

Critérios Geomorfológicos e Hidrodinâmicos para Definir Zonas de Segurança na Costa Rochosa Brasileira

Safety Zones for the Brazilian Rocky Coast Based on Geomorphological and Hydrodynamics Criteria

Antonio Paulo Faria 

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia. Rio de Janeiro, RJ, Brasil

E-mail: antoniofaria.geo@gmail.com

Resumo

Este trabalho sugere a criação de uma zona de segurança para a costa rochosa brasileira, com pelo menos 30 m de largura, a partir do limite superior da ação das ondas de tempestades marinhas. Isso atende os projetos de engenharia e podem auxiliar ainda no planejamento da gestão dos litorais rochosos. Para tanto foram estudadas a geomorfologia e a hidrodinâmica dos costões, falésias, bancadas e campos marinhos de blocos, em 233 pontos no Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo. Foram feitas correlações entre declividade de rampas rochosas, altura das ondas, forma das encostas e outros aspectos. Foram definidas 3 faixas de lavagem criadas pela ação das ondas: a faixa “A” delimita o ponto atingido pelas ondas de tempestades mais fortes em um período de aproximadamente 10 anos; a faixa de lavagem “B” apresenta-se polida pela ação das ondas de tempestades regulares; na faixa “C” proliferam incrustações de comunidades marinhas porque é atingida por marés e ondas de todos os tamanhos. Esse zoneamento serve ao planejamento da gestão costeira. Foi constatado que os perfis da costa rochosa mais seguros contra as ondas de tempestade são: falésia com altura maior que 5 m, costão-falésia com altura maior que 4 m e campo marinho de blocos. Os perfis do tipo costão, entre 15° e 45° de inclinação, assim como as bancadas, produzem as áreas de maior risco, principalmente quando inseridos em baías rochosas expostas.

Palavras-chave: Costões marinhos; Falésias; Ação das ondas de tempestade

Abstract

This work suggests the creation of safety zones for the Brazilian rocky coast, at least 30 m wide, starting at the maximum limit of the storm waves run up on the ramps. It was based on the geomorphology and hydrodynamics of the low cliffs, steep cliffs, platforms, and marine deposit of boulders. The studies were carried out at 233 spots in the States of Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro, and Espírito Santo. Correlations were made between the declivity of the rocky ramps, wave height, and geomorphological characteristics. Three washing zones created by the waves action were defined: the “A” band delimits the reach point of the strongest storm waves (wave run up) for a period of approximately 10 years; the wash band “B” is polished by the action of regular storm waves; in the “C” band, incrustations of benthic communities proliferate due to being afflicted by tides and waves of all sizes. This zoning can be used for coastal management planning. It was diagnosed that the safest profiles of the rocky coasts against storm waves, are: steep cliff with height greater than 5 m, low cliff-steep cliff with height greater than 4 m, and coastal block deposits. The low cliff profiles (between 15° and 45° of inclination), as well as the platforms, generate the areas of greatest risk, especially when they belong to exposed rocky bays.

Keywords: Low sea cliff profiles; Cliffs; Storm waves run up

1 Introdução

A longa costa rochosa brasileira, constituída de rochas ígneas e metamórficas, tem aproximadamente 2000 km de extensão e é formada por 19 tipos geomorfológicos distintos, classificados como bancada, costão, falésia e campos de blocos, conforme classificação de Faria (2018). Durante as tempestades marinhas, cada um desses tipos geomorfológicos responde de forma diferente ao impacto das ondas e à ação dos fluxos de água arremessados pelas vagas. Alguns absorvem melhor esses impactos, enquanto outros não. Ou seja, existem níveis diferenciados de risco (ou segurança) para cada tipo geomorfológico.

Existem estudos sobre esta temática, principalmente na Austrália, Reino Unido e EUA, porém, geralmente focam áreas onde afloram rochas sedimentares, que suportam menos a ação das ondas, e mostram mais as questões relativas aos movimentos de massa. Finkl (2004); Kennedy (2014); Sunamura (2017); e Trenhaile (1987) publicaram extensos trabalhos sobre costa rochosa, no entanto, dão ênfase às zonas de clima temperado. O clima e o regime de ondas oceânicas dessas regiões produzem resultados geralmente distintos dos encontrados no Brasil. Além disso, a maior parte dos estudos realizados por esses autores foi feita em áreas cobertas por arenito e calcário. A erosão marinha nessas rochas produz predominantemente a forma do tipo falésia, com inclinação aproximada de 90°. Quando são altas, as falésias protegem relativamente bem o litoral contra as ondas de tempestade; no entanto, existem casos extremos. Cox, Jahn & Oona (2018) relatam que no Norte da Irlanda ondas com altura entre 5 e 10 m avançaram sobre falésias verticais com altura de 20 m e com topo plano, transportando blocos rochosos de até 612 toneladas.

São raros os estudos sobre a hidrodinâmica da costa rochosa brasileira. As rochas mais comuns são ortognaisses, paragnaisses e granitos variados, conforme CPRM (2000, 2006, 2007, 2012, 2014), e todas são muito resistentes à erosão. Faria (2018) classificou 19 variedades de formas e subformas, com costões marinhos, falésias, bancadas e campos marinhos de blocos, cada uma proporcionando hidrodinâmica distinta. A forma mais comum é a do tipo costão, com inclinação média de 30°. Segundo Emery & Kuhn (1982), a inclinação do costão (*low cliff*) origina-se da rocha resistente sob ação do intemperismo proporcionado pelo clima tropical e pelo regime de ondas com altura média de aproximadamente 1 m. Cada tipo de geomorfologia gera um nível de risco diferenciado para o uso e para a ocupação humana, considerando-se as ondas oceânicas altas e massivas. Entretanto, a falta de conhecimento sobre essa dinâmica e a expansão urbana em ritmo acelerado levaram

a ocupações equivocadas, tornando frequentes catástrofes que se tornaram difíceis de serem evitadas. Alguns eventos de tempestade de alta energia destroem edificações de vários tipos, inclusive muros de contenção.

Os riscos na costa rochosa aumentam durante os sistemas atmosféricos de frontogênese, que produzem ondas altas com pluviosidade elevada, às vezes extremas, causando movimentos de massa nas encostas litorâneas. De acordo com Milanesi & Galvani (2011), nas vertentes dos morros e montanhas do Estado de São Paulo, expostas ao oceano, chove aproximadamente o dobro do volume que se precipita nas vertentes opostas, direcionadas para o continente. Supõe-se que situação similar deve ocorrer nos outros estados do Sul e Sudeste.

Pereira & Klumb-Oliveira (2015) calcularam que no litoral exposto do Rio de Janeiro a média da altura das ondas em água rasa é de 1 m. Esses autores calcularam ainda que entre 1979 e 2010, a maior parte das ondas com altura superior a 3 m propagavam-se de SSW, SW e S, e durante esse período, foram produzidos 70 episódios com ondas acima de 4 m que atingiram a Região Sudeste. Candella & Souza (2013) observaram para a mesma região ondas extremas que chegam a 7 m. O impacto no litoral depende de como a energia é medida; pode ser pela altura das ondas ou pelo tempo de duração da tempestade. Strauch & Cuchiara (2009) estudaram as ondas em Tramandaí (RS) e calcularam que a altura máxima observada foi de 7 m, enquanto o valor máximo da altura significativa foi de 4,8 m, ambas relativas a um período de retorno de 30 anos. Para retorno de 100 anos, os autores calcularam que a altura máxima chega a 7,6 m, com altura significativa de 5,5 m. A direção das ondas de maior energia na Região Sul é mais comum de SE, segundo este último autor.

