

EROSÃO EM FALÉSIAS COSTEIRAS E MOVIMENTOS DE MASSA NO RIO GRANDE DO NORTE, NORDESTE DO BRASIL

COASTAL CLIFF EROSION AND MASS MOVEMENTS IN RIO GRANDE DO NORTE, NORTHEASTERN BRAZIL

Breno Marques Ferreira da SILVA, Olavo Francisco dos SANTOS JÚNIOR, Osvaldo de FREITAS NETO, Ada Cristina SCUDELARI

Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Avenida Senador Salgado Filho, 3000 - Lagoa Nova, Natal – RN.
E-mails: brenomarquesfs@gmail.com; olavo@ct.ufrn.br; osvaldocivil@ufrn.edu.br; ada@ct.ufrn.br

Introdução
Descrição da Área de Estudo
Metodologia
Resultados e Discussões
 Características Morfológicas e Tipos de Processo de Instabilização
 Barreira do Inferno
 Pirangi do Norte
 Tibau do Sul
 Baía Formosa
Propriedades Geotécnicas
 Ensaio de resistência a compressão simples
 Ensaio de resistência ao cisalhamento
Processos de Erosão e Movimentos De Massa
Proposta de um Modelo para o Recuo das Falésias
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - A região costeira do Estado do Rio Grande do Norte (RN), no nordeste do Brasil é constituída por materiais sedimentares que formam tabuleiros costeiros, dunas, falésias e praias arenosas. A exuberância paisagística dessa área representa um atrativo para a ocupação humana e desenvolvimento de atividades turísticas. Esse processo de urbanização potencializa a ocorrência de movimentos de massa nas falésias, resultante do aumento da carga no topo das falésias, remoção da vegetação e aumento da erosão superficial. Estudos anteriores desenvolvidos nas falésias da região indicam que a linha de costa se encontra em processo de recuo, o que põe em risco a infraestrutura instalada e seus usuários. O presente artigo visa compreender os mecanismos de movimentos de massas que ocorrem nas falésias e resultam no seu recuo. O trabalho sistematiza as informações existentes, adiciona observações de campo e propõe um modelo conceitual contemplando os mecanismos de ruptura e processos erosivos identificados, ao longo da porção sul do litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte. Os principais mecanismos identificados estão diretamente relacionados à erosão superficial em episódios de chuvas intensas, umedecimento do material e a erosão basal, caracterizada pela remoção de material do pé das falésias, devido a ação das ondas.

Palavras-chave: Mecanismos de ruptura, Recuo de falésias, Movimentos de massa, Erosão, Formação Barreiras.

ABSTRACT - The coast of the State of Rio Grande do Norte (RN) at the Northeast of Brazil is formed by sedimentary materials that form tablelands, dunes, cliffs and sandy beaches. The natural beauties of this area motivate occupation and tourist activities. This process of urbanization enhances mass movements, resulting from the increase of load, superficial erosion and removal of vegetation. Previous studies show that the coastline is in the process of retreat. This fact represents hazard to population and tourism industry. The present paper aims to better understand the mechanisms of mass movements and consequently seacliff retreat. Also, this research summarizes existing information, adds field observations and proposes a conceptual model that explains the mechanisms of failure and erosive processes identified. Additionally erosive processes are identified along the studied area. The main mechanisms identified are directly related to surface erosion, wetting of the material and basal erosion.

Keywords: Failure Mechanisms, Cliff Retreat, Mass Movements, Erosion, Barreiras Formation.

INTRODUÇÃO

A região costeira consiste na transição entre o continente e o mar, tendo como interface a linha de costa. Essa região está submetida a diversos processos naturais que resultam em variações sazonais na posição da linha de costa. Tais variações resultam da retirada e da alimentação de sedimentos na praia pela ação de correntes, ondas e ventos. Quando o volume de material retirado é igual ao que é acrescido pelos

processos vigentes, se estabelece um equilíbrio dinâmico. Esse equilíbrio pode ser quebrado por alterações antrópicas ou mesmo naturais, o que leva a processos de erosão, quando o volume retirado é maior que o acrescido ou em acreção quando ocorre o contrário. O estudo dessa dinâmica é importante no sentido de identificar áreas adequadas e impróprias para a ocupação, tendo em vista o grande atrativo econômico e

ambiental para uso e ocupação do solo nessa região.

Os processos erosivos costeiros resultam no movimento da linha de costa em direção ao continente. Esse é um processo dinâmico natural que envolve perdas de terras e mudanças nas paisagens naturais, que é governado, principalmente pelas condições geológicas, marinhas, climáticas e antrópicas da região (Sunamura, 2015; Brooks et al., 2012; Belov et al., 1999). A ocupação desordenada da linha de costa causa um importante conflito socioeconômico, o qual envolve riscos potenciais à população. Esse conflito se torna evidente devido ao desenvolvimento de infraestrutura nas cidades litorâneas, à elevada densidade populacional dessas áreas e às alterações climáticas que tendem a acelerar os processos erosivos atuantes no litoral.

O litoral do estado do Rio Grande do Norte é formado por praias arenosas, falésias e campos de dunas. As praias arenosas resultam da deposição marinha de sedimentos em função da dinâmica costeira. Esses sedimentos são transportados pela ação eólica e depositados quando há mudança de direção ou diminuição da velocidade do vento, formando campos de dunas. Em boa parte do litoral do RN ocorrem as falésias, as quais consistem em desníveis no relevo, formados principalmente pela ação do mar em rochas sedimentares da Formação Barreiras. Outra feição típica da costa do RN é a presença de arenitos de praia paralelos a linha de costa, os quais servem de proteção contra ação

das ondas.

O estudo da estabilidade de falésias é importante, uma vez que em muitos casos, as consequências de rupturas envolvem perdas de residências e infraestrutura (Collins & Sitar, 2008). Esse tema é motivo de diversas pesquisas por todo o mundo, tais como: na América do Sul (Blanco-Chao et al., 2014), Estados Unidos da América (Young & Ashford, 2008; Young, 2015), Inglaterra (Quinn et al., 2009; Moore & Davis, 2014), Itália (Martino & Mazzanti, 2013). Isso decorre da necessidade de se entender as causas das rupturas, a sua relação com as características dos materiais, bem como os mecanismos e fenômenos que contribuem diretamente para o recuo costeiro.

As falésias presentes na costa do RN têm sido objeto de estudos com vistas a identificação dos tipos de movimentos de massas e na compreensão dos mecanismos de recuo (Braga, 2005; Scudelari et al., 2005; Santos Jr. et al., 2006; Nascimento, 2009; Santos Jr. et al., 2011), à avaliação das propriedades geotécnicas dos materiais que formam os taludes (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Barbosa, 2017; Taquez, 2017) e à análise de sua estabilidade (Severo, 2005; Souza Jr., 2013; Ribeiro, 2015; Silva et al., 2016; Taquez et al., 2016; Barbosa, 2017; Taquez, 2017). Tais estudos se referem a áreas específicas. O presente trabalho revisa, reinterpreta e sistematiza o conhecimento produzido nos estudos relacionados às falésias do litoral do RN e propõe um modelo que representa o padrão de recuo vigente na região.

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O litoral oriental do RN, nordeste do Brasil, apresenta direção aproximada Norte-Sul, limitando-se ao sul pelo Rio Sagi (município de Baía Formosa) e ao norte pelo Cabo Calcanhar, no município de Touros (Muehe, 2006; Amaro et al., 2012). Este setor possui 166 km de extensão total, distribuídos em 101 km (61%) de praias arenosas planas e estreitas e 65 km (39%) de falésias ativas da Formação Barreiras (Muehe, 2006). A área objeto de estudo está situada no litoral oriental do RN, situa-se entre o limite sul (Baía Formosa) e ao norte pelo município de Natal. Toda a área de estudo possui 80 km de extensão total. A figura 1 mostra a localização da área estudada e o contexto geológico-geomorfológico regional.

De forma geral, os elementos de relevo predominantes no litoral são os tabuleiros

costeiros, os campos de dunas e as planícies. Além disso, observa-se também a presença de linhas de recifes de arenitos, aproximadamente paralelas a linha de costa, que alteram o padrão de arrebentação das ondas (Muehe, 2006).

Os Tabuleiros Costeiros consistem em um relevo plano com altitude variando de 40 a 120 metros. Nas regiões próximas a linha de costa, em alguns trechos esses tabuleiros entram em contato com o mar, provocando a formação de falésias. Assim, as falésias objeto do presente estudo, consistem na borda dos tabuleiros, as quais foram formadas principalmente pela ação erosiva do mar. As falésias são consideradas ativas quando ainda se verifica a ação das ondas e correntes na sua base. Quando o mar não atinge o pé da encosta, a falésia é considerada inativa ou morta. Na área

estudada observam-se falésias com altura de até 50 metros e ângulo de inclinação variando de 40° a 90° (Figura 2a).

Os campos de dunas se localizam em regiões próximas ao litoral e resultam do acúmulo de

sedimentos arenosos transportado pelo vento, a partir das praias arenosas que formam a planície marinha (Figura 2b). Na região observa-se também a ocorrência de planícies fluviais nos rios que cortam a região.

