

PROCESSOS DE INSTABILIZAÇÃO EM FALÉSIAS: ESTUDO DE UM CASO NO NORDESTE DO BRASIL

Instabilization Processes in sea cliffs: a case study in Northeast of Brazil

Olavo Francisco dos Santos Jr.*

Ricardo Nascimento Flores Severo**

Ada Cristina Scudelari***

Ricardo Farias do Amaral****

RESUMO – Este trabalho apresenta e discute os mecanismos de ruptura observados ao longo de 16 km de falésias no Município de Tibau do Sul, no litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. A área em estudo é formada por taludes com altura variando de 20 a 40 metros. Foram identificados três perfis típicos: o primeiro é vertical; o segundo apresenta duas inclinações, vertical na parte inferior e ângulo de 40° a 60° com a horizontal na parte superior; o terceiro possui inclinação entre 40° a 60° ao longo de toda a altura do talude. Os mecanismos observados estão relacionados com a ocorrência de chuva. Ensaios de cisalhamento direto mostraram que os solos da área apresentam perda de resistência quando inundados. Nos perfis verticais foram observados quedas, tombamentos e escorregamentos, na parte superior do talude. Nos taludes com inclinação entre 40° a 60° foram observados erosão na face do talude e escorregamentos. A ação do mar na base dos taludes provoca a formação de incisões na base, que por sua vez desestabilizam a parte superior.

SYNOPSIS – This paper presents and discusses the failure mechanisms observed along of 16 km of sea cliffs in Tibau do Sul city, in the littoral of the Rio Grande do Norte State, Brazil. The area of study is formed by slopes with height ranging from 20 to 40 meters. Three types of profiles have been observed in this area. The first one is vertical, the second presents two inclinations, a lower vertical part and an upper part with inclination between 40° and 60° and the third shows inclination varying from 40° to 60° along the height. The observed mechanisms are related to rain-induced failures. Direct shear tests results showed that there is strength loss when specimens are soaked. Vertical sea cliffs have suffered falls, toppling and slides from the upper part of the slopes. Superficial erosion and slides have been observed in slopes with inclination between 40° and 60°. Sea action on the slopes are related to the undermining the slope toe that provoke failure of the upper part.

PALAVRAS CHAVE – Movimentos de massas, falésia, erosão, escorregamentos, ravina, voçoroca.

1 – INTRODUÇÃO

A zona costeira é uma das regiões mais dinâmicas do planeta. Sua posição e forma são modificadas por uma série de fatores, como as variações do nível do mar, que ocorrem em velocidades

* Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. E-mail: olavo@ct.ufrn.br

** Professor, Departamento de Construção Civil, Centro Federal de Ensino Tecnológico do Rio Grande do Norte. E-mail: ricardoflores@cefetn.br

*** Professora Associada, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. E-mail: ada@ct.ufrn.br

**** Professor Associado, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. E-mail: ric@ufrnet.br

variadas através dos tempos, até eventos diários, como as precipitações pluviométricas. Nesta zona costuma ocorrer grande quantidade de intervenções humanas que potencializam as modificações que ocorrem na mesma, através da influência direta que exerce sobre os processos de erosão costeira, pois ao se fixarem nesta região se colocam na trajetória de recuo natural desta.

O litoral do Estado do Rio Grande do Norte (RN), no Nordeste do Brasil, passa por um intenso processo de ocupação, associado ao incremento da atividade turística. Em termos morfológicos, a costa do RN é formada por falésias e extensos campos de dunas. As falésias consistem de desníveis abruptos no terreno com alturas de até 50 metros e inclinação variando de 40° até a vertical, geralmente bem próximos da linha de costa. Os topos das falésias apresentam um forte atrativo turístico por servirem de mirantes. Em função disso, há uma forte pressão para a construção de obras de infra-estrutura, hotéis e restaurantes nas imediações das falésias. Entretanto, as falésias apresentam sérios problemas de estabilidade, que são agravados pela presença de construções adjacentes a elas.