No litoral de praia arenosa a oscilação dos perfis das faces praias é constante porque se ajustam às condições das ondas, e as areias conseguem absorver parte do volume de água arremessada pelas ondas, dissipando a energia dos fluxos, como é amplamente conhecido. Na costa rochosa isso não ocorre porque a superfície é impermeável e não se ajusta às características das ondas. Além disso, cada tipo de geomorfologia responde de forma diversa à ação das ondas de tempestade. Dessa forma, O presente trabalho busca entender o limite da ação das ondas de tempestade sobre a costa rochosa, definindo níveis de risco. Foram elaborados critérios que podem auxiliar no planejamento da gestão dos litorais rochosos no Brasil, onde vivem milhões de pessoas, propondo também uma zona de segurança que pode atender aos projetos de engenharia.

Este trabalho adota a classificação de perfis da costa rochosa proposta por Faria (2018), conforme a Figura 1.

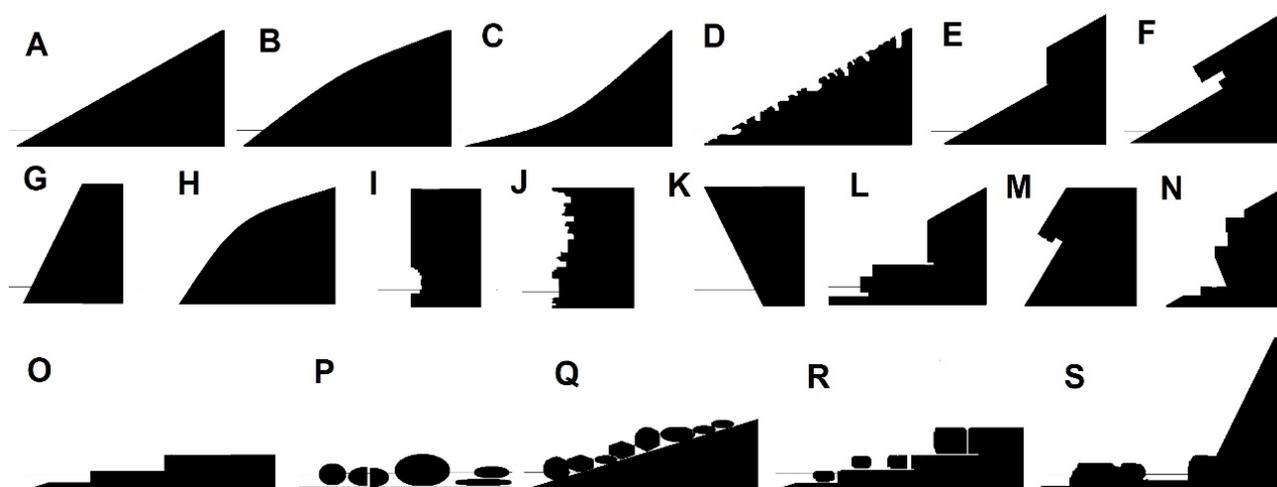


Figura 1 Os 19 tipos de perfis da costa rochosa brasileira e os subtipos de costões, falésias e campos marinhos de blocos: A. Costão retilíneo; B. Costão convexo; C. Costão côncavo; D. Costão rugoso; E. Costão-falésia; F. Costão-teto; G. Falésia inclinada; H. Falésia convexa; I. Falésia vertical e/ou suspensa; J. Falésia dentada; K. Falésia negativa; L. Falésia com bancada; M. Falésia-teto; N. Falésia composta; O. Bancada e terraço marinho; P. Campo de blocos em ambiente marinho e/ou cluster; Q. Campo de blocos sobre costão; R. Campo de blocos sobre bancada; S. Escolho – (Fonte: Faria 2018).

2 Materiais e Métodos

Foram realizados diversos estudos de campo sobre o comportamento da hidrodinâmica nos diferentes tipos de costa rochosa encontradas no País, formadas por rochas ígneas e metamórficas. Foram levados em consideração os tipos geomorfológicos mais comuns, a altura das ondas, a rugosidade da superfície da rocha e os fatores biológicos. Procurou-se ainda conhecer o limite de ação das ondas de tempestade nos costões, nas falésias e nos campos marinhos de blocos. As mensurações de campo e os levantamentos em imagens de satélite foram feitos em 233 pontos representativos, situados no Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo. Estes Estados concentram aproximadamente 97% da costa rochosa brasileira.

As mensurações foram concentradas no Estado do Rio de Janeiro em função da logística e por ser a costa rochosa mais extensa: são 872 km, ou 44 % de toda a costa rochosa brasileira, de acordo com Faria (2018). No entanto, a geologia e a geografia física litorâneas dos estados do Sul e do Sudeste são parecidas, gerando resultados similares. A exceção é o Rio Grande do Sul, porque a pequena extensão de costa rochosa é composta de rochas basálticas que dão origem à falésia vertical. Foram feitos 233 perfis longitudinais que serviram de base para os estudos, distribuídos em: 160 no Rio de Janeiro, 30 em São Paulo, 30 em Santa Catarina, 5 no Paraná, 5 no Espírito

Santo e 3 pontos no Rio Grande do Sul (Figura 2). Os dados de inclinação das rampas rochosas foram obtidos com o uso de clinômetros, trenas, nível com baliza, e mensurações nas fotografias de campo. O comprimento (terra-mar) dos costões, das falésias e dos campos de blocos foram definidos pela distância entre a linha do nível mais alto dos ambientes bentônicos cobertos por algas, moluscos e crustáceos e a linha estabelecida pela vegetação terrestre. O limite máximo é indicado pela linha de vegetação visível nas imagens de satélite e no campo, que mostra o ponto onde chegam os fluxos arremessados pelas ondas de tempestade mais fortes, considerando-se um período de 10 anos, de acordo com os levantamentos sobre altura de ondas realizados por Pereira & Klumb-Oliveira (2015).

Nos campos marinhos de blocos e nas praias rochosas foram analisados o diâmetro médio dos fragmentos de rocha pelo método de grade e contagem, a inclinação da rampa formada pelos depósitos e largura. Considerando: calhau (0,06 – 0,2 m); matacão (0,2 – 1 m), bloco pequeno (1 – 2 m), bloco médio (2 – 3 m) e bloco grande (> 3 m), segundo Blair & McPherson (1999).

Foi mensurada a velocidade das correntes longitudinais em diferentes configurações geomorfológicas da costa rochosa (formas geográficas em planta), considerando costa retilínea, costa convexa, costa dentada e campo marinho de blocos. Os dados foram correlacionados com a altura das ondas e o ângulo de interceptação das ondas pela costa, e para isso foram utilizados flutuadores,