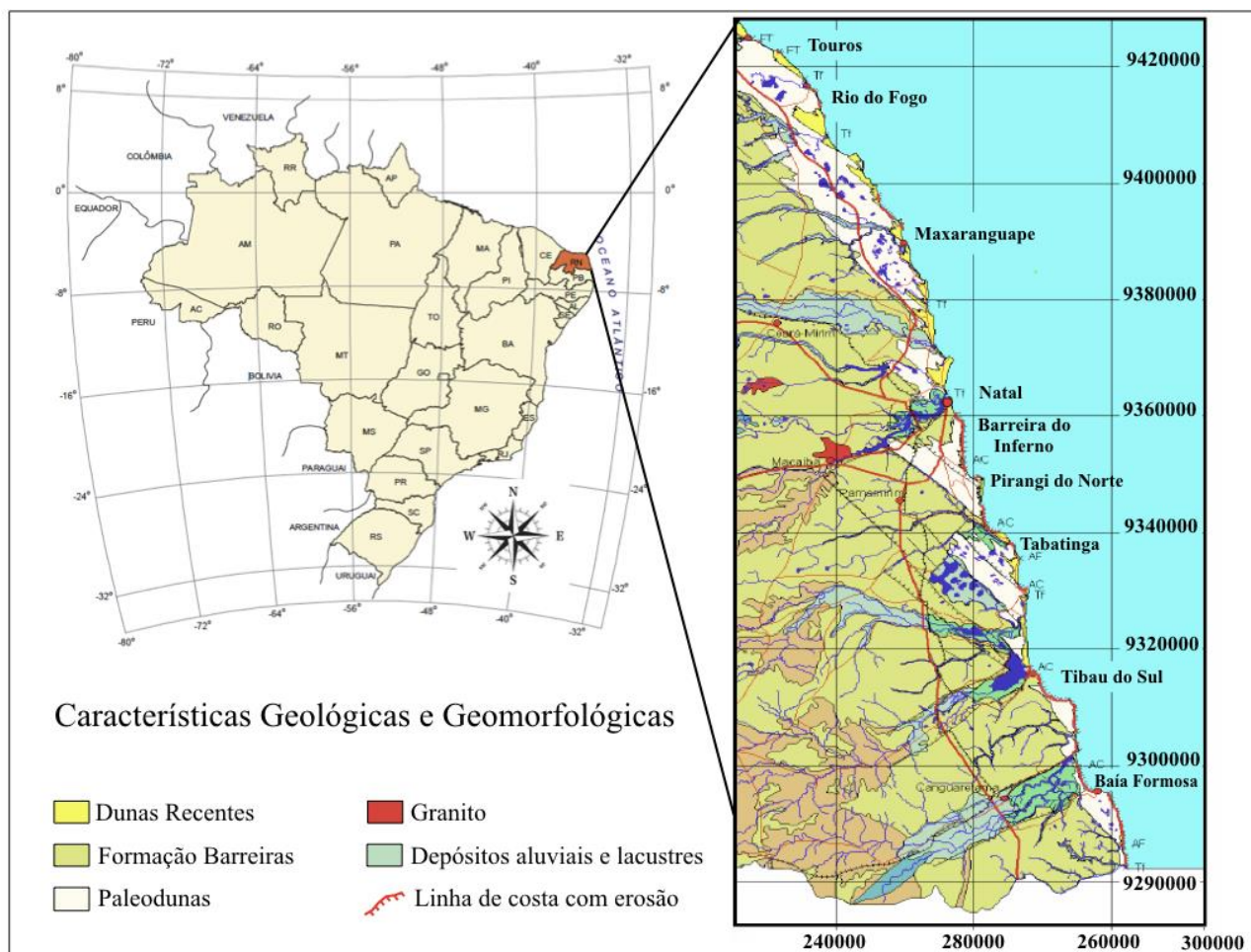


Figura 1 - Mapa do litoral do RN com destaque para as áreas estudadas, da porção mais ao sul em direção ao norte: Baía Formosa, Tibau do Sul, Pirangi do Norte, Barreira do Inferno. (Adaptado de Diniz, 2002).

Em termos geológicos, os tabuleiros consistem de material sedimentar da Formação Barreiras, depositados a partir do Mioceno até o Plioceno. A Formação Barreiras é composta principalmente por arenitos finos a médios, ou conglomeráticos, avermelhados, com intercalações sílticas, argilosa e cauliniticas; por vezes síltico-argilosos e argilitos depositados em ambiente aluvial (Diniz, 2002; Piérri, 2008). Em alguns locais ocorre a cimentação ferruginosa dos sedimentos, o que formam camadas com maior rigidez e resistência que as camadas adjacentes. A diversidade das características da área, sobretudo na geologia e das propriedades de resistência dos sedimentos, exerce influência direta no entendimento dos processos erosivos e movimentos de massa.

Na área de estudo, destaca-se o domínio das ondas de sudeste, as quais são responsáveis por uma deriva litorânea no sentido Sul-Norte, atuando

praticamente durante todo o ano. Ao longo da linha da costa do RN, registra-se uma grande sequência de baías em forma de zeta. Essa peculiaridade, lhe confere uma assinatura característica diferenciada, com relação ao restante da costa brasileira (Diniz, 2002). A altura máxima das marés varia de 2,5m a 3,3m, respectivamente durante marés de quadratura e sizígia (Vital et al., 2008).

A área apresenta de forma geral clima tropical chuvoso quente, com temperatura média anual de 25,7 °C e umidade relativa média anual variando de 74% a 80%. A estação chuvosa está compreendida entre os meses de fevereiro a agosto, quando os totais mensais (média) variam de 90 a 230 mm e precipitações anuais de aproximadamente 1261mm (Severo, 2005; Severo 2011; Souza Júnior, 2013; Diniz, 2002; Nascimento, 2009; Barbosa, 2017).

Diferentes regiões foram estudadas ao longo do

litoral oriental do RN, destacando-se as áreas com ocupação humana, Tibau do Sul (Scudelari et al., 2005; Santos Jr. et al., 2006; Severo, 2005; Ribeiro, 2015; Silva et al., 2016; Taquez et al., 2016), Baía

Formosa (Souza Júnior, 2013), Pirangi do Norte (Nascimento, 2009), bem como a Barreira do Inferno (Barbosa, 2017; Taquez, 2017) a qual apresenta-se livre de interferências antrópicas.

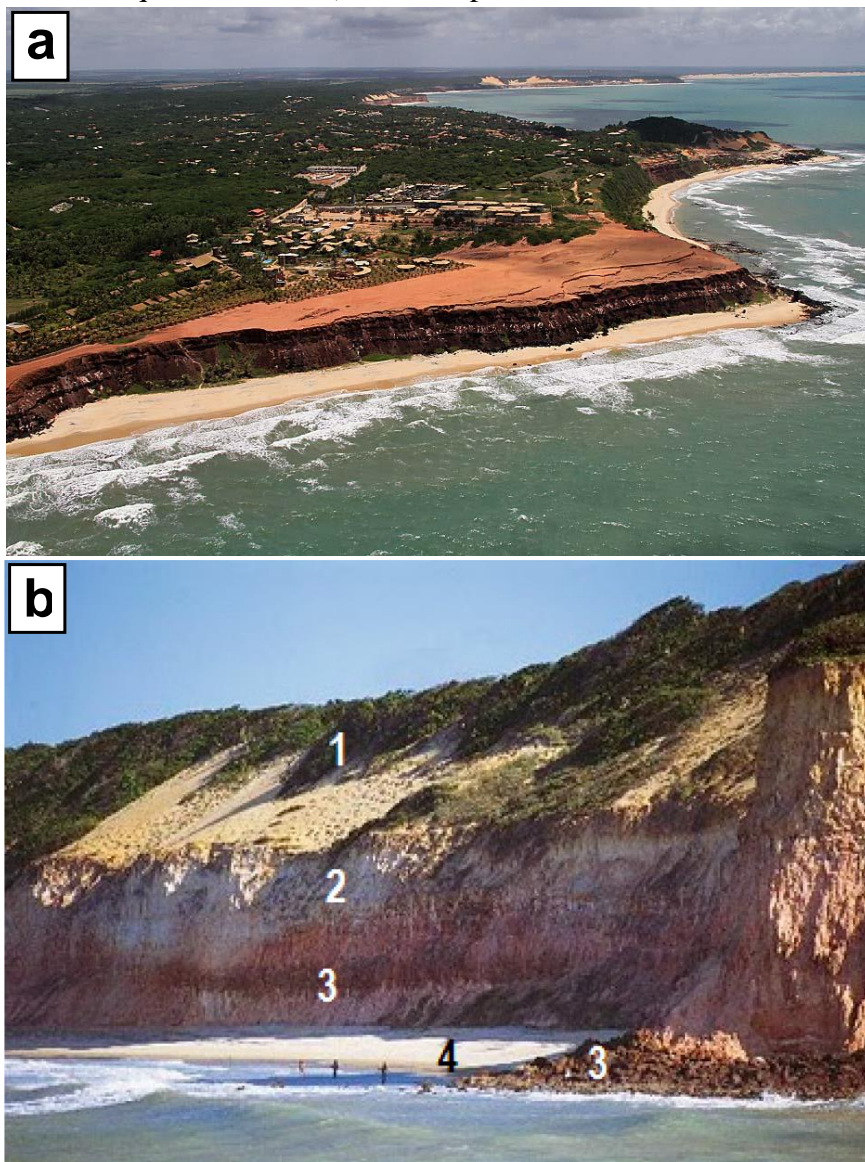


Figura 2 – a) Foto aérea do Chapadão situado na Praia de Pipa/RN, litoral sul do Rio Grande do Norte. Observar a presença de Tabuleiro Costeiro e Falésias com inclinação em torno de 40°, as quais consistem na borda dos tabuleiros (Fonte: caninde.soares.com). **b)** Dunas (1) cobrindo falésia da formação Barreiras (2) e (3); Praia arenosa (4).