Um dos mais importantes impactos observados nessas regiões é o problema da erosão costeira, o qual pode ser caracterizado como o recuo da linha de costa sobre as áreas ocupadas no continente. Trabalhos anteriores indicam que o Estado do RN apresenta problemas de erosão costeira em vários trechos da sua costa (Amaral *et al.*, 1997; Amaral, 2000; Braga, 2005, Diniz, 2002; Scudelari *et al.* 2003, Santos Jr. *et al.*, 2004),.

As encostas na forma de falésia vêm sendo estudadas com vários enfoques: compreensão dos processos (Hutchinson *et al.*, 1981; Duperret *et al.*, 2002), morfologia (Lizarga-Arciniega e Fischer, 1998), propriedades geotécnicas (Budetta *et al.*, 2000) e taxas de recuo (Bray e Hooke, 1997). A maioria dos estudos se refere à obtenção da taxa de recuo a partir de registros históricos, fotográficos e cartográficos. Os trabalhos abordando os mecanismos de recuo destacam que atuam simultaneamente vários processos nas encostas. Observa-se ainda que o recuo se dá através de eventos esporádicos de movimentos de massas. Dessa forma, a previsão da velocidade de recuo não é uma tarefa fácil, uma vez que é o resultado cumulativo da interação de vários fatores.

Os fenômenos que levam a alteração da zona costeira estão superimpostos em ciclos de diversas escalas de tempo, mas são as escalas mais curtas, as de maior interesse no que diz respeito à sua ocupação (Amaral, 2001). Uma área especialmente problemática, em se tratando de erosão costeira, está localizada no município de Tibau do Sul, no litoral leste do RN. Essa área foi objeto de estudo em uma pesquisa realizada desde 1999 e que resultou nos trabalhos de Silva (2003), Braga (2005) e Severo (2005). O presente trabalho descreve os tipos e mecanismos de ruptura dos taludes das falésias, que acarretam no seu recuo em direção ao continente.

2 – DESCRIÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A seguir são apresentadas brevemente, para melhor compreensão do trabalho realizado, a localização da área de estudo bem como o clima atuante e as principais características litológicas e estruturais da região.

2.1 – Localização geográfica

A área de estudo desta pesquisa está localizada no município de Tibau do Sul, no litoral leste do Estado do Rio Grande do Norte (Figura 1), no nordeste do Brasil. Trata-se de uma zona costeira, que possui cerca de 16 km de extensão e é predominantemente formada por falésias. A área tem início no Norte, na embocadura da Laguna de Guarairas e se estende para o Sul até a foz do Rio Catu.