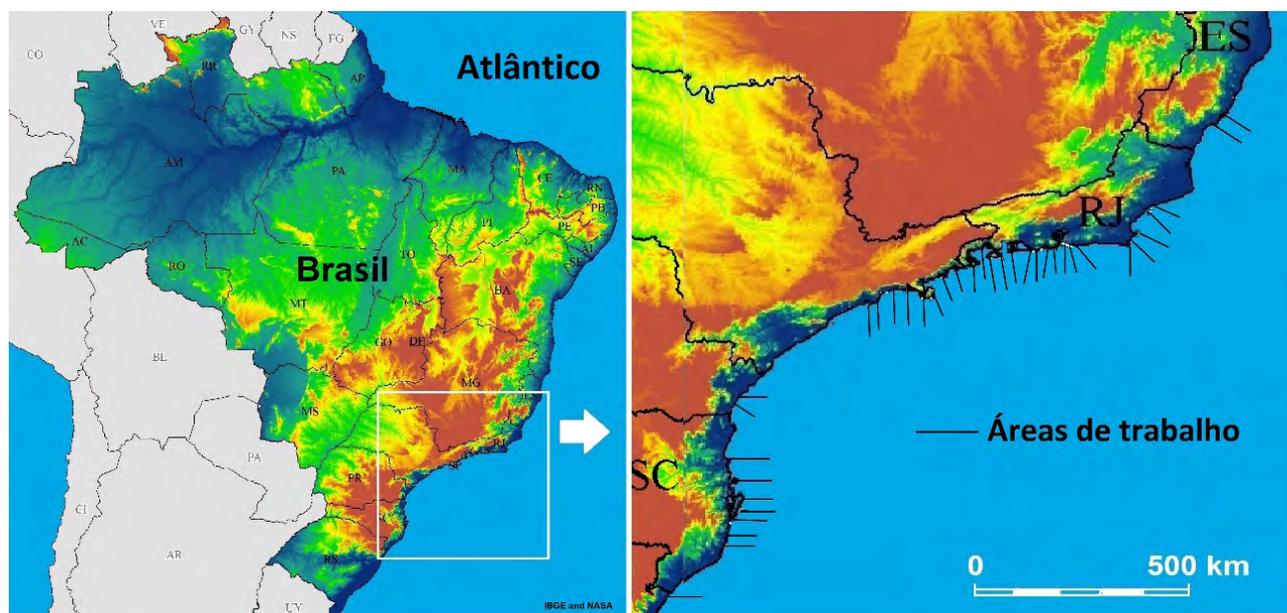


Figura 2 Localização das áreas onde foram feitos os perfis e as mensurações.

cronômetro e bússola. As mensurações foram realizadas em 5 pontos da Cidade do Rio de Janeiro, nas seguintes coordenadas: -22.9646 -43.1617; -22.9903 -43.2273; -22.9992 -43.2508; -23.0376 -43.4693; -23.0368 -43.4952; -23.0740 -43.5597. Os resultados não são definitivos, servem apenas para ilustrar a diversidade hidrodinâmica nos ambientes rochosos.

Os limites de alcance das ondas foram medidos com técnicas distintas no campo: por meio de marcas deixadas pelos resíduos sólidos flutuantes depositados pelas tempestades marinhas; pela linha-limite da vegetação no topo dos costões e falésias, visíveis nas imagens de satélite; e pelas mensurações diretas durante os eventos de tempestade.

Em teoria, a rugosidade e os “obstáculos” da superfície dos costões e das falésias podem influenciar na distância em que as ondas arremessam fluxos de água sobre as rampas, porém, em virtude da dificuldade de isolar e trabalhar esta variável, um estudo à parte está sendo desenvolvido pelo autor. No entanto, esses resultados aparecem de forma indireta nas comparações dos comprimentos dos costões.

Faria (2018) identificou três faixas horizontais paralelas sobre as rampas rochosas que indicam o alcance das ondas de tempestade, e que podem balizar níveis diferenciados de risco (Figura 3). A largura das faixas depende da inclinação da rampa e da forma do perfil, conforme propõe este trabalho:

Faixa A – Em geral, é limitada pela vegetação terrestre, podendo ser floresta ou vegetação rupestre, e

mostra o nível atingido pelos fluxos arremessados pelas ondas mais altas, geradas pelas tempestades mais fortes com recorrência em vários anos. A superfície rochosa é coberta por fungos liquenizados em vários tons de marrom que produzem cores típicas das encostas rochosas continentais.

Faixa B – É uma zona de lavagem intermediária a qual é atingida por ondas de tempestades comuns algumas vezes ao ano, e que mantém a superfície da rocha polida, apresentando a cor original. A energia hidráulica é elevada e, por isso, raramente algum tipo de organismo consegue ali se fixar.

Faixa C – É a zona inferior, influenciada diretamente pelas marés e ondas de todos os tamanhos. Nessa faixa proliferam diversos organismos marinhos, sendo dividida pelos biólogos e oceanógrafos em supralitoral e mediolitoral. Há ainda a faixa infralitoral que, de acordo com Coutinho & Zalmon (2009), fica permanentemente submersa.

3 Resultados

3.1 Costões

O perfil do tipo costão é predominante na costa rochosa brasileira, totalizando 52% dos 233 perfis analisados. Quando estão expostos a ondas de tempestade, tornam-se extremamente perigosos para o uso e ocupação humana. As inclinações mais comuns das rampas ficam entre 27° e 32°, com comprimento médio de 50 m, considerando-se a distância entre a linha que delimita a

faixa superior das comunidades bentônicas e a linha de vegetação terrestre. Nas áreas protegidas dentro das baías e nos reversos das ilhas, os comprimentos (L) são bem menores, variando entre 2 e 5 m (Tabela 1). Os costões mais extensos possuem declividades entre 15° e 25° , e são também os de maior risco. O comprimento médio é 70 m, porém, foram encontrados alguns que medem até 120 m.

Em geral, ondas de 3 m de altura podem subir costões de 30° de inclinação em até 50 m rampa acima. Porém, ondas acima de 4 m também chegam ao litoral das regiões Sul e Sudeste e atingem áreas ainda mais altas. Estes valores são aproximados em função da complexidade das variáveis; no entanto, os fatores preponderantes que influenciam são: exposição em relação à direção das ondas de tempestade, inclinação da rampa e forma da encosta. Outros fatores também podem influenciar, como a profundidade do leito marinho adjacente ao costão; distância com que as ondas quebram no costão; ângulo de interceptação das ondas pela costa; rugosidade e obstáculos da superfície rochosa; velocidade e direção do vento; altura da maré astronômica e altura da maré meteorológica, entre outros fatores menos significativos.

A linha de vegetação determina o limite máximo atingido pelos fluxos arremessados pelas ondas (Figura 4); no entanto, este limite pode funcionar somente para ondas de tempestade com recorrência aproximada de 10 anos. As tempestades que produzem vagas mais altas, com tempo de retorno ainda maior, destroem a vegetação e constroem outro limite, mais acima. Mas no decorrer de uma década a vegetação reconstrói o limite anterior. Ou seja, ao longo do tempo o “limite de segurança” das tempestades mais extremas é apagado com o crescimento da vegetação, que se expande para os níveis mais baixos. Para localizar o alcance das tempestades extremas é necessário um levantamento do diâmetro das árvores, traçando um perfil que, em alguns lugares, pode indicar as linhas das tempestades de maior energia com recorrência superior a 100 anos. Marcas de erosão no solo também servem como assinaladores.

Do mesmo modo, a morfologia das rampas influencia na extensão do costão. Nos trechos em que ocorre a convergência de fluxos de água arremessados pelas ondas, o comprimento tende a ser maior. Contudo, nas áreas em que há divergência de fluxos, como nas formas convexas, os comprimentos dos costões tendem a diminuir.

