares, guia-correntes e enrocamentos de contenção de aterro no Brasil estão com algum grau de desenvolvimento de estrutura de cúspide, o que indica transporte de matações e desgaste das estruturas. Os que estão em estágio avançado são: enrocamentos do Porto de Imbituba (SC) e a parte antiga do molhe norte do Porto

de Itajaí (SC). Alguns apresentam estruturas de cúspide em estágio inicial: guia-corrente de Recife (PE), o par de espigões que forma o guia-corrente da Lagoa dos Patos (RS), guia-corrente de Laguna (SC) e Porto de Ubu (ES). Além desses exemplos, outros menores podem ser observados ao longo da costa brasileira.

São necessárias mais pesquisas para entender melhor esse tipo de formação nas estruturas de engenharia e também nas praias de matacões. Nos resultados obtidos neste trabalho, aparentemente as cúspides se desenvolvem melhor nos depósitos com certas características: litoral exposto ou semiexposto; face do enrocamento com inclinação menor que 20°; ângulo baixo de interceptação das ondas pela estrutura; enrocamento com largura superior a 10 m; topo plano; e profundidade maior que 2 m. As cúspides são mais desenvolvidas nas construções com maior tempo de exposição.

Este trabalho provou que a metodologia de biomarcadores com cracas e ostras, para mensurar transporte de matacões e blocos, é confiável. Todavia, pode haver dificuldades em certas áreas de litoral exposto, devido à baixa densidade ou mesmo à ausência desses crustáceos e moluscos. Isso explica por que no Santos Dumont e na Marina da Glória foram obtidos mais dados do que na Praia da Macumba e na Praia de Itaúna.

O transporte de matacões e blocos nos litorais semiexpostos é esporádico, podendo não ocorrer em alguns anos, mas é intenso em certas ocasiões. Na Marina da Glória, o quebra-mar está migrando para a retaguarda e, sem a recarga de novos fragmentos de rocha, a tendência é o espalhamento desses clastos até o enrocamento desaparecer. No Santos Dumont, se não ocorrer o engordamento, as cúspides podem evoluir e avançar pelo aterro, podendo ainda transformar o enrocamento em praia de matacões, inclusive pelo arredondamento dos clastos. Essa possibilidade é reforçada porque existiam praias desse tipo na área, antes da construção do aterro, conforme documentou Faria (2024). Na Praia de Itaúna foi feito engordamento porque o guia-corrente apresentava instabilidade, no entanto, parte considerável dos matacões despejados em 2014 já vieram arredondados e isso diminui a vida útil da obra.

Os enrocamentos construídos em litoral exposto, com profundidade maior que 2 m, tendem a ter maiores taxas de transporte de matacões e blocos porque as ondas quebram diretamente sobre esses clastos, movendo blocos de até 5400 kg a 3 m de altura. Não foi possível observar tal processo em tempo real devido às limitações tecnológicas frente à força dessas ondas, todavia, é possível que esse transporte possa ocorrer por etapas, ou “degraus”, na medida em que a maré sobe. De qualquer forma, essa dinâmica merece estudos específicos porque é muito pouco conhecida.

As características geomorfológicas resultantes dessas mensurações foram aplicadas em outros enrocamentos e notou-se que situação parecida ocorre em alguns dos quebra-mares de Olinda (PE) e de Jacarecanga (CE), podendo ainda ocorrer em outros lugares, inclusive com a destruição parcial de alguns, como ocorreu no guia-corrente de Itaipuaçu em 2019 e 2021.

Os resultados deste trabalho ajudam a entender a dinâmica das praias de matacões e das praias de blocos, descritas por Faria (2018 e 2022a), porque os processos hidrodinâmicos e de transporte dessas praias não diferem muito dos que ocorrem nos enrocamentos. Essas praias são relativamente comuns nos segmentos de litoral exposto da extensa costa rochosa brasileira, com aproximadamente 2000 km de extensão. O processo de formação ocorre ao longo de milhares de anos, porque a fonte de fragmentos de rocha são deslocamentos, quedas de blocos e deslizamentos de solo e rocha das encostas rochosas litorâneas. Os enrocamentos, por sua vez, como são depósitos antrópicos, podem se transformar em praias de matacões em dezenas de anos ou em poucos séculos, dependendo da hidrodinâmica local. Os enrocamentos da Praia de Itaúna, da Praia da Macumba e da Marina da Glória, como exemplos, já podem ser considerados como praias de matacões.

5. Conclusões

No Brasil foram construídos aproximadamente 300 km de enrocamentos litorâneos em ambientes diversos. Os que foram estudados e ficam em litorais expostos e semiexpostos, tiveram algum nível de alteração em suas estruturas. Os mais afetados estão migrando por causa da elevada taxa de transporte dos matacões e blocos, como o quebra-mar da Marina da Glória e do guia-corrente de Itaúna. Em alguns foram desenvolvidas estruturas de cúspide por causa do ângulo de incidência das ondas, como ocorre no aeroporto Santos Dumont e na Ilha Villegagnon.