METODOLOGIA

Inicialmente foi feito um levantamento sobre os estudos já realizados na região costeira oriental do RN, a sul de Natal envolvendo processos erosivos e movimentos de massas em falésias.

Foram identificados trabalhos sobre tipos de movimentos de massas, propriedades mecânicas dos materiais que formam as falésias e mecanismos de recuo das falésias. Os estudos anteriores enfocam aspectos de áreas específicas. No sentido Norte para Sul foram analisados trabalhos das seguintes áreas: Barreira do Inferno, Pirangi do Norte, Tibau do Sul e Baía

Formosa.

Os trabalhos foram analisados com o objetivo de realizar a interpretação conjunta dos dados, tendo em vista que embora desenvolvidos em áreas distintas, se referem as mesmas unidades geomorfológicas e geológicas. Em seguida, todas as áreas foram objeto de inspeções de campo detalhadas com o objetivo de confirmar os aspectos mencionados nos trabalhos anteriores. Nesse sentido, foram observadas as características geométricas das falésias (altura e inclinação), a existência ou não de proteção na base da falésia, seja pela presença de faixa de

praia ou de blocos de arenito, as características mecânicas dos materiais por meio expedito (tátil-visual) e identificados os tipos de movimentos de massas da área.

A partir da análise dos dados de propriedades físicas e mecânicas foram feitas análises estatísticas de índice de vazios, resistência a compressão simples e dos parâmetros de resistência dos materiais (coesão e ângulo de atrito). Foram também observadas e analisadas as alterações nos parâmetros de resistência em

função do aumento do teor de umidade do material com vistas a avaliar o efeito da infiltração de água sobre as condições de estabilidade das falésias.

Por fim, com base na interpretação conjunta das observações de campo, da comparação com os mecanismos descritos nos diversos trabalhos e das análises das propriedades geotécnicas dos materiais das falésias foram propostos modelos conceituais que explicam o processo de recuo da linha de costa da área estudada.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Características Morfológicas e Tipos de Processo de Instabilização

Barreira do Inferno

A Barreira do Inferno está localizada na Rota do Sol, a aproximadamente 12 km ao Sul de Natal/RN, no município de Parnamirim/RN. Trata-se de uma área militar conhecida como Centro de Lançamentos da Barreira do Inferno (CLBI), indexado ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial - DCTA do Governo Brasileiro. O trecho estudado é uma área protegida, a qual compreende aproximadamente 2,5 km de extensão (Taquez, 2017).

As falésias apresentam alturas de 25 a 60 m e inclinações variando de 45° a 80° (Taquez, 2017). Os principais movimentos de massa (tombamentos, quedas de blocos e escorregamentos) ocorrem em locais de maior presença de fendas de tração (Taquez, 2017). Não há registros de movimentos de massa de grande profundidade na área (Barbosa, 2017).

Por se tratar de área militar protegida, o trecho estudado encontra-se livre de interferências antrópicas, tais como residências e infraestruturas urbanas. A cobertura vegetal da área é formada por mata atlântica, vegetação de tabuleiro e restinga (Barbosa, 2017).

Pirangi do Norte

A praia de Pirangi do Norte/RN está localizada no município de Parnamirim/RN, à aproximadamente 20 km ao sul de Natal. O trecho estudado abrange uma faixa de praia de cerca de 1 km de extensão (da praia de Cotovelo até a praia de Pirangi do Norte/RN).

Toda essa área é caracterizada pela presença de tabuleiros na parte superior, falésias e a planície costeira na parte inferior, as quais observa-se a ocorrência de recifes de arenitos atuando como proteção natural das encostas (Nascimento, 2009).

A área de Pirangi do Norte/RN é consideravelmente ocupada pelo homem, com diversos empreendimentos imobiliários na linha de encosta (Figura 3.a). Observa-se a contribuição antrópica em processos erosivos, através do despejo de águas pluviais na zona de praia (Nascimento, 2009). Algumas áreas são recobertas por vegetação de restinga, cerrado, caatinga e cobertura vegetal da mata-atlântica (Piérri, 2008). A maior parte da área é coberta por vegetação tanto na sua borda, como na face das encostas (Nascimento, 2009).

Em vários trechos observam-se indícios de erosão, ocasionados pelo solapamento do sopé da falésia, resultado da ação direta do mar (Figura 3.b). Além disso, em alguns pontos percebe-se a ocorrência de movimentos de massa tais como, deslizamentos e tombamentos (Nascimento, 2009).

Tibau do Sul

O município de Tibau do Sul/RN localiza-se a aproximadamente 60 km ao sul de Natal/RN. A área estudada de Tibau do Sul/RN é limitada pela margem sul da laguna Guarairas ao norte; e pelo canal do Rio Catú, o que corresponde a um segmento de 16 km.

Essa região é formada predominantemente pela Formação Barreiras, onde ao longo de toda a sua extensão ocorrem falésias ativas com altura variando de 20 a 40 metros. Os perfis mais comuns na região apresentam inclinações próximas de 90°, até inclinações de aproximadamente 45° (Silva et al., 2016).

Observam-se processos erosivos e de movimentos de massa associados principalmente a fortes chuvas e ação das ondas direta na base das falésias. Os movimentos de massa mais observados em toda a área são as quedas de blocos, que acumulam sedimentos (talus) na base das falésias (Santos Jr. et al., 2006).

Nos períodos chuvosos ocorre maior incidência de processos de desestabilização nas falésias, que somam àqueles causados juntamente pela ação das águas do mar

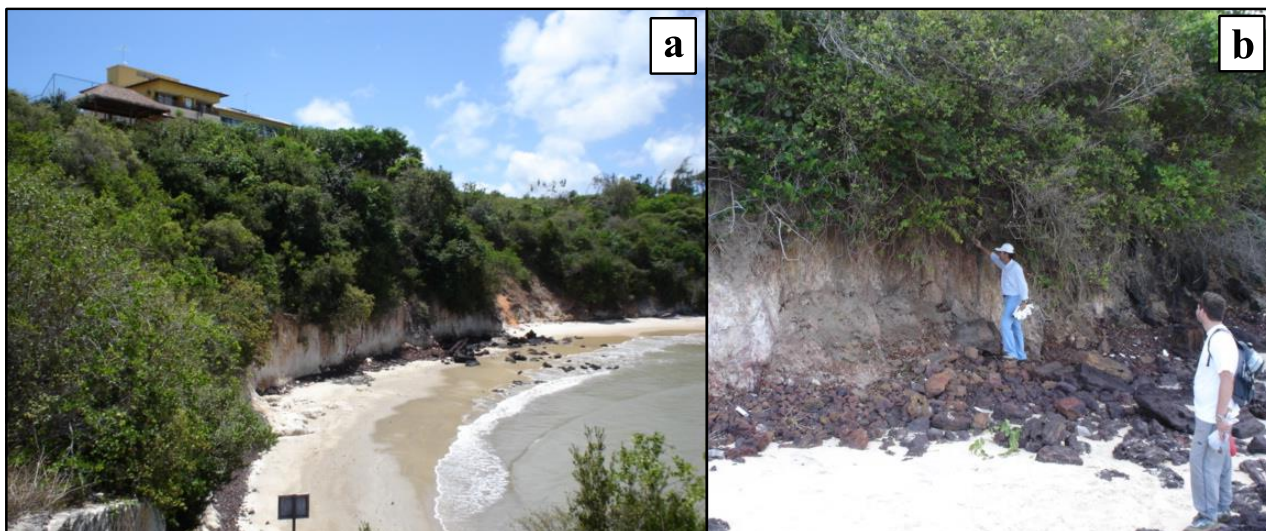


Figura 3 - Fotos da praia de Pirangi do Norte. **a)** Ocupação humana na borda das falésias mediante empreendimentos turísticos; **b)** Presença de vegetação e indícios de erosão (solapamento) na base das falésias (Retirado de Nascimento, 2009).

Em alguns setores, a base das falésias encontra-se protegida da ação direta das ondas por meio de blocos de arenitos com cimentação ferruginosa que caíram da parte superior.

Em outros setores observa-se a escavação na base da falésia, que provoca o solapamento da

parte superior, com conseqüente queda do material.

A figura 4 mostra características típicas das falésias da região, com destaques para a formação de incisões basais, a evidência de queda de blocos e acúmulo de material na base.