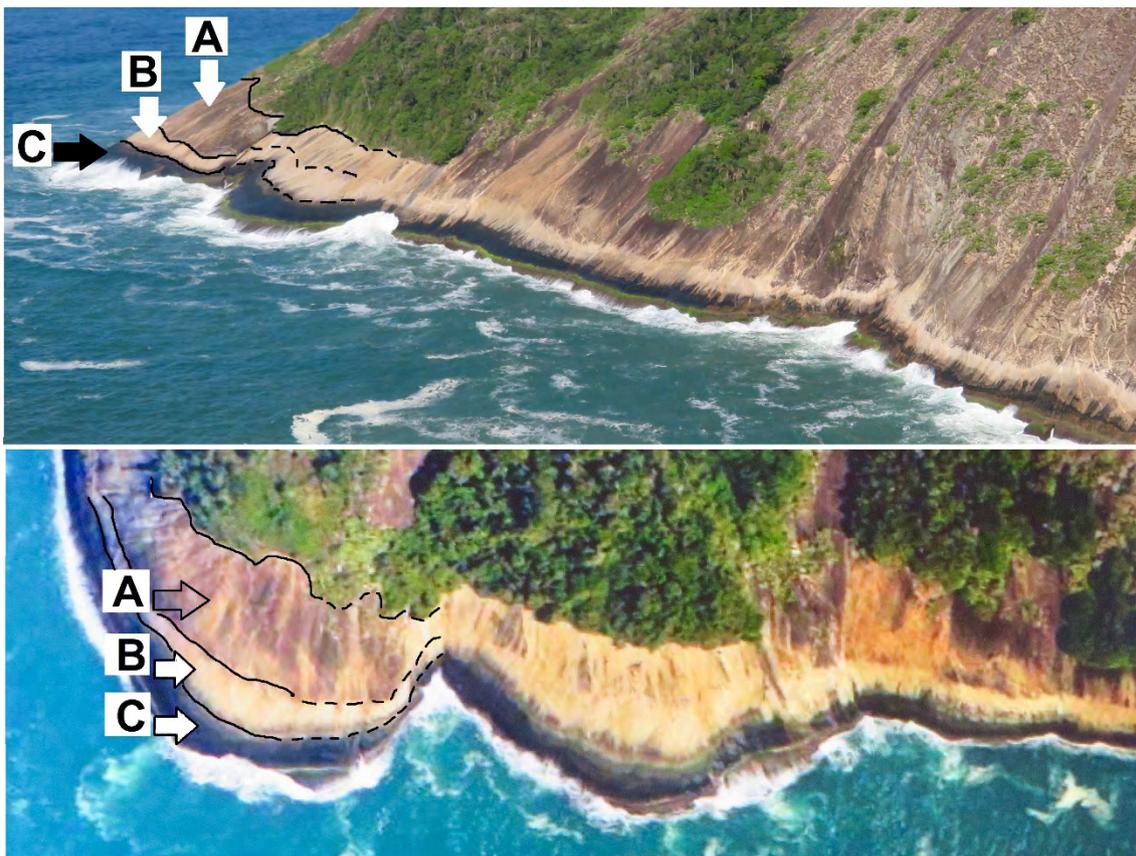


Figura 3 As duas imagens, em perfil e em planta, mostram a mesma área do litoral de Itacoatiara, Niterói, RJ. A morfologia é de costão com perfil retilíneo, apresentando as faixas A, B e C. Há uma relação direta entre a largura das faixas e a inclinação das rampas.

Tabela 1 Inclinação e comprimento médio dos costões

Classe	Costão marinho – Inclinação entre 15° e 45°				
	15°-20°	21°-26°	27°-32°	33°-38°	39°-45°
Distribuição	15%	18%	48%	12%	7%
L costa exposta (m)	70	60	50	40	30
L costa semiexposta (m)	50	40	30	20	10
L costa protegida (m)	5	4	3	2	2



Figura 4 Onda de tempestade lavando a faixa “A” e se aproximando da linha de vegetação, que marca o ponto atingido pelas vagas mais altas em um período de aproximadamente 10 anos. Leblon, Rio de Janeiro (08/12/2018).

3.2 Falésias

O perfil de falésia é comum em algumas regiões do País, onde afloram alguns tipos de rochas por causa das estruturas formadas durante a solidificação ao longo da formação: basalto, diabásio e rochas vulcânicas (Ilha da Trindade e Fernando de Noronha). No entanto, a maior parte é formada por rochas graníticas e metamórficas. O perfil vertical pode ter origem estruturas e/ou clivagem devido as direções das forças tectônicas; pode ser pelo contato entre rochas diferentes; ou pela ruptura por desagregação mecânica, segundo Faria (2018). Entre os 233 perfis analisados, 24 são falésias de diversos tipos (Tabela 2).

A hidrodinâmica produzida pelo choque das ondas contra as paredes rochosas verticais (falésias) é muito bem conhecida, como mostram, por exemplo, os trabalhos de Bagnold (1939), Trenhaile (1987), Lovholt, Lynett &

Pedersen (2013) e Sunamura (2017). Em relação à altura mínima para ser considerada falésia, este trabalho sugere 1 m sobre a base rochosa, ou a parte emersa do ambiente marinho, porque abaixo deste valor, as ondas passam por cima com facilidade. Inclusive as marés têm oscilações que ultrapassam esta altura. As rupturas de declive com altura menor que 1 m podem ser consideradas degraus sobre as rampas.

As falésias altas que possuem inclinação superior a 90°, em geral, protegem bem a costa, porém, essa proteção depende da forma do relevo. Em relevo tabular, de topo plano, a altura da falésia precisa ser 3 vezes maior que a altura das maiores ondas, como indicam Cox, Jahn & Oona (2018) em trabalho realizado na Irlanda do Norte.

Essa relação no Brasil pode ser diferente devido às condições do relevo e ao regime de ondas. A linha de vegetação que se estabelece no limite superior das falésias,

de acordo com as observações de campo, sugere que as falésias mais seguras ou eficientes, tem mais de 90° de inclinação e altura maior que 5 m. Isso parece estar de acordo com a altura das ondas que atingem as Regiões Sul e Sudeste do País. Este limite leva em consideração ondas de até 4 m de altura e mais um metro relativo ao aumento momentâneo do nível do mar local, que pode ocorrer em 3 situações: pela maré astronômica (sizígia); pela maré meteorológica produzida pelos centros de baixa pressão; durante as tempestades quando as ondas, os ventos e as correntes empilham água entre a zona de arrebentação e a costa rochosa. Entretanto, este limite deve ser maior para a “falésia inclinada”, com declividade entre 45° e 89°. Os dados de campo sugerem altura mínima entre 10 e 15 m, de acordo com a inclinação. Porém, a relação trigonométrica não é direta em função da rugosidade e da força da gravidade.

As falésias do tipo “convexa” têm perfis curvos. A parte inferior, que começa na zona de maré, normalmente tem inclinação entre 60° e 80°, e na parte superior a declividade diminui gradativamente até chegar ao perfil de costão. Foram observadas em algumas áreas ondas de 3 m chocando-se contra essas falésias, arremessando grandes volumes de água em *splash* a alturas que chegavam a 40 m. Parte desse volume é arremessada de volta, diretamente para o mar, e outra parte cai sobre a rampa em queda livre, gerando volumosos fluxos de retorno sobre a rocha. Essa dinâmica é pouco conhecida, mas produz área de alto risco e deve influenciar os processos costeiros (Figura 5).

3.3 Costão-falésia

O tipo costão-falésia é comum em toda a costa rochosa. A parte inferior, próxima ao nível do mar, é formada por rampa rochosa com inclinação entre 15° e 45° (costão), e na parte superior passa abruptamente para perfil de falésia, com inclinação em geral maior que 80°. A origem está no rompimento das placas rochosas sobre os costões, produzida pelo processo de descompressão ou esfoliação de relevo. Este tipo de falésia tem altura que varia normalmente entre 1 e 3 m, o que significa a espessura da placa rochosa. As mais espessas observadas têm entre 15 m e 20 m.

Em geral, segundo Faria (2018), esses deslocamentos desenvolvem-se em forma de arco e dão origem a dois tipos de estruturas: os horizontais formam tetos; os verticais formam diedros. Quando as ondas se chocam contra os diedros, a convergência dos fluxos e da energia pode arremessar água a alturas bem maiores.