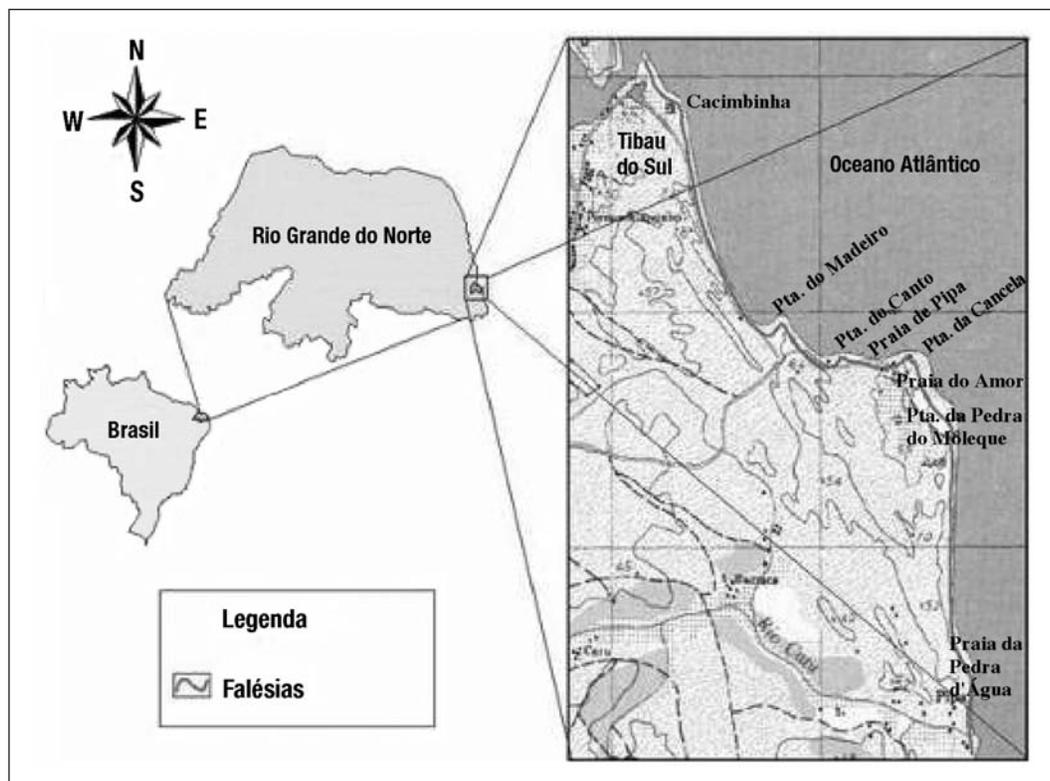


Fig. 1 – Localização geográfica da área estudada.

2.2 – Características físicas

O clima, juntamente com as características litológicas e estruturais de uma região, condiciona o processo erosivo dominante. O litoral oriental norterriograndense possui um clima tropical chuvoso quente e com verão seco, sendo classificado como sub-úmido. A estação chuvosa se concentra principalmente no período que vai de Abril a Julho, quando as médias mensais variam entre 170 e 230 mm, tendo os meses de Agosto a Janeiro como os mais secos, com médias inferiores a 80 mm. Sua temperatura média anual é de 25,7°C, com as médias mensais mais baixas entre os meses de Junho e Setembro, e as mais altas entre os meses de Dezembro a Março. A sua umidade relativa média anual é de 74% (Diniz, 2002).

O município de Tibau do Sul possui, em média, uma altitude de menos de 100 metros. As unidades morfológicas encontradas na sua zona costeira são: os Tabuleiros Costeiros e a Planície Costeira.

Os Tabuleiros Costeiros possuem relevo plano a suavemente ondulados, baixa altitude, entre 40 e 120 metros, podendo atingir os 180 metros, apoiados nos sedimentos da Formação Barreiras. Possuem uma alta percentagem de argila, localizam-se próximos ao litoral, e são limitados a oeste pelas áreas de colinas e a leste pelas planícies costeiras. Dificilmente os tabuleiros entram em contato com o mar, porém no trecho central da área estudada isso é observado.

A Planície Costeira é formada por praias, que são limitadas pelo mar e pelos tabuleiros costeiros. Trata-se de terrenos planos que têm sido alterados pela presença de dunas. Verifica-se ainda a presença de dunas sobrepostas aos tabuleiros (Silva, 2003).

Em termos geológicos, o município está inserido principalmente na área de abrangência da Formação Barreiras de maneira que a geologia da área é formada por materiais de origem sedimen-

tar. Nos tabuleiros ocorrem os sedimentos da Formação Barreiras, os quais consistem de camadas intercaladas de arenitos argilosos, argilitos, conglomerados e arenitos ferruginosos. As dunas, sobrepostas aos sedimentos da Formação Barreiras são formadas por areias finas quartzosas de origem eólica. Na planície costeira ocorrem praias arenosas. Ocorre ainda outro grupo de arenito que tem geometria linear. Esses arenitos são cimentados por carbonatos e ocorrem ao longo de alguns trechos da área de estudo, segundo um alinhamento aproximadamente paralelo à linha de costa, (Silva, 2003).

3 – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As atividades desenvolvidas durante a elaboração deste trabalho foram agrupadas em cinco etapas: levantamento bibliográfico, levantamento de dados existentes sobre a região, trabalhos de campo, ensaios de laboratório e análise dos resultados. A metodologia adotada procurou atender os objetivos do trabalho, ou seja, identificar os processos atuantes e caracterizar os materiais que formam as falésias.

3.1 – Trabalhos prévios

A revisão bibliográfica consistiu na obtenção do embasamento teórico para o desenvolvimento da pesquisa e de dados já existentes sobre a área objeto do estudo. Foram identificados documentos cartográficos e mapas geológicos que serviram de apoio ao planejamento e execução dos trabalhos de campo e coleta de amostras.