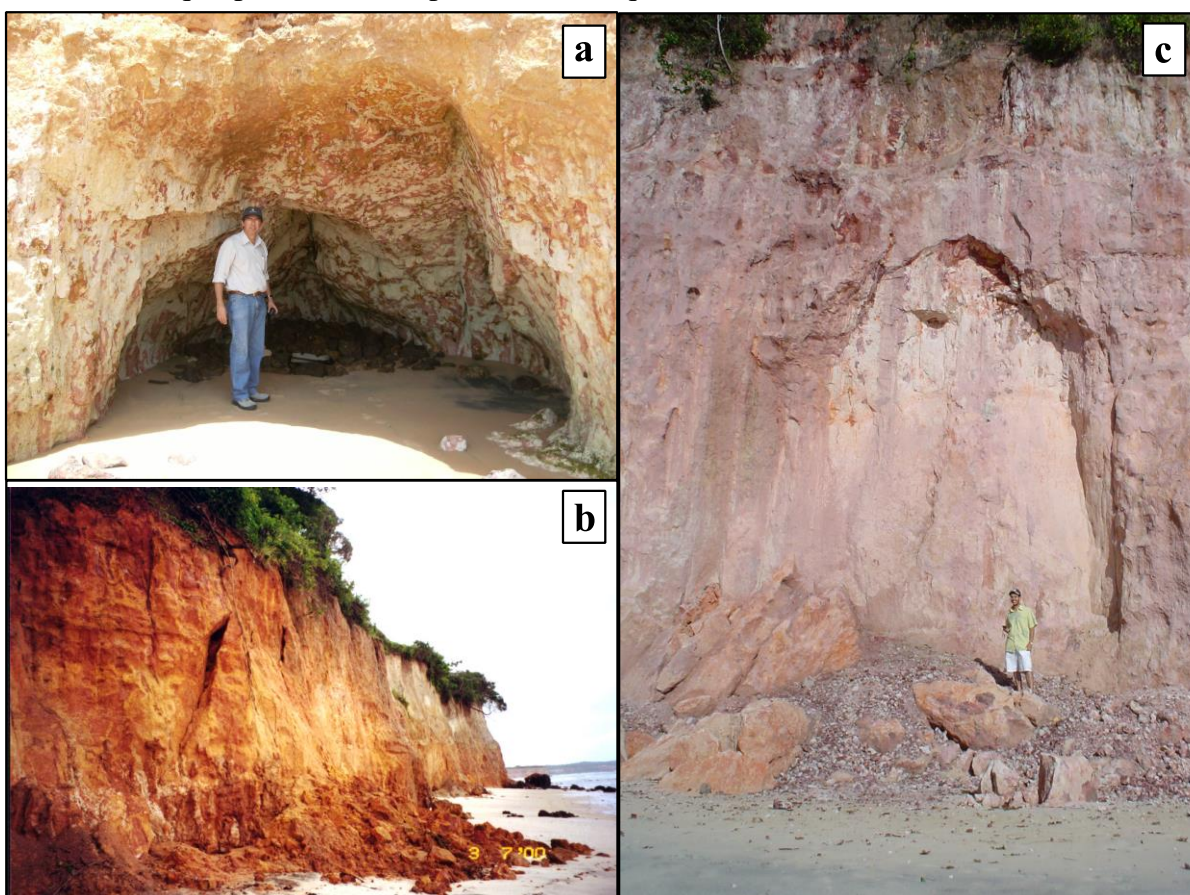


Figura 4 - Fotos da Região de Tibau do Sul. **a)** Formação de enorme incisão na base da falésia, com acúmulo de material abaixo da incisão; **b)** Visão geral das falésias, evidenciando movimentos de massa recentes e acúmulo de talus na base; **c)** Deslocamento de bloco.

Baía Formosa

O município de Baía Formosa/RN, situa-se a cerca de 100 km ao sul da capital Natal/RN. O trecho estudado estende-se por uma faixa de aproximadamente 1200 m ao longo da praia do Porto.

Em geral, as falésias da Praia do Porto apresentam diferentes inclinações entre 40° e 90° e altura variando de 3,5 a 15m. Essa região é caracterizada pela presença de tabuleiros costeiros na parte superior, falésias encobertas por depósitos dunares e a planície costeira na

parte inferior (Souza Júnior, 2013). É possível perceber as diferentes camadas na face das falésias da Formação Barreiras, as quais apresentam diferentes níveis de cimentação (Figura 5).

Os principais movimentos de massa identificados em quase toda a extensão analisada são quedas de detritos, quedas de blocos, tombamentos e pequenos deslizamentos. Além disso, em alguns trechos, observa-se incisões basais, causadas pela ação das ondas no pé da falésia (Souza Júnior, 2013)

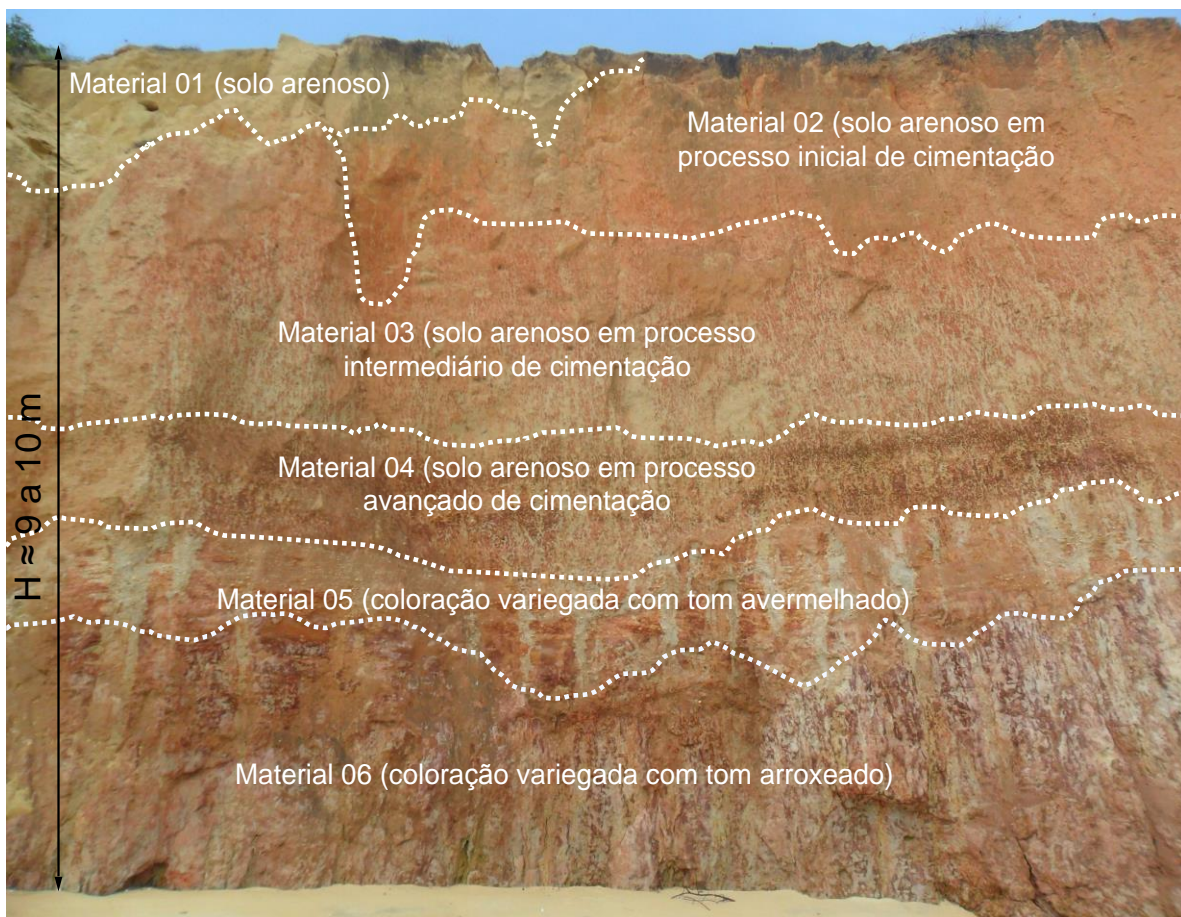


Figura 5 - Formação de diferentes camadas constituídas de materiais em estágios de cimentação diferenciados (Souza Júnior, 2013).

PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS

Ensaio de Resistência a Compressão Simples

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples realizados por Silva (2003) e Barbosa (2017), para o material presente na base, meio e topo da falésia, estão apresentados nas tabelas 1 e 2. Os dados mostram que, apesar de parecer homogêneo visivelmente, o material do topo apresenta uma variabilidade considerável com relação a resistência a compressão simples, com mínimo de 294,1 kPa, máximo de 808 kPa e valor médio de 479,1 kPa. Essa característica pode ser atribuída, sobretudo aos diferentes graus

de cimentação entre as partículas. O material da base apresenta valores mais altos de resistência variando de 484,2 kPa a 936 kPa (valor médio de 628,9 kPa).

O índice de vazios apresenta variação de cerca de 57%, para as amostras retiradas da base da falésia (0,35 a 0,55).

Além disso, verifica-se que não existe uma relação direta entre o índice de vazios e a resistência em alguns exemplos. Comparando as amostras 6 e 7, nota-se que o índice de vazios apresenta o mesmo valor (0,68), enquanto que o

valor de resistência a compressão varia de 808 kPa para 336 kPa.

Nas amostras 8 e 17, observa-se o comportamento inverso, onde existe grande variação no índice de vazios e pequena variação

no valor da resistência.

Entretanto, o material da base evidencia os menores valores de índice de vazios relacionados com maiores valores de resistência a compressão simples (amostra 16).

Tabela 1 - Características iniciais dos corpos de prova e resistência à compressão simples (RCS) do material do topo e base da falésia do município de Tibau do Sul/RN. (Silva, 2003).