A metodologia de biomarcador, usando cracas e ostras, mostrou-se muito confiável para calcular transporte de matacões e blocos pelas ondas, conforme foi corroborado pelo método de comparação temporal de fotografias. Foi provado que nos litorais semiexpostos do Rio de Janeiro ondas com altura máxima maior que 2 m transportam clastos de até 3650 kg a 3 m acima do nível do mar. Nas costas expostas, ondas acima de 3 m de altura podem transportar blocos de 5400 kg a esse mesmo patamar.

Ondas entre 3 e 4 m de altura máxima devem ser consideradas como normais nos litorais expostos das regiões Sul e Sudeste, e as tempestades que geram ondas entre 4 e 7 m não devem ser consideradas como fenômenos raros porque ocorrem regularmente, de acordo com dados das boias instaladas no Rio de Janeiro, trabalhos publicados e notícias na mídia.

Na maioria dos projetos de engenharia observados, o tamanho dos fragmentos de rocha foi subestimado para o clima de ondas existente; usaram clastos com granulometria inferior à sugerida pelas normas técnicas, e a morfometria também está fora do padrão, porque os matacões e blocos estão arredondados. Isso facilita o transporte dos matacões e diminui a vida útil dos enrocamentos. Alguns foram repetidamente destruídos e reconstruídos, como o guia-corrente de Itaipuaçu.

Os dados obtidos neste trabalho podem ajudar a entender melhor a dinâmica de formação das praias de matacões e praias de blocos existentes no Brasil. Elas eram “desconhecidas” exatamente pela falta de dados em relação a esse tipo de transporte.

Financiamento: Esta pesquisa não teve nenhum financiamento externo, todos os gastos foram cobertos com recursos do próprio e único autor.

Conflito de Interesse: O autor declara não haver conflito de interesse.

Referências

1. ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. **Obras e Gestão de Portos e Costas: A Técnica Aliada ao Enfoque Logístico e Ambiental**. Editora Blucher, São Paulo. 2009. 804p. ISBN: 9788521204862
2. BAGNOLD, R.A. Interim report on wave pressure research. **Journal Institute of Civil Engineering**, v.12, p. 201-226, 1939.
3. BIRD, E.C.F. **Coasts: An Introduction to Systemic Geomorphology**. MIT Press Cambridge, 1969.
4. BLAIR, T.C.; McPHERSON, J.G. Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles. **Journal of Sedimentary Research**, v.69, n. 1, p. 6-19, 1999. DOI: 10.2110/jsr.69.6.
5. BLAMEY, L.K.; BRANCH, G. Habitat diversity relative to wave action on rocky shores: Implications for the selection of marine protected areas. **Aquatic Conservation Marine and Freshwater Ecosystems** v. 19, n. 6, p. 645 – 657, 2009. DOI:10.1002/aqc.1014
6. BULHÕES, E. Simulação de ondas oceânicas extremas para a Cidade do Rio de Janeiro, Brasil. **XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário**, 2011.
7. BULHÕES, E.; FERNANDEZ, G.; OLIVEIRA FILHO, S.; PEREIRA, T.G. Coastal Impacts Induced by Storm Waves between Cape Frio and Cape Buzios, Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Coastal Research**, n. 75, p. 1047-1051, 2016. DOI:10.2112/SI75-210.1
8. CANDELLA, R.N.; SOUZA, S. M. L. Ondas oceânicas extremas na costa sul-sudeste brasileira geradas por ciclone com trajetória anormal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n.4, 2013. p. 441-456. DOI: 10.1590/S0102-77862013000400010
9. CAROBENE, L. Marine notches and sea-cave bioerosional grooves in the Legurian Coast – Italy. **Journal of Coastal Research**, v. 31, n. 3, p. 536-556, 2015. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-14-00068.1
10. COX, R; JAHN, K.L.; OONA, G. Extraordinary boulder transport by storm waves (west of Ireland, winter 2013–2014), and criteria for analyzing coastal boulder deposits. **Earth-Science Reviews**, v. 177, n. 2, p. 623 – 636, 2018. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.12.014
11. COX, R; OBOYLE, L. Imbricated coastal boulder deposits are formed by storm waves, and can preserve a long-term storminess record. **Scientific Report**, v. 9, n.1, 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-47254-w
12. EGUCHI, B.M.M.; KLUMB-OLIVEIRA, L. Clima de ondas de tempestades na costa brasileira utilizando 41 anos de dados da reanálise ECMWF ERA5. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 544-565, 2023. ISSN 2237-8642
13. ERMAKOFF, G. **Rio de Janeiro: 1900 - 1930**. Casa Editorial G. Ermakoff, Rio de Janeiro, 2003. 242p. ISBN: 978-8598815343
14. ERMAKOFF, G. **Augusto Malta e o Rio de Janeiro: 1903 - 1936**. Casa Editorial G. Ermakoff, Rio de Janeiro, 2009. 284p. ISBN: 9788598815121