Toda a documentação recolhida foi analisada e em seguida foram realizadas inspeções de reconhecimento. Após essa etapa, a área foi dividida em três trechos (Figura 2), conforme zoneamento morfológico proposto por Amaral (2001): Norte, Central e Sul. O trecho norte está compreendido entre a barra de Tibau do Sul e a Ponta do Madeiro possuindo orientação aproximadamente N-S. O trecho central inicia na Ponta do Madeiro e vai até a Pedra do Moleque, com orientação E-W. O trecho sul inicia na Pedra do Moleque e culmina na desembocadura do rio Catú ou Cibaúma, com orientação N-S.

3.2 – Identificação dos processos atuantes

Toda a área foi percorrida com o objetivo de mapear as feições que têm relação com o recuo das falésias. Essas observações foram feitas para cada trecho, identificado na Figura 2. As feições observadas foram: a presença de proteção do pé da falésia contra a erosão basal; os materiais que formam as encostas; a geometria do talude e a ocorrência de processos de instabilização nas escarpas.

Verificou-se a presença de proteção no pé da falésia da ação das ondas, seja pela presença de corpos de arenito, ou de bancos de areia. Nas faces das falésias foram identificados os materiais que formam o perfil da encosta, a presença de vegetação, a geometria do perfil e discontinuidades que pudessem caracterizar-se como planos de fraqueza para a ocorrência de movimentos de massas.

Os trabalhos de campo foram desenvolvidos em vários períodos com características pluviométricas distintas (estações chuvosas e secas) no sentido de identificar a influência das chuvas no processo de recuo das falésias. Procurou-se documentar em termos fotográficos e cartográficos a ocorrência de processos de instabilização dos taludes a partir da presença de detritos de quedas de materiais proveniente das partes superiores da escarpa, a partir de junho de 2000. Os trechos onde predominam a erosão basal foram identificados a partir da presença de incisões na base da falésia.

3.3 – Coleta de amostras

As campanhas de amostragem realizadas durante a etapa de trabalhos de campo foram conduzidas paralelamente às demais etapas. Consistiram na obtenção de amostras deformadas, para estu -