Amostra	Localização	γ (kN/m ³)	e	S (%)	RCS (kPa)
1	Topo	15,62	0,72	4,72	393
2	Topo	16,03	0,67	5,02	314
3	Topo	15,97	0,68	4,97	380
4	Topo	15,94	0,68	4,95	393
5	Topo	16,23	0,65	5,18	550
6	Topo	16,01	0,68	5,01	336
7	Topo	15,98	0,68	4,98	808
8	Topo	16,16	0,66	5,13	619
9	Topo	16,22	0,65	5,17	610
10	Topo	15,80	0,70	4,85	494
11	Topo	15,57	0,72	4,48	380
12	Topo	15,81	0,70	5,09	520
13	Topo	16,92	0,59	5,85	617
14	Base	19,40	0,38	5,47	605
15	Base	19,00	0,40	4,54	610
16	Base	19,78	0,35	6,55	936
17	Base	19,20	0,39	5,38	611

Tabela 2 - Características iniciais dos corpos de prova e resistência à compressão simples (RCS) do material do topo, meio e base da falésia Barreira do Inferno. (Barbosa, 2017).

Amostra	Localização	γ (kN/m ³)	e	w (%)	RCS (kPa)
1	Topo	17,20	0,54	1,97	294,1
2	Meio	17,30	0,53	1,41	440,7
3	Meio	17,70	0,49	1,41	496,7
4	Base	17,70	0,55	3,84	484,2
5	Base	18,10	0,51	3,84	527,4

De acordo com a classificação proposta por Collins e Sitar (2009), constata-se que o material do topo das falésias de Tibau do Sul e Barreira do Inferno apresentam-se divididos entre moderadamente cimentado (100 kPa < RCS < 400 kPa) e fortemente cimentada (RCS > 400 kPa). O material da base e do meio das falésias analisadas podem ser classificados como fortemente cimentados.

De forma geral, os corpos de prova retirados em Tibau do Sul apresentaram planos de ruptura bem definidos, os quais se iniciam nas extremidades e percorrem os corpos de prova longitudinalmente.

Porém, nos casos em que a tensão de ruptura aplicada foi acima da média (amostras 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13 e 16), ocorreu ruptura do tipo frágil da

amostra, dividindo-se em vários fragmentos.

Ensaio Resistência ao Cisalhamento

A tabela 3 mostra os valores dos parâmetros de resistência de pico (coesão e ângulo de atrito), obtidos em ensaios triaxiais e cisalhamento direto realizados em diferentes amostras de solo provenientes da Formação Barreiras.

Através dos dados, é possível perceber que existe uma variabilidade muito grande no que diz respeito à coesão do material (0 kPa a 396,6 kPa). Os valores de coesão podem ser atribuídos a sucção e a cimentação entre as partículas.

Os valores máximos e mínimos do parâmetro coesão, obtidos em ensaios na condição inundada e natural em amostras de sedimentos provenientes da Formação Barreiras, são evidenciados na figura 6.

Constata-se a perda de cerca de 80% no valor do intercepto de coesão quando ocorre a saturação do material. Esse fato ocorre, pois a maior parte do valor de coesão é derivada da

sucção do material nas amostras na condição natural (valores em preto e cinza no gráfico). Observa-se que a sucção exerce forte influência no comportamento resistente do material.

Tabela 3 - Parâmetros de resistência dos solos provenientes da Formação Barreiras.

Localização	Tipo de ensaio	Amostra	c (kPa)	ϕ (°)	Referência
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Natural	193,0 - 318,0	43,0 - 52,0	Silva (2003)
		Inundada	45,0 - 53,0	27,0 - 29,0	
		Natural	233 - 396,6		
Tibau do Sul - RN	Cisalhamento Direto	Inundada	45,4 - 109,7	27,7 - 48,3	Severo (2005)
Tibau do Sul/RN	Cisalhamento Direto	Natural	116,0 - 192,0	27,0 - 32,0	Severo et al. (2006)
		Inundada	23,0 - 54,0	26,0 - 30,0	
Ponta do Pirambu/RN	Triaxial (CD)	Compactada Natural	8,3 6,5 - 110,5	28,4 29,4-33,0	Severo (2011)
Baía Formosa /RN	Cisalhamento Direto	Natural	-	-	Souza Jr. (2013)
		Inundada	16,9 - 59,9	29,5 - 33,6	
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CW)	Natural	97,6 - 192,1	30,8 - 36,4	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Barreira do Inferno/RN	Triaxial (CU)	Saturada	16,7 - 60,6	12,1 - 28,9	Barbosa (2017); Taquez (2017)
Zona oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	Natural	0,5 - 206,2	19,5 - 43	Sousa (2018)
		Inundada	0 - 0	32,9 - 36,9	
Zona oeste de Natal/RN	Cisalhamento Direto	Natural	148,6 - 306,8	37,6 - 58,1	Sousa (2018)
		Inundada	17,5 - 106,7	27,2 - 33,6	

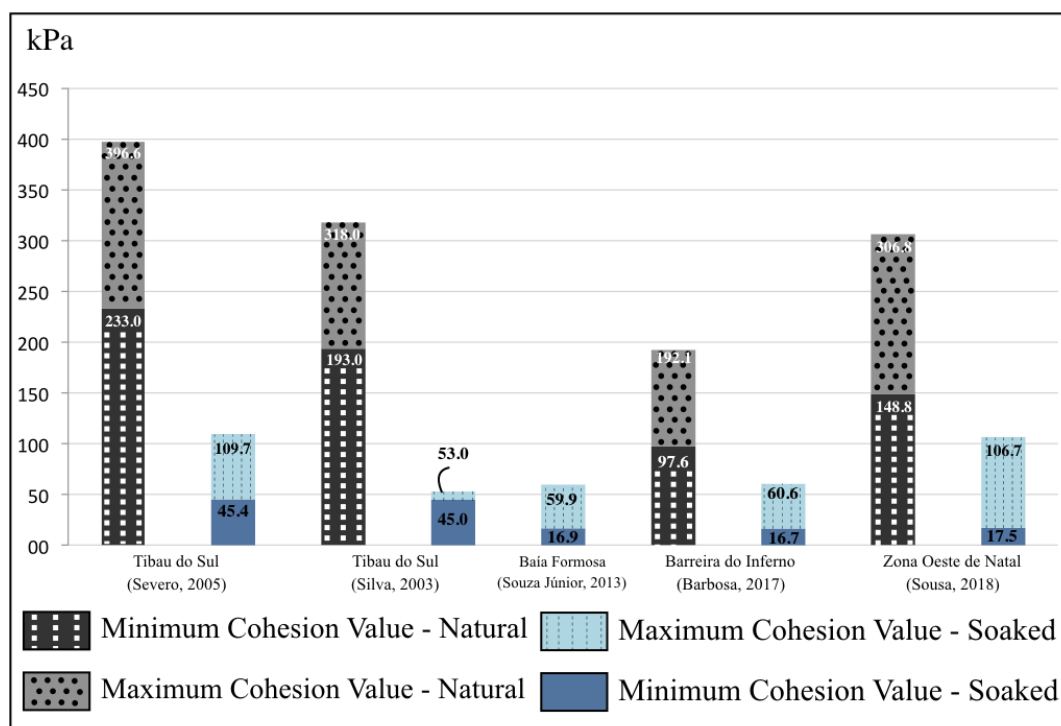


Figura 6 – Valores máximos e mínimos do parâmetro coesão, em ensaios na condição natural e na condição inundada.

A parcela restante do intercepto de coesão (valores em tons de azul no gráfico) é a coesão verdadeira, a qual é independente da condição de

saturação do solo.

Assim, quando ocorre a saturação do material, essa parcela de coesão advinda da

sucção é eliminada e diminui a capacidade resistente do maciço.

O ângulo de atrito também apresenta variação quando comparado os valores obtidos em ensaios na condição natural e inundada, porém não é representativa.

A figura 7 mostra dois histogramas (a) e (b),

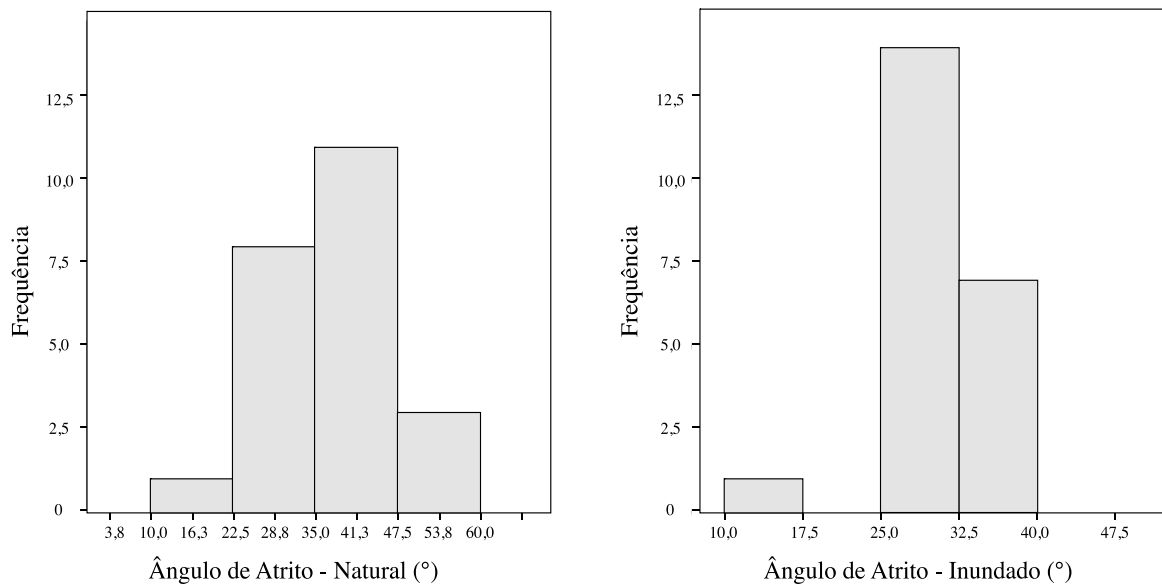


Figura 7 – Histogramas do parâmetro ângulo de atrito em amostras provenientes da Formação Barreiras. **a)** Valores obtidos através de 23 dados em amostras no estado natural.; **b)** Valores obtidos através de 22 dados em amostras no estado inundado (Silva, 2003; Severo, 2005; Severo, 2011; Souza Júnior, 2013; Barbosa, 2017; Taquez, 2017; Sousa, 2018).