A segurança proporcionada pelo costão-falésia depende de alguns fatores. A eficiência aumenta à medida que a face de falésia se distancia da linha de maré. Por exemplo, um costão-falésia com face de 2 m de altura e a 5 m da linha de maré não é seguro para ondas superiores a 3 m de altura. Mas se estiver localizado a 30 m a montante na rampa, os fluxos arremessados por essas ondas chegam com volume e força reduzidos, em função da força da gravidade e da resistência proporcionada pela rugosidade da superfície da rocha. Depende ainda do ângulo da face da falésia sobre o costão. Os mais eficientes têm inclinação superior a 95°, conforme exemplifica a Figura 6.

3.4 Bancadas

As bancadas são presentes de forma isolada em toda a costa rochosa do País, e é o tipo geomorfológico de maior risco, por formar plataforma rochosa de baixa inclinação, entre 0 e 15°, que não gera obstáculos à passagem dos fluxos de água arremessados pelas ondas (Figura 7).

3.5 Campos Marinheiros de Blocos

Os campos de blocos são formados por fragmentos de rocha de tamanhos variados, porém, predomina a classe “bloco”, com diâmetro maior que 1000 mm, segundo a classificação da ABNT NBR (1995), Tabela 3. Em geral, esses fragmentos de rocha são originados nos deslocamentos das vertentes rochosas que formam depósitos na base. Os maiores encontrados na costa brasileira possuem de 15 a 20 m de diâmetro. Existem também os blocos residuais formados no local pela ação do intemperismo e da erosão do embasamento rochoso. Ou seja, não sofreram transporte, como mostram Bigarella & Becker (1975) e Bigarella, Becker & Santos (1996). A fim de estabelecer uma distinção, Faria (2018) denominou este tipo de cluster de blocos.

Tabela 2 Distribuição dos tipos de falésias

Falésia – Inclinação maior que 45° e altura maior que 1 m					
Classe	Retilínea	Convexa	Inclinada	Composta	Outras
Distribuição	25%	5%	45%	15%	10%
Altura média	5 m	12 m	3 m	20 m	-



Figura 5 Falésia “inclinada”, com declividade pouco acima de 45°. A partir deste grau de inclinação, o impacto das ondas arremessa fluxos de água em todas as direções. Barra da Tijuca (RJ).

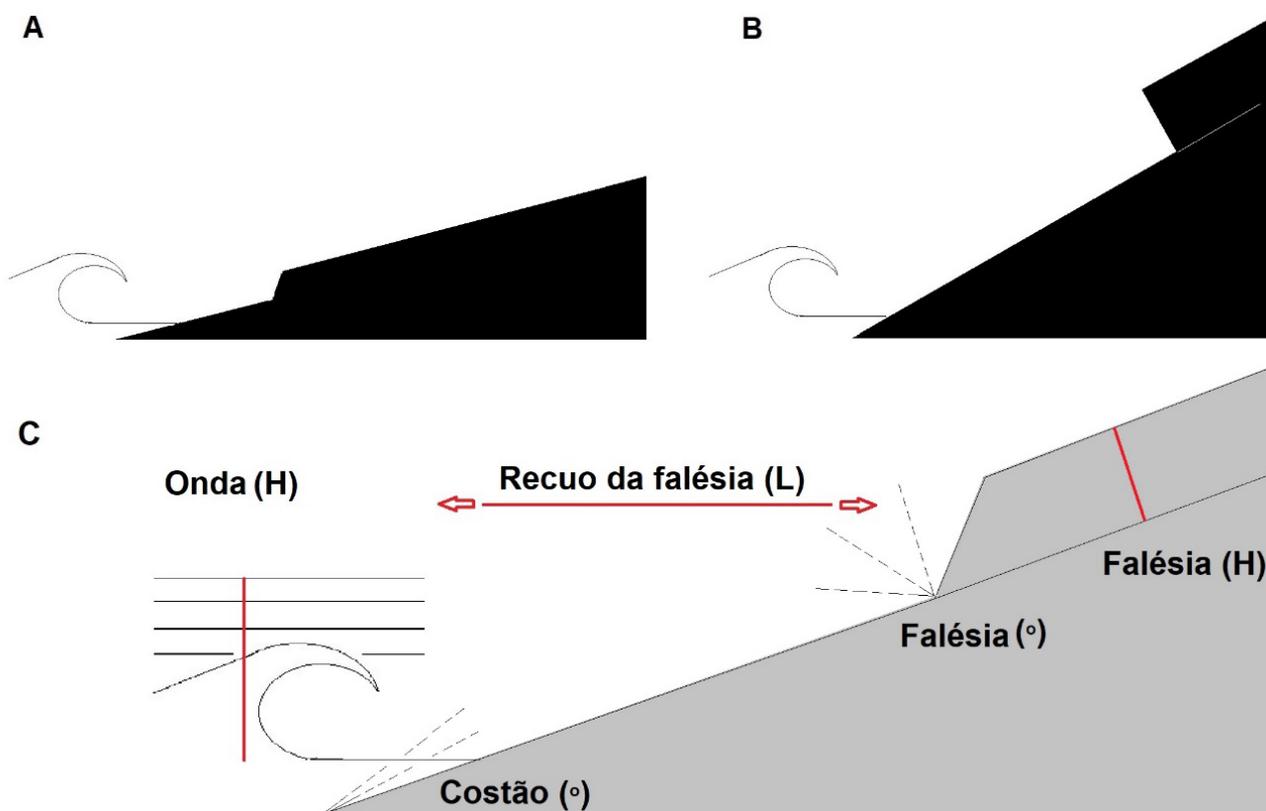


Figura 6 Os modelos A e B foram criados baseados nas observações e mensurações de campo, e representam dois exemplos distintos de nível de risco no tipo costão-falésia. A situação A. indica alto risco por ser costão com inclinação baixa; falésia baixa com inclinação positiva e próxima da linha de maré. O modelo B. ilustra área de baixo risco por ser costão com maior inclinação; falésia alta com inclinação negativa e afastada da linha de maré. O modelo C. mostra os fatores que determinam o nível de segurança: inclinação do costão, inclinação da falésia, altura da falésia, altura da onda e distância da falésia da linha de maré.



Figura 7 Onda com aproximadamente 3 m de altura arremessando fluxos de água sobre uma bancada de 5 m de altura. Itacoatiara, Niterói, RJ.

Tabela 3 Características dos campos marinhos de blocos

	Campo marinho de blocos/praias rochosas			
Diâmetro médio dos clastos (m)	0,2 - 1	1 - 2	2 - 3	>3
Distribuição (%)	30	40	20	10
L costa exposta (m)	20	20	15	15
L costa protegida preservada (m)	5	5	5	5
Inclinação da rampa (°)	15 - 26	15 - 26	15 - 26	15 - 26

Foram estudados 70 perfis de campo marinho de blocos nos litorais do Rio de Janeiro, de São Paulo e de Santa Catarina. Eles foram desenvolvidos sobre costões de baixa inclinação, sobre as bancadas ou mesmo depositados no ambiente marinho. Em geral, são eficazes na proteção do litoral contra as ondas de tempestade, conforme mostram West (2010), Carobene (2016) e Nayloor & Stephenson (2016), porém, essa proteção depende do diâmetro médio dos fragmentos de rocha e da extensão do depósito. Quanto maior o diâmetro e a extensão, maior é a eficácia da proteção. Mensurações realizadas em um campo de blocos no Recreio dos Bandeirantes (RJ), com 20 m de largura e fragmentos de rocha com diâmetro médio de 1 m, mostraram que esse depósito conseguiu dissipar o avanço das maiores ondas nas últimas décadas. Isso foi diagnosticado por intermédio da presença de linhas formadas pelos depósitos de resíduos sólidos flutuantes, que indicam o alcance máximo dos fluxos de água (Figura 8B).