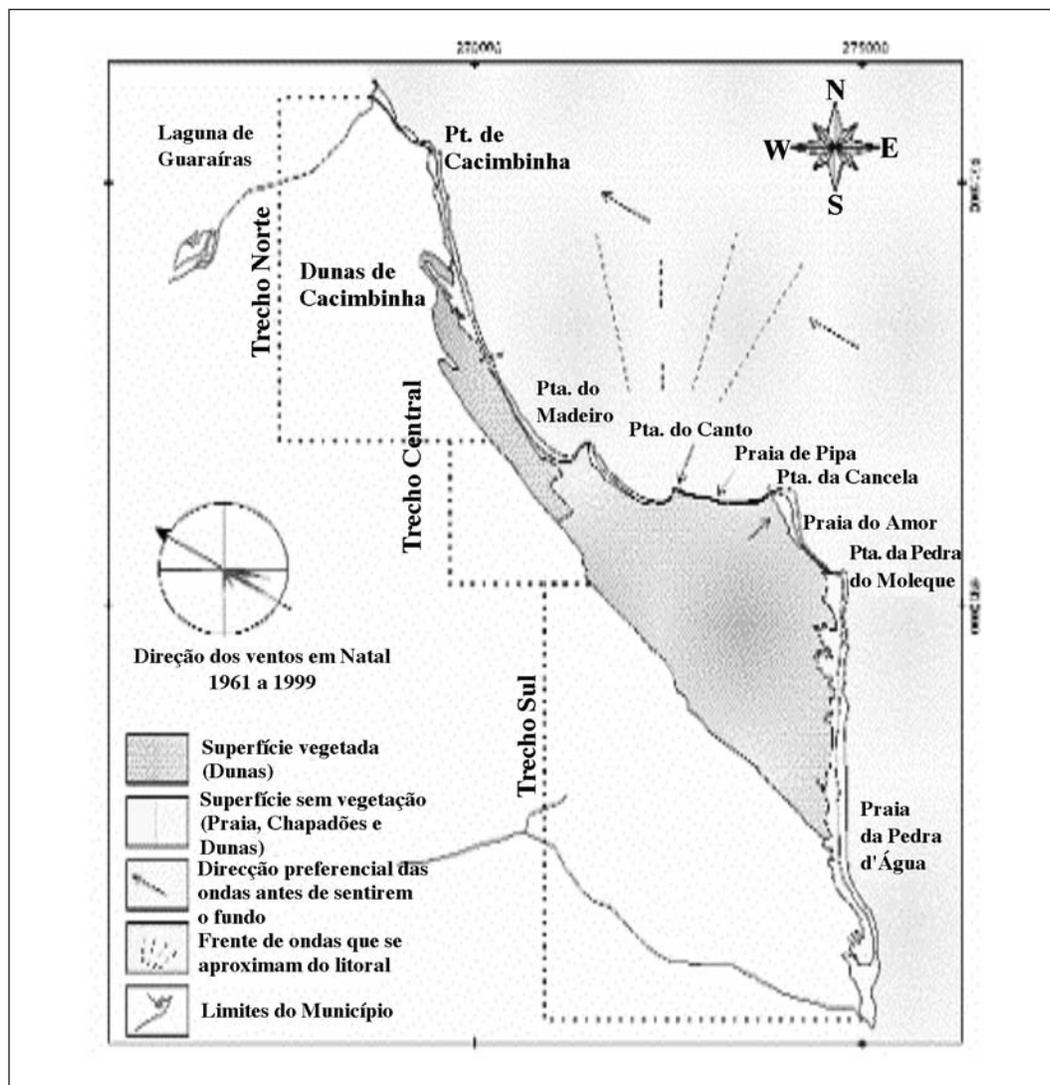


Fig. 2 – Zoneamento geomorfológico da área mapeada (Amaral, 2001).

do da caracterização, identificação e classificação dos solos e amostras indeformadas para o estudo das propriedades mecânicas dos solos (compressibilidade e resistência).

Durante as campanhas de amostragem foram realizadas várias inspeções preliminares com a finalidade primeira de definir os locais adequados e mais representativos à amostragem. As amostras deformadas, em campo, foram obtidas a partir do desgaste das encostas com a utilização de pás e picaretas. A técnica de amostragem indeformada adotada foi a de blocos indeformados, extraídos na base e na parte superior da falésia. Foram retirados blocos cúbicos com 30 cm de aresta.

Foram coletados 04 (quatro) blocos indeformados para o estudo das propriedades geotécnicas dos solos da Formação Barreiras. Um é representativo do material presente no topo da falésia, o segundo corresponde ao material da base. Na parte intermediária aparecem materiais fortemente cimentados com óxido de ferro, nos quais a retirada de amostras é muito difícil. Além disso, o acesso à meia encosta dificulta ainda mais a amostragem. Assim, foram retirados dois blocos de antigas

áreas de empréstimos distantes das falésias, porém pelo fato de pertencerem à mesma formação geológica (Formação Barreiras) e pelo aspecto visual observado, admite-se que sejam representativos do material das camadas intermediárias. As amostras foram identificadas como Topo - Falésia, Base - Falésia, Piau - RN 003 e BR - 101, em função da sua localização.

O bloco Topo - Falésia foi retirado na Ponta da Pedra do Moleque (Figura 2) e o bloco Base - Falésia foi retirado próximo a Ponta da Cacimbinha (Figura 2). O bloco BR - 101, foi retirado a margem da estrada na altura do km 131 - RN e o bloco Piau - RN 003 foi retirado à margem da estrada RN 003, na altura do km 8 na localidade de Piau-RN.

3.4 – Ensaios para a caracterização dos solos

Os ensaios de caracterização realizados foram aqueles rotineiramente empregados no meio geotécnico (limites de consistência; granulometria por peneiramento e sedimentação; e densidade dos sólidos) e os ensaios de imersão (“*crumb test*”). Os primeiros serviram para subsidiar o uso do Sistema Unificado de Classificação dos Solos, enquanto que os ensaios de imersão foram usados para avaliar a dispersividade do solo. Os ensaios de caracterização seguiram as recomendações estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): NBR 6459/84 para o limite de liquidez; NBR 7180/84 para o limite de plasticidade; os ensaios de granulometria foram realizados de acordo com os procedimentos prescritos pela NBR 7181/84. A determinação da densidade real dos sólidos (Gs) foi realizada com base no método do picnômetro, conforme a NBR 6508/84.