O material no estado natural apresenta ângulo de atrito com maior número de ocorrências entre 35° e 47.5°, mais próximo do comportamento de rochas. A forma do histograma de frequência para o ângulo de atrito na condição saturada, se aproxima do mesmo na condição natural, entretanto existe uma maior concentração de valores próximo da média. Nota-se de forma geral que, apesar de existir um valor bem distinto

(12,1°) do comumente observado para esse parâmetro no estado inundado, o ângulo de atrito tende a se manter dentro da faixa de variação de valores listada por Severo (2011) para a Formação Barreiras, ou seja, valores de ângulos de atrito correspondente à materiais arenosos (entre 29° e 32°). As maiores variações nos valores de ângulo de atrito ocorrem nas amostras de maior heterogeneidade (Sousa, 2018).

PROCESSOS EROSIVOS E MOVIMENTOS DE MASSA

Os dados disponíveis de trabalhos anteriores, tanto relacionados à caracterização geotécnica dos materiais como às análises de estabilidade, representam uma importante base para determinar os principais mecanismos, modos de ruptura e também condições limites para a ocorrência de movimentos de massa. Segundo Collins & Sitar, 2008, os mecanismos de ruptura podem ser descritos como as causas diretas do movimento de massa, enquanto que o modo de ruptura é a definição do tipo de movimento que ocorre na ruptura das falésias.

De forma geral, as falésias de toda a área estudada possuem características típicas, bem como processos erosivos similares, dependendo

principalmente das condições ambientais e antrópicas.

Nos setores em que o mar alcança as falésias e o pé da encosta não é protegido por blocos de arenitos, o impacto das ondas incide diretamente na base das falésias, formando incisões basais e pontos de instabilidade (Figura 8). Essas incisões, normalmente causam a queda de blocos e tombamentos, tanto na parte do topo das falésias, como na zona diretamente acima da incisão. Esse processo dinâmico e contínuo resulta no recuo costeiro.

Os blocos que caem na praia se desintegram e podem ser incorporados à dinâmica costeira e serem transportados pelas correntes da deriva

litorânea. Eventualmente, quando os blocos são mais resistentes, não são se desintegram e a água não tem energia suficiente para transportá-los. Assim, permanecem do local da queda e passam a proteger a base da falésia contra a ação das ondas (Figura 9).

De acordo com as análises de tensão x deformação realizadas em Silva et al. (2016), à medida que a incisão basal progride percebe-se um aumento da inclinação da falésia e uma mudança nas tensões na região adjacente à incisão. Nessas condições, surgem esforços de tração na parte imediatamente acima da incisão e na face da falésia.

Quando os esforços de tração impostos à falésia pela formação da incisão na sua base se igualam aos valores de resistência à tração do material ocorre a ruptura na forma de

destacamento de blocos e lascas do material das falésias. Esse quadro se agrava no período de chuvas, uma vez que o umedecimento do material provoca o aumento das tensões atuantes e a diminuição da resistência.

Os resultados obtidos em Taquez (2017) ratificam essas observações. As encostas se tornam mais instáveis com o aumento da extensão da incisão basal.

Além disso, à medida que a frente de umedecimento do maciço avança, a extensão máxima estável do entalhe formado pelo corte das ondas na base das falésias diminui.

Esse comportamento é evidenciado por quedas de blocos, tombamentos e deslizamentos em áreas próximas às incisões basais, bem como pela maior ocorrência registrada nos períodos de chuvas (Figura 8)..

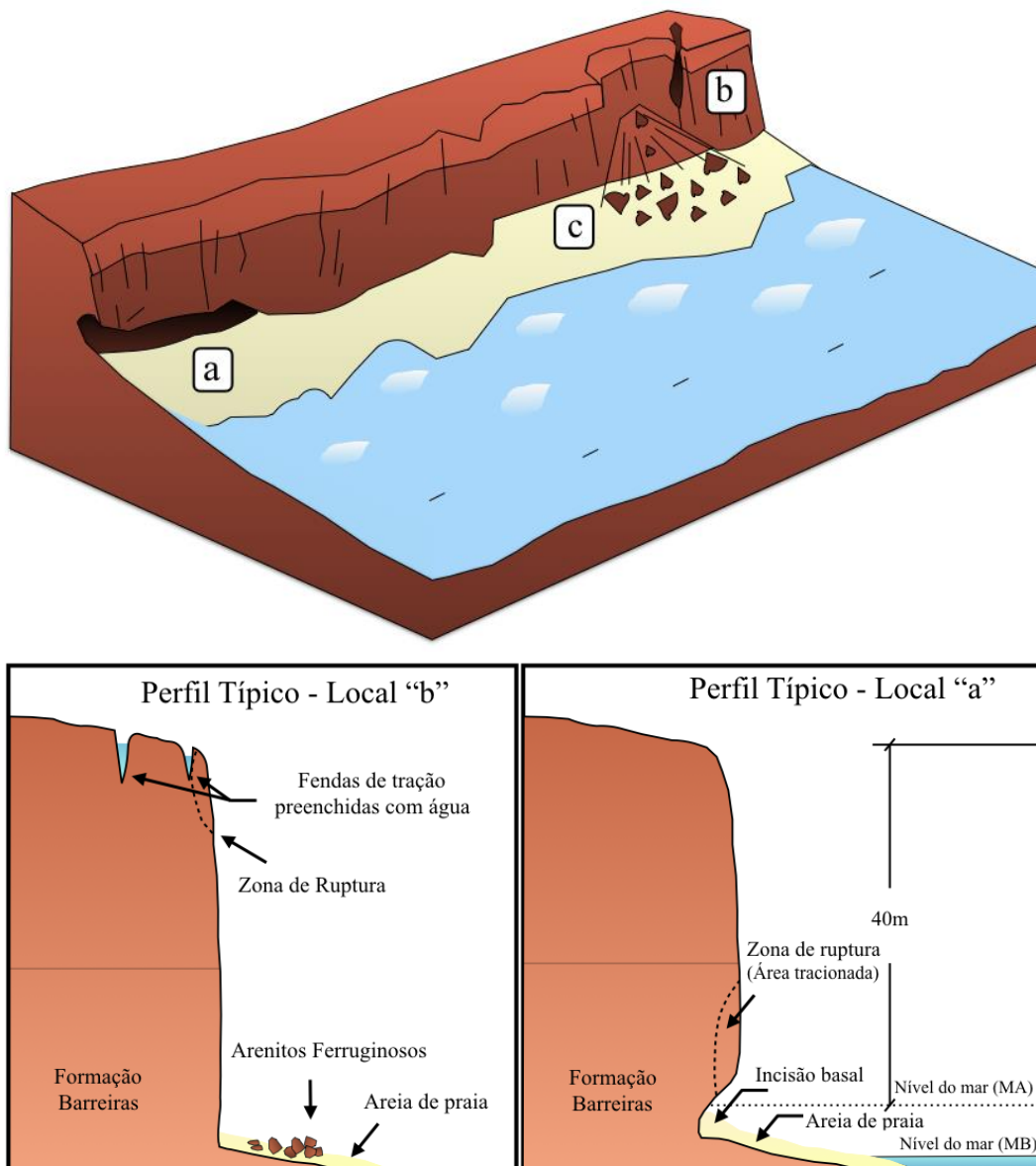


Figura 8 - Perfis Típicos - a) Esquema geral do processo de erosão basal na falésia e movimentos de massa. Destaca-se a formação de um entalhe na base da falésia; b) Formação de fendas de tração sub-verticais, mediante a ação das chuvas. No esquema geral, ponto "c" mostra a ocorrência de movimentos de massa e acúmulo de talus na base.

Nas áreas com maiores faixas de praia o mar não atinge a base das falésias. Assim, os sedimentos praias atuam como proteção contra a ação das ondas.

Outro fator de controle e proteção (retardador) contra ação direta das ondas é a ocorrência dos blocos de arenitos com cimentação ferruginosa (sedimentos) ao longo da base das falésias, provenientes da Formação Barreiras.

Os taludes presentes nas áreas onde o mar não atinge as falésias apresentam menores inclinações que àqueles onde há a ação do mar na sua base.

Em geral ocorrem ângulos de 40° a 60° e resultam do equilíbrio do talude frente aos processos continentais a que estão submetidos. Nesse sentido, destaca-se a ação da água de chuva que pode provocar erosão na face do talude ou deslizamentos devido a infiltração. Em alguns casos observa-se a presença de vegetação revestindo a falésia (Figura 10).