4 Riscos Associados aos Perfis

Com base no que foi exposto anteriormente, tornou-se possível traçar um quadro geral dos tipos de perfis da costa rochosa que mais apresentam riscos, como sintetiza a Figura 9.

As observações de campo e os dados obtidos nas mensurações indicam que em um costão retilíneo com superfície lisa (D), o fluxo de água arremessado por uma onda chegaria à distância maior, em comparação a uma superfície rugosa (G) que cria mais resistência. Porém, a realidade é mais complexa porque são muitos os fatores envolvidos neste tipo de dinâmica. Os mais importantes são: inclinação e comprimento da rampa; altura, velocidade e frequência das ondas mais altas e amplitude de maré. As mensurações no campo sugerem que a rugosidade influencia pouco o limite máximo de alcance dos fluxos, uma vez que os costões lisos e rugosos com a mesma inclinação tiveram comprimentos parecidos.

Em linhas gerais, a rugosidade pode funcionar bem para ondas com altura menor que 2 m, com velocidade aproximada de 20 km/h, mas passa a ter menos efeito para ondas maiores. Uma onda de 4 m, muito mais volumosa, tem em média velocidade de 30 km/h e consegue arremessar água a grande distância. As observações de campo durante os eventos com ondas acima de 3 m de altura sugerem que isso ocorre porque as cavidades na superfície do costão são preenchidas rapidamente, permitindo em seguida que o maior volume de água restante suba a rampa sem a resistência da rugosidade. De qualquer forma, são necessários estudos específicos sobre este tema para melhor compreensão.



Figura 10 Onda chocando-se contra um costão-falésia em Santa Marta, SC. Parte do fluxo é arremessado em suspensão; porém, o fluxo de retorno desce com grande energia pela superfície.

5 A Influência da Configuração Morfológica da Costa Rochosa na Dinâmica Geomorfológica

A configuração morfológica da costa rochosa também precisa ser levada em consideração. Existem 12 classes, quais sejam: retilínea, promontório convexo, baía rochosa (abra), dentada, ponta e agulha, entre outras, de acordo com Faria (2018). Porém, torna-se muito complexo fazer associações dessas classes com os 19 perfis geomorfológicos existentes, porque isso gera um número altíssimo de possibilidades, e cada possibilidade cria ambiente hidrodinâmico distinto em trechos curtos de litoral (Figura 11). No entanto, essas formas são, em geral, aparentes apenas nas imagens com escala entre 1:2.000 e 1:10.000.

Um exemplo da influência da geografia são as pequenas baías rochosas (abras). As de forma triangular com a base exposta para o oceano proporcionam usualmente o afunilamento da vaga, fazendo aumentar sua altura. Isso pode desencadear o empilhamento da água e, como consequência, causar o aumento momentâneo no nível do mar local, alterando o nível de base das ondas. A combinação de baías rochosas com perfil de costão suave produz os locais de maior risco.

Para gerar modelos levando em consideração todos os tipos de formas geográficas e todos os tipos de perfis, seria necessário formular muitas equações com grande número de cálculos. A Figura 12 ilustra 4 exemplos de modelos de interação entre a configuração geomorfológica da costa rochosa e a corrente longitudinal resultante. No entanto, são muitas as possibilidades reais. Foram feitos alguns testes de velocidade da corrente longitudinal em 5 pontos com geomorfologias e perfis distintos no Rio de Janeiro, e cada um mostrou grande variabilidade, como era previsto. As maiores velocidades foram encontradas nos costões das costas retilíneas (Tabela 4), enquanto as costas dentadas e os campos marinhos de blocos quase que anulam as correntes longitudinais.

6 Proposta de Zona de Segurança para a Costa Rochosa

De acordo com Muehe (2001), o Projeto Orla, definido para o Rio de Janeiro, leva em consideração uma faixa de segurança com pelo menos 1 m acima do limite máximo de ação das ondas de tempestade na costa rochosa. Todavia, considerando os critérios discutidos anteriormente, tal como geometria dos perfis da costa rochosa, configuração morfológica em planta da costa

rochosa e a linha de vegetação que delimita a linha máxima de ação das ondas, este trabalho sugere uma “zona de segurança” com pelo menos 30 m de largura acima do limite superior dos costões, falésias, bancadas e campos de blocos (Figura 13). Talvez o critério mais importante é que a linha de vegetação que delimita a costa rochosa pode não mostrar o ponto atingido pelas ondas oceânicas extremas, com recorrência maior que 30 anos, muito menos as que ocorrem uma vez a cada 100 anos, ou em tempo maior. Strauch & Cuchiara (2009) calcularam que a cada

100 anos a costa da Região Sul do Brasil é atingida por ondas de 7,6 m de altura. As ondas mais extremas podem facilmente causar destruição da área acima da linha de vegetação; porém, as marcas deixadas por essas vagas desaparecem com o tempo porque ocorre a reconstituição ambiental, com a recolonização espontânea de vegetação rupestre, arbustos e árvores que apagam esses vestígios. Em uma década a linha superior que mostrava o limite alcançado pelas ondas mais fortes pode desaparecer por completo.