15. FARIA, A.P. A expansão artificial do litoral e a destruição dos ambientes de costa rochosa na região metropolitana do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 25, n. 1, 1-18, 2024. DOI:10.20502/rbg.v25i1.2381
16. FARIA, A.P. Praias de matacões, praias de blocos e campos marinhos de blocos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 3, n. 4, p. 1775-1791, 2022a. DOI: 10.20502/rbg.v23i4.1785
17. FARIA, A.P. Critérios geomorfológicos e hidrodinâmicos para definir zonas de segurança na costa rochosa brasileira. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 45, p. 1-15, 2022b. DOI: 10.11137/1982-3908_45_41724
18. FARIA, A.P. Evidências da estabilização do nível do mar no Brasil entre os anos 1864 e 2019. **Anuário do Instituto de Geociências** - v. 43, n. 2, p. 45-56, 2020. DOI: 10.11137/2020_2_161_172
19. FARIA, A.P. Dinâmica geomorfológica da costa rochosa do Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 1, p. 189-206, 2018. DOI: 10.20502/rbg.
20. FERNANDEZ, G.; BULHÕES, E.; ROCHA, T.B. Impacts of severe storm occurred in April 2010 along Rio de Janeiro coast, Brazil. **Journal of Coastal Research**, 64 (SI): 1850-1854. January 2011.
21. GILL, R. **Rochas e Processos Ígneos: Um Guia Prático**. Bookman, P. Alegre, 2014. 427 p. ISBN: 9788582601839
22. GODOI, C.E.; PARENTE, R.; AUDÁLIO R. T. An overview of events of high sea waves at the mouth of Guanabara Bay. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 9, n. 2, p. 70-87, 2014.
23. GORDON, N.D.; FINLAYSON, B.L. **Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists**. Willey, London, 2004. 448 p. ISBN: 978-0-470-84358-1
24. IMS. Instituto Moreira Salles. Marc Ferrez: Rio. Edit. Steidl, Alemanha, 2015. 263p. ISBN 9788583460190
25. KHAMPUIS, W.L. **Introduction to Coastal Engineering and Management**. World Scientific Publishing. London, 2020. 544 p. ISBN 9811207992
26. KHAN, A.; SINGH, A.; GADHAVI, M.S.; MALI, J. Mechanism of boulder transport during extreme wave events along the eastern flank of the Arabian Sea. **ASEAN Engineering Journal**, v. 12, n. 3, p. 71-78, 2022. DOI: <https://doi.org/10.11113/aej.V12.16850>
27. KAYE, A.C. The upper limit of barnacles as an index of sea-level changes on the New England coast during the past 100 years. **Journal of Geology**, v. 72, n. 5, p. 580-600, 1964.
28. KOMAR, P.D. **Beach Processes and Sedimentation**. Prentice Hall, London, 1998, 520 p. ISBN 9780137549382
29. LINS-DE-BARROS, F.M.; KLUMB-OLIVEIRA, L.; LIMA, R.F. Avaliação histórica da ocorrência de ressacas marinhas e danos associados entre os anos de 1979 e 2013 no litoral do estado do Rio de Janeiro. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 18, n.2, p. 85-102, 2018. DOI: 10.5894/rgci-n146
30. NANDASENA, N.A.K; PARIS, R.; TANAKA, N. Reassessment of hydrodynamic equations: Minimum flow velocity to initiate boulder transport by high energy events (storms, tsunamis). **Marine Geology**, v. 281, n. 1-4, p. 70-84, 2011. DOI: 10.1016/j.margeo.2011.02.005
31. NAYLOR, L.A.; STEPHENSON, W.N. Geomorphological control on boulder transport and coastal erosion before, during and after an extreme extra-tropical cyclone. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 41, n. 5, p. 685 – 700, 2016. DOI: 10.1002/esp.3900
32. NOTT, J. Waves, coastal boulder deposits and the importance of the pre-transport setting. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 210, n. 1, May 2003. DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00104-3
33. OLIVEIRA, L. P. H. **Distribuição geográfica da fauna e flora da Baía de Guanabara**. Memórias do Instituto Oswaldo Cruz, 45 (3): 709-734. 1947.
34. PEREIRA, N.E.S.; KLUMB-OLIVEIRA, O. Analysis of the influence of ENSO phenomena on wave climate on the central coast of Rio de Janeiro, Brazil. **Journal International Zone Management**, v. 15, n. 3, p. 353-370, 2015. DOI: 10.5894/rgci570
35. SHEPARD, F.P. **Submarine Geology**. Harper & How. 310 p. 1967.
36. SUNAMURA, T; AOKI, H. **Field experiment of cusp formation on a coarse clastic beach using a suspended video-camera system**. First published: 12 April 2000. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(200003\)25:3<329::AID-ESP83>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(200003)25:3<329::AID-ESP83>3.0.CO;2-R)
37. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 2011. **Coastal Engineering Manual**. Washington, D.C., USA. 1984
38. ZALMON, I.; MASI, B.; Zonation of intertidal benthic communities on breakwaters of different hydrodynamics in the north coast of the state of Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 25, p. 662-673, 2008. ISSN: 0101-8175



This work is licensed under the Creative Commons License Attribution 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. This license allows for others to distribute, remix, adapt and create from your work, even for commercial purposes, as long as they give you due credit for the original creation.