Outra característica importante observada nas investigações de campo é a formação de sulcos, ravinas e voçorocas, no topo das falésias, por meio da erosão pluvial, sobretudo nas regiões desprovidas de cobertura vegetal.

A formação dessas feições erosivas pode ser

facilmente identificada próxima de dispositivos de drenagem de estradas localizadas ao lado das falésias (Santos Jr. et al., 2011).

Além dessa particularidade, as falésias apresentam fendas de tração, as quais potencializam a ocorrência de movimentos de massa e quedas de blocos.

Em episódios de chuvas intensas, essas fendas podem provocar quedas de blocos e tombamentos, principalmente se estiverem preenchidas com água (Figura 8). Essas observações são confirmadas segundo as análises realizadas em Taquez et al. (2016) e Taquez (2017).

As chuvas também exercem influência induzindo o aumento do grau de saturação do maciço e conseqüentemente a redução da resistência ao cisalhamento.

O aumento do grau de saturação do material causa a diminuição do intercepto de coesão do solo (parcela referente a sucção matricial), e, portanto, a resistência ao cisalhamento diminui bruscamente (Santos Jr. et al., 2011).

Segundo os resultados obtidos em Taquez (2017), nessas condições as falésias apresentam-se instáveis, ocasionando movimentos de massas.

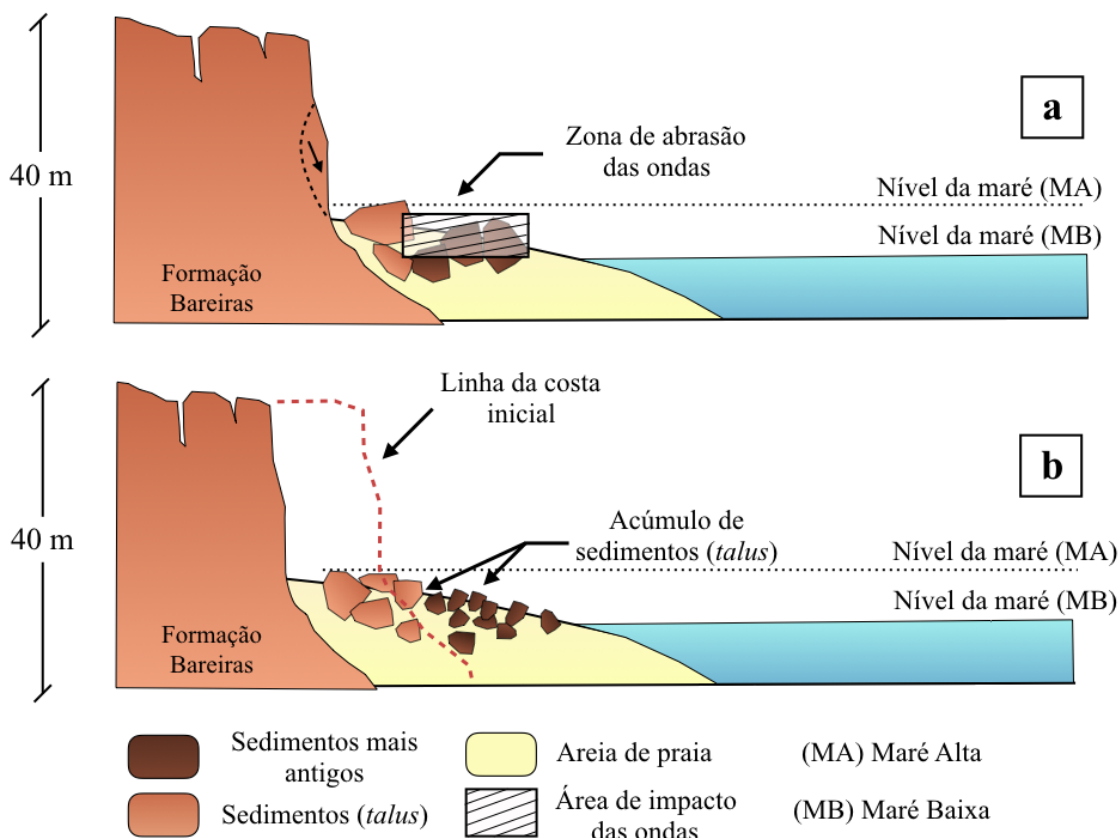


Figura 9 – Modelo de evolução dos blocos de sedimentos ferruginosos. **a)** Falésias sofrendo impacto direto da ação das ondas, proporcionando movimentos de massa e acúmulo de talus na base das falésias; **b)** Recuo costeiro e nova posição dos blocos (sedimentos), protegendo cada vez mais a base das falésias.



Figura 10 – Área onde o mar não atinge a base da falésia: taludes mais suaves que permitem o surgimento de vegetação. Ponta do Pirambu em Tibau do Sul.

PROPOSTA DE UM MODELO PARA O RECUO DAS FALÉSIAS

Apresenta-se a seguir um modelo conceitual para a explicar os processos erosivos costeiros no litoral sul do RN. Considera-se que as falésias estão submetidas a processos marinhos e continentais.

Em termos de processo marinho destaca-se a ação das águas na base das falésias. Os processos continentais estão relacionados a ação do escoamento superficial e da infiltração de águas de chuva no talude. Esses processos induzem movimentos de massas que resultam no recuo costeiro. Alguns outros componentes atuam no sentido de acelerar ou de retardar os processos. No sentido de acelerar o recuo destacam-se a abertura de fendas de tração na parte superior das

falésias e a ocorrência de fraturas nos arenitos que compartimentam o maciço e favorecem as quedas de blocos e tombamentos. Em termos de retardar os processos erosivos destacam-se a presença de camadas enrijecidas de arenito com cimentação ferruginosa no corpo do maciço ou blocos desses arenitos na base da falésia, assim como a existência de praia com sedimentos arenosos protegendo o sopé da encosta.

A figura 11 mostra o resumo desse ciclo com os principais processos marinhos e fatores de controle. A esses processos devem ser adicionados os processos continentais associados às chuvas que provocam erosão pluvial, deslizamentos e queda / tombamentos de blocos.

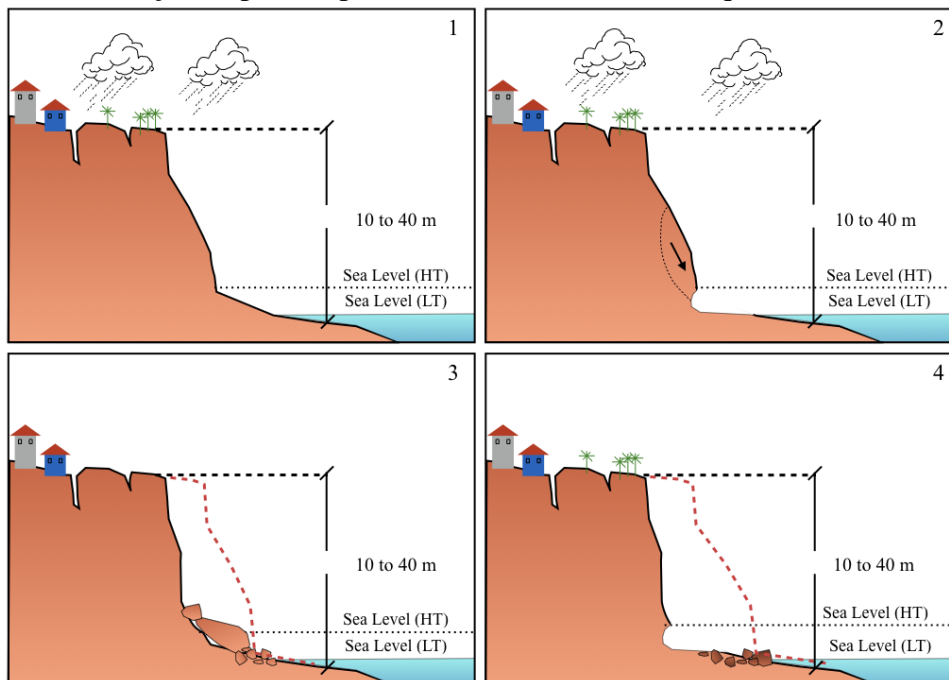


Figura 11 – Resumo do processo de erosão costeira proporcionando movimentos de massa como quedas e tombamentos e consequentemente o recuo da linha de costa.

A ação antrópica também pode alterar essa dinâmica natural. As alterações decorrem principalmente das intervenções que modificam a drenagem natural das águas de chuva e concentram o fluxo em determinados pontos. Esses aspectos promovem a concentração de

energia das águas que facilitam a ocorrência de processos erosivos.

Construções próximas a crista das falésias também induzem aumento das tensões cisalhantes no maciço e podem provocar a ruptura dos taludes

CONCLUSÕES

Este artigo sistematiza o estado da arte sobre os principais mecanismos de ruptura e processos erosivos localizados na porção sul do litoral Oriental do Estado do RN. Identificar condições limites de estabilidade para as falésias da Formação Barreiras, baseadas nas mudanças do ambiente e dos principais parâmetros que controlam o processo, representa um importante passo para auxiliar no controle de riscos costeiros e políticas de uso e ocupação do solo. Além disso, estudos dessa natureza colaboram para a avaliação das implicações práticas do crescimento desordenado de áreas costeiras.