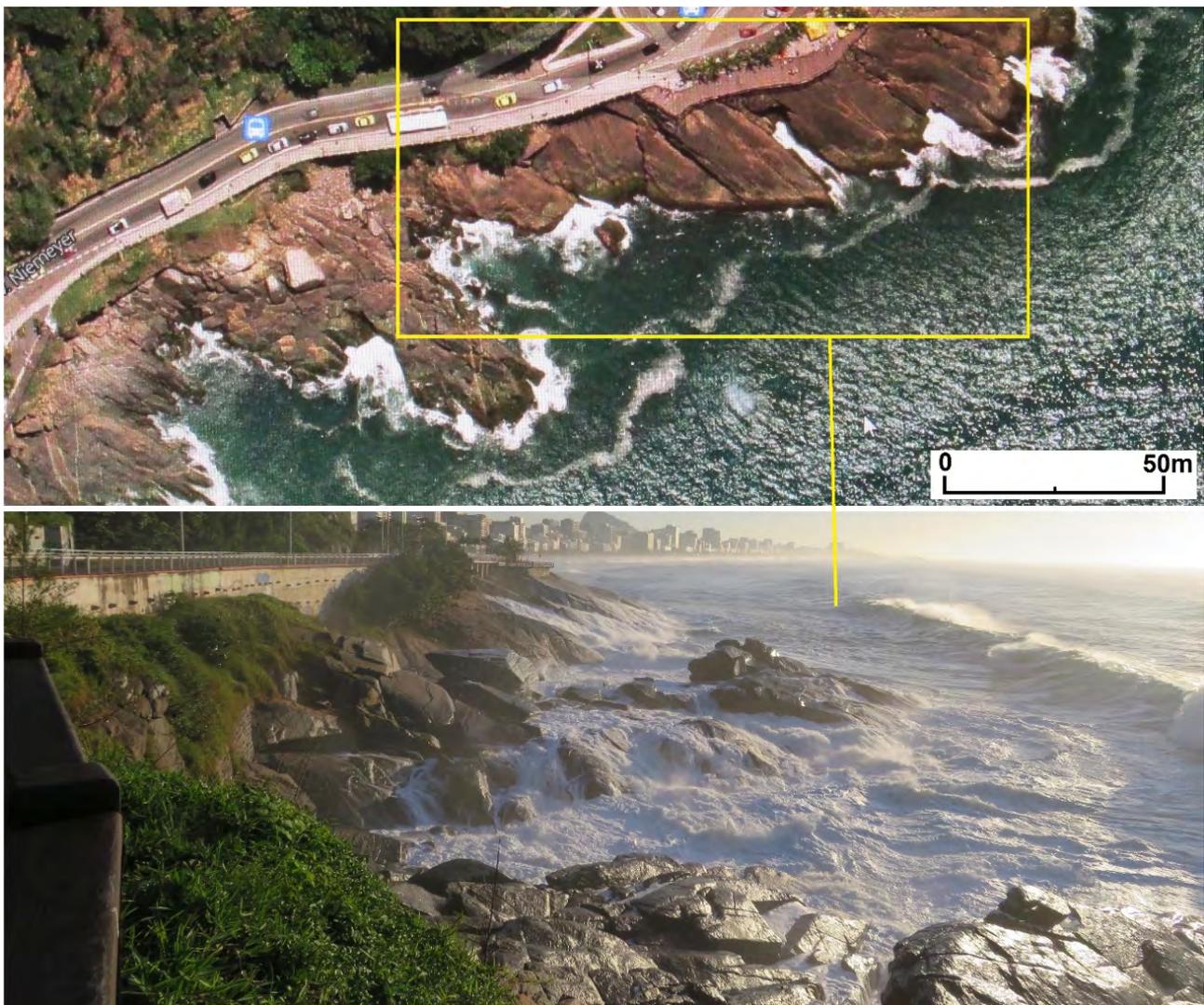


Figura 11 Exemplo de litoral dentado com abras, agulhas, pontas e chaminés. Em uma distância de 150 m, o comportamento hidrodinâmico de cada trecho de aproximadamente 25 m é bastante distinto. Alguns trechos concentram a energia das ondas, outros dispersam, outros refletem. Este mesmo segmento de costa dentada em uma imagem na escala de 1: 50.000 apareceria retificado, o aspecto dentado ficaria oculto e a hidrodinâmica local não teria como ser interpretada – (Imagem do autor).

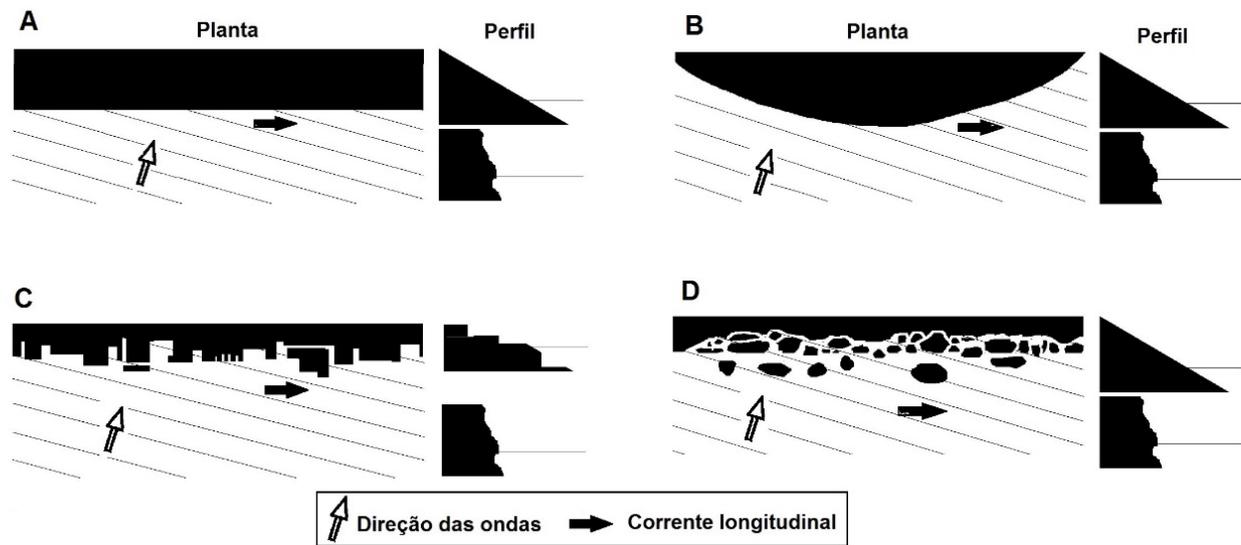


Figura 12 No modelo A., a costa rochosa é retilínea: a corrente longitudinal atinge velocidade máxima no perfil de costão, dado que este tipo reflete as ondas que sobem e descem as rampas; no perfil de falésia a corrente longitudinal tem sua velocidade bastante reduzida, já que a barreira formada pela parede rochosa vertical dissipa as ondas. O modelo B. representa costa rochosa convexa e o C. costa dentada: ambos induzem as correntes longitudinais a comportamentos diferenciados. O modelo D. representa outro extremo, refere-se a litoral de campo de blocos. Neste tipo, a corrente longitudinal tende a ter velocidade muito baixa em consequência da dissipação da energia das ondas, apesar de o ambiente marinho se tornar turbulento. Todavia, entre os blocos podem ser formados fluxos pontuais com velocidades extremas por causa da concentração de energia – Diagramas criados pelo autor.

Tabela 4 Velocidade das correntes longitudinais na costa rochosa em m/s.

Onda h	Ângulo	Costa retilínea		Costa convexa	
		V - Falésia	V - Costão	V - SW-S	V - S-SE
1 m	5°	0,0	0,1	0,0	0,1 - 0,2
2 m	9°	0,2	0,8	0,1	0,5 - 0,7
3 m	10°	0,2	0,9	0,2	0,6 - 0,8

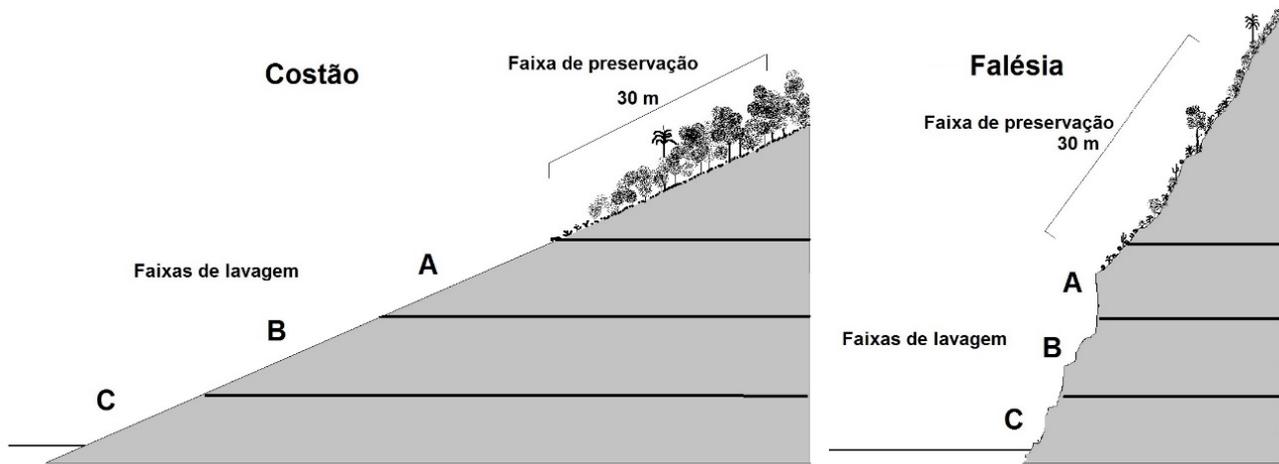


Figura 13 Proposta de “zona de segurança para a costa rochosa”.

7 Conclusão

A expansão das áreas urbanas sobre a costa rochosa indica a falta de conhecimento e descaso das pessoas e dos governos, que ocupam zonas de alto risco. Essa faixa litorânea não pode ser genericamente chamada de “costão rochoso”, porque existem formas e perfis distintos. Em geral, os que promovem maior segurança são as falésias com inclinação superior a 90° e altura superior a 5 m. Os campos de blocos também oferecem proteção adequada, mas depende do diâmetro médio dos blocos e da largura do depósito. Da mesma forma, o tipo costão-falésia pode proporcionar proteção eficaz se a falésia tiver altura maior que 4 m e se situar distante da linha de maré. As formas do tipo bancada e costão produzem zonas de risco.

As faixas de lavagem A, B e C formadas nos perfis dos costões e das falésias são importantes para indicar o ponto-limite a que chegam as ondas de tempestade. Todavia, tempestades extremas com recorrência superior a 30 anos podem produzir ondas muito altas que ultrapassam o limite estabelecido pela vegetação, e isso justifica a criação da “zona de segurança para a costa rochosa”.

Muitos estudos ainda são necessários para uma compreensão mais ampla da hidrodinâmica da costa rochosa brasileira, que recebe pouca atenção da comunidade científica e do poder público.

8 Referências

- Associação Brasileira de Normas Técnicas 1995, *Rochas e solos – Terminologia*, NBR 6502/95. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=4050>
- Bagnold, R.A. 1939, ‘Interim Report on Wave-Pressure Research’, *Journal of the Institution of Civil Engineers*, vol. 4, no. 12, pp. 202-26. <http://dx.doi.org/10.1680/ijoti.1939.14539>
- Bigarella, J.J. & Becker, R.D. 1975. ‘International Symposium on the Quaternary’, *Boletim Paranaense de Geociências*, vol. 33.
- Bigarella, J.J., Becker, R.D. & Santos, G.F. 1996, *Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais*, Editora da UFSC, Florianópolis.
- Blair, T.C. & McPherson, J.G. 1999, ‘Grain-size and textural classification of coarse sedimentary particles’, *Journal of Sedimentary Research*, vol. 69, no. 1, pp. 6-19. <http://dx.doi.org/10.2110/jsr.69.6>
- Candella, R.N. & Souza, S.M.L. 2013, ‘Ondas oceânicas extremas na costa sul-sudeste brasileira geradas por ciclone com trajetória anormal’, *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 28, no. 4, pp. 441-56. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000400010>
- Carobene, L. 2016, ‘Marine notches and sea-cave bioerosional grooves in the Legurian Coast – Italy’, *Journal of Coastal Research*, vol. 31, no. 3, pp. 536-56. <http://dx.doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00068.1>
- Coutinho, R. & Zalmon, I.R. 2009, ‘O Bentos de costões rochosos’, in R.C. Pereira & A. Soares-Gomes (eds), *Biologia Marinha*, Interciência, Rio de Janeiro, pp. 281-98. ISBN 978-85-7193-213-5
- CPRM - vide Serviço Geológico do Brasil.
- Cox, R; Jahn, K.L., & Oona, G. 2018, ‘Extraordinary boulder transport by storm waves (west of Ireland, winter 2013–2014), and criteria for analysing coastal boulder deposits’, *Earth-Science Reviews*, vol. 177, pp. 623-36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.014>
- Emery, K.O. & Kuhn, G.G. 1982, ‘Erosion of rock shores at La Jolla, California’, *Marine Geology*, vol. 37, pp. 197-208. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(80\)90101-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(80)90101-2)
- Faria, A.P. 2018, ‘Dinâmica geomorfológica da costa rochosa do Estado do Rio de Janeiro’, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, vol. 19, no. 1, pp. 189-206. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v19i1.718>
- Finkl, C.W. 2004, ‘Coastal classification systematic approaches to consider in the development of a comprehensive scheme’, *Coastal Planning & Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 166-213. [https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2004\)20\[166:CCS ATC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2112/1551-5036(2004)20[166:CCS ATC]2.0.CO;2)
- Kennedy, D.M. 2014, ‘The Rock Coast of Australia’, in D.M. Kennedy (ed.), *Rock Coast Geomorphology: A Global Synthesis*. The Geological Society of London, memoir vol. 40, pp. 235-45. <http://dx.doi.org/10.1144/M40.14>
- Lovholt, F., Lynett, P. & Pedersen, G. 2013, ‘Simulating run-up on steep slopes with operational Boussinesq model’, *Nonlinear Processes in Geophysics*, vol. 20, pp. 379-95. <http://dx.doi.org/10.5194/npg-20-379-2013>
- Milanesi, M.A. & Galvani, E. 2011, ‘Efeito orográfico na Ilha de São Sebastião (Ilhabela)’, *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 9, pp. 69-79. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v9i0.27516>
- Muehe, D. 2001, ‘Critérios morfodinâmicos para o estabelecimento de limites da orla costeira para fins de gerenciamento’, *Revista Brasileira de Geomorfologia*, vol. 2, no. 1, <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v2i1>.
- Nayloor, L.A. & Stephenson, W.N. 2016, ‘Geomorphological control on boulder transport and coastal erosion before, during and after an extreme extra-tropical cyclone’, *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 41, no. 5, pp. 685–700. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3900>
- Pereira, N.E.S. & Klumb-Oliveira, L. 2015, ‘Analysis of the influence of ENSO phenomena on wave climate on the central coast of Rio de Janeiro, Brazil’, *Journal International Zone Management*, vol. 15, no. 3, pp. 353-70. <http://dx.doi.org/10.5894/rgci570>
- Serviço Geológico do Brasil 2000, *Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro*, Serviço Geológico do Brasil.
- Serviço Geológico do Brasil 2006, *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*, Serviço Geológico do Brasil.
- Serviço Geológico do Brasil 2007, *Carta Geológica Folha Volta Redonda*, Serviço Geológico do Brasil.
- Serviço Geológico do Brasil 2012, *Geologia e Recursos Minerais da Folha Macaé*, Serviço Geológico do Brasil.

Serviço Geológico do Brasil 2014, *Mapa Geológico do Estado de Santa Catarina*, Serviço Geológico do Brasil.

Strauch, J.C. & Cuchiara, D.C. 2009, 'O padrão das ondas de verão e outono no litoral sul e norte do Rio Grande do Sul', *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 14, no. 4, 29-37. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v14n4.p29-37>

Sunamura, T. 2017, *Geomorphology of Rocky Coasts*, Chichester, U.K. ISBN-10: 9780471917755

Trenhaile, A.S. 1987, *The Geomorphology of Rock Coasts*, Oxford University Press, U.K. ISBN 704-1-81437-240-5

West, T.R. 2010, *Geology Applied to Engineering*, Waveland Press, Inc. London, U.K. ISBN 18: 978-1-4786-3500-0

Financiamento

O presente trabalho não recebeu financiamento.

Conflito de interesse

O autor não possui potenciais conflitos de interesse.

Disponibilidade dos dados

Não se aplica.

Editora chefe

Dra. Claudine Dereczynski

Editor Associado

Dr. Silvio Roberto de Oliveira Filho

Como citar:

Faria, A.P. 2022, 'Critérios Geomorfológicos e Hidrodinâmicos para Definir Zonas de Segurança na Costa Rochosa Brasileira', *Anuário do Instituto de Geociências*, 45:41724. https://doi.org/10.11137/1982-3908_45_41724