O processo de recuo costeiro observado na área de estudo é cíclico e dinâmico. Através dos processos erosivos devidos tanto às chuvas quanto ao impacto das ondas na base das falésias.

A taxa de ocorrência desse processo dependerá de diversos fatores correlacionados, que contribuem para a ocorrência dos movimentos de massa, tais como: resistência dos materiais, morfologia das falésias, ação das águas das chuvas e marés, ocorrência da vegetação e ação antrópica. À medida que os processos erosivos e movimentos de massa ocorrem, a influência dos parâmetros de controle muda.

A coesão resultante da cimentação entre as partículas corresponde à maior parcela da

resistência do material da Formação Barreiras. Os valores de resistência à compressão simples do material apresentam-se divididos entre moderadamente cimentado ($100 \text{ kPa} < \text{RCS} < 400 \text{ kPa}$), nas camadas do topo e fortemente cimentada ($\text{RCS} > 400 \text{ kPa}$), nas camadas mais próximas à base.

A ação das ondas e das chuvas podem ser considerados os principais mecanismos identificados no litoral Oriental do Estado do RN. Observa-se que os movimentos de massa ocorrem principalmente pelo aumento da inclinação das falésias e surgimento de esforços de tração na borda da falésia, devido a ação direta das ondas. Esse fato é somado com a frente de umedecimento do material através das chuvas, onde a parcela de coesão do material, derivada da sucção é eliminada e diminui a capacidade resistente das falésias. Ainda existe a influência das fendas de tração observadas nas bordas das falésias. Essas fendas quando preenchidas com água resulta em cargas de tração no interior do maciço de solo. Por isso, a maioria dos movimentos de massa ocorre nos períodos chuvosos.

Os modos de ruptura identificados são principalmente quedas e tombamentos em falésias mais íngremes e deslizamentos em falésias de inclinação mais amena.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, (Processo n. 432226/2016-8, Edital Universal 01/2016) pelo apoio financeiro para a realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- AMARO, V.E.; SANTOS, M.S.T.; SOUTO, M.V.S. **Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão**. 120 p. (2012). ISBN 978-85-913746-0-1.
- BARBOSA, N.M. **Estabilidade das falésias da Barreira do Inferno–RN**. Natal. 2017. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- BELOV, A.P., DAVIES, P.; WILLIAMS, T. Mathematical modeling of basal coastal cliff erosion in uniform strata: A theoretical approach. **The journal of geology**, v. 107, p. 99–109, 1999.
- BLANCO-CHAO, R.; PEDOJA, K.; WITT, C.; MARTINOD, J.; HUSSON, L.; REGARD, V.; AUDIN, L.; NEXER, M.; DELCAILLAU, B.; SAILLARD, M.; MELNICK, D.; DUMONT, J. F.; SANTANA, E.; NAVARRETE, E.; MARTILLO, C.; PAPPALARDO, M.; AYALA, L.; ARAYA, J. F.; FEAL-PÉRES, A.; CORREA, D.; AROZARENA-LLOPIS, I. The rock coast South and Central America. **Geological Society**, London, *Memoirs*, v.40, p. 155 – 191, 2014.
- BROOKS, S.M.; SPENCER, T.; BOREHAM, S. Deriving mechanisms and thresholds for cliff retreat in soft-rock cliffs under changing climates: Rapidly retreating cliffs of the Suffolk coast, UK. **Geomorphology**, v. 153-154, p.48 – 60, 2012.

- COLLINS, B.D. & SITAR, N. Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA. **Geomorphology**, v. 97, p. 483 – 501, 2008.
- COLLINS, B.D. & SITAR, N. Geotechnical properties of cemented sands in steep slopes. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 135, n. 10, p. 1359 – 1366, 2009.
- DINIZ, R.F. **A Erosão Costeira ao Longo do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte: Causas, Consequências e Influências nos Processos de Uso e Ocupação da Região Costeira**. Salvador. 2002. Tese (Doutorado em Geociências) Instituto de Geociências.
- MARTINO, S. & MAZZANTI, P. Analysis of sea cliff slope stability integrating traditional geomechanical surveys and remote sensing. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 1, p. 3689 – 3734, 2013.
- MOORE, R. & DAVIS, G. Cliff instability and erosion management in England and Wales. **Journal of Coastal Conservation**, v. 19, p. 771–784, 2015
- MUEHE, D. **Erosão e progradação no litoral brasileiro**, 2014, 476 p. ISBN 85-7738-028-9.
- NASCIMENTO, K.C. **Monitoramento por DGPS e análise dos processos erosivos da linha de costa na praia de Pirangi do Norte - Parnamirim/RN**. Natal. 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- PIÉRRI, G.C.S. **Análise de Risco à Erosão Costeira na Região de Tibau do Sul/RN Através de Mapeamento Geoambiental e Análise Morfodinâmica**. Natal, 2008. Tese (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- QUINN, J.D.; PHILIP, L.K.; MURPHY, W. Understanding the recession of the Holderness Coast, east Yorkshire, UK: a new presentation of temporal and spatial patterns. **Quarterly journal of engineering geology and hydrogeology**, v. 42, p. 165 – 178, 2009.
- RIBEIRO, J.R.C. **Análise paramétrica da estabilidade de falésias e estudo de caso da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul/RN**. Natal. 2015. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- SANTOS JR., O.F.; AMARAL, R.F.; SCUDELARI, A.C. Failure mechanisms of a coastal cliff in Rio Grande do Norte State, NE, Brazil. **JOURNAL OF COASTAL RESEARCH**, SI 39 PROCEEDINGS OF THE 8TH INTERNATIONAL COASTAL SYMPOSIUM, Itajaí, 2006. **Anais...**Itajaí, 2006, p. 629-632.
- SANTOS JR., O.F.; SCUDELARI, A.C.; COSTA, A.C.; COSTA, C. M. Sea Cliff retreat mechanisms in northeastern Brazil. **JOURNAL OF COASTAL RESEARCH**, SI 64 PROCEEDINGS OF THE 11TH INTERNATIONAL COASTAL SYMPOSIUM, Szczecin, Poland, 2011. **Actas...** Szczecin. ISSN 0749-0208.
- SCUDELARI, A.C.; BRAGA, K.G.; COSTA, F.A.A.; SANTOS JR., O.F. Erosive processes study that affecting Pipa beach - RN. **Braz. J. Aquat. Sci. Technol.**, v. 9, n. 1, p. 31-37, 2005. ISSN 1808-7035.
- SEVERO, R.N. F. **Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa-RN**. Natal. 2005. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
- SEVERO, R.N.F. **Caracterização geotécnica da falésia da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul-RN considerando a influência do comportamento dos solos nos estados indeformado e cimentado artificialmente**. Recife. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco.
- SEVERO, R.N.F.; SANTOS JR., O.F.; FREITAS NETO, O. Propriedades geotécnicas de sedimentos da formação barreiras no litoral do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 13, Curitiba. 2006. **Anais...** Curitiba: COBRAMSEG, 2006, v. 1.
- SILVA, W.S. **Estudo da Dinâmica Superficial e Geotécnica das Falésias do Município de Tibau do Sul - Litoral Oriental do RN**. Natal. 2003. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- SILVA, B.M.F.; FREITAS NETO, O.; SANTOS JÚNIOR, O.F.; BARBOSA, N.M.; FRANÇA, F.A.N.; ARAÚJO, E.E.B. Stability Evolution with Basal Erosion Increase in Cliffs on the Coast of Rio Grande do Norte, Brazil. **Applied Mechanics and Materials**, v. 858, p. 342-347, 2016. ISSN: 1662-7482,
- SOUZA, R.A. **Resistência e Compressibilidade de Solos da Formação Barreiras da Região de Natal/RN**. Natal. 2018. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- SOUZA JÚNIOR, C. **Análise de estabilidade de falésias na zona costeira de Baía Formosa-RN**. Natal. 2013. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- SUNAMURA, T. Rocky coast processes: with special reference to the recession of soft rock cliffs. **Proceedings of the Japan academy ser B physical and biological sciences**, v. 91, p. 481-500, 2015.
- TAQUEZ, D.E.D. **Susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa e avaliação da estabilidade de falésias sob condição não saturada: Estudo de caso no Centro de Lançamentos da Barreira do Inferno – Brasil**. Natal. 2017. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
- TAQUEZ, D.E.D.; BARBOSA; S.B.M.F; FREITAS NETO, O.; SANTOS JÚNIOR, O.F. Estabilidade de Falésias no Litoral do RN Submetidas a Fendas de Tração e Incisão Basal. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, XIII, Aracaju, 2016. **Anais...**Aracaju: ABRH
- VITAL, H.; SANTOS NETO, F.; PLÁCIDO JÚNIOR, J.S. Morfodinâmica de um canal de maré tropical: Estudo de caso na costa norte rio grandense, Nordeste do Brasil. **Revista da Gestão Costeira**, v. 8, n. 2, p. 113-126, 2008.
- YOUNG, A.P. & ASHFORD, S. Instability investigation of cantilevered sea cliffs. **Earth surface processes and landforms**, v. 33, p. 1661 -1677, 2008.
- YOUNG, A.P. Recent deep-seated coastal landsliding at San Onofre State Beach, California. **Geomorphology**, v. 228, p. 200 – 212, 2015.

*Submetido em 30 de junho de 2019
Aceito para publicação em 5 de maio de 2020*