Os ensaios de imersão foram realizados conforme descrito por Head (1985). Para cada corpo de prova, retirou-se um cubo de aresta de aproximadamente 8 cm. A partir do cubo era moldado um corpo de prova esférico, com diâmetro aproximado de 5 cm. Uma vez o corpo de prova preparado, pegava-se um bécher e colocava-se água em quantidade suficiente para cobrir toda a amostra, algo próximo de 600 ml. O passo seguinte foi inserir a amostra no bécher e em seguida anotar todas as observações realizadas. Durante as observações verifica-se a forma de desintegração do corpo de prova, o tempo decorrido e a dispersividade dos grãos do solo em meio aquoso com acréscimo da solução de hidróxido de sódio.

Conforme o tipo de desintegração, Head (1985) classifica os solos em quatro graus: grau 1 - não reagente, grau 2 - reação leve, grau 3 - reação moderada e grau 4 - reação forte. Os graus 1 e 2 indicam um solo não dispersivo e os graus 3 e 4 indicam um solo dispersivo.

Para os ensaios de imersão parcial do solo (capilaridade) foram utilizadas esferas de diâmetro igual a 5 cm moldadas como descrito acima. Preparado o corpo de prova, adicionou-se água no bécher em quantidade suficiente para cobrir a terça parte da altura da amostra, algo próximo de 200 ml. Em seguida inseriu-se a amostra no bécher e anotaram-se todas as observações realizadas. Durante as observações verificou-se a forma que a água avançava por capilaridade e o tempo decorrido para a mesma atingir diferentes alturas sobre a amostra.

3.5 – Ensaios para a obtenção das propriedades hidráulicas e mecânica dos solos

Foram realizados ensaios de permeabilidade com carga variável em amostras indeformadas com vistas à identificação das características de permeabilidade dos solos. O ensaio de permeabilidade em laboratório foi realizado como recomendado por Head (1985).

As propriedades mecânicas foram obtidas em ensaios de compressão não confinada e de cisalhamento direto. Os procedimentos empregados foram os indicados por Head (1985). Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados em amostras na condição de umidade natural e na condição inundada. Esse procedimento visou à identificação do efeito da saturação sobre as propriedades de resistência do solo.

4 – RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados obtidos foram analisados e agrupados segundo os aspectos referentes aos processos de instabilização observados e suas causas, e segundo as propriedades geotécnicas dos solos que formam as falésias.

4.1 – Tipos de processos observados

Ao longo da área estudada e no decorrer do período de observação foram identificados dois conjuntos de processos, os continentais e os costeiros. Os primeiros consistem em processos que atuam em qualquer talude independentemente da sua proximidade da zona costeira e dependem das condições pluviométricas, da geometria do talude e presença de descontinuidades no maciço. O segundo se refere à ação do mar através das ondas e correntes atuando na base das falésias.

Os principais tipos de instabilização observadas relativamente à ação de processos continentais foram: a erosão pluvial, os escorregamentos, as quedas e os tombamentos de blocos. Todos os processos observados estiveram correlacionados a precipitações pluviométricas, uma vez que só ocorreram na estação chuvosa. Os processos costeiros resultam do ataque das águas do mar nos taludes que formam incisões no sopé das falésias.

4.1.1 – Erosão pluvial

O processo erosivo causado pela chuva tem como principal área de atuação as regiões de climas tropicais, onde os totais pluviométricos são maiores do que nas outras regiões do planeta. O fato das chuvas se concentrarem em certas estações do ano nessas regiões agrava ainda mais a erosão. Embora os solos tropicais estejam adaptados ao clima tropical (com chuvas intensas), quando estes estão desprovidos de cobertura vegetal, o processo erosivo se instala mais facilmente, devido às chuvas incidirem diretamente sobre a superfície do terreno.

A erosão pluvial começa no instante em que as primeiras gotas de chuva batem no solo. Tal momento é denominado de splash e pode resultar na ruptura dos agregados, selando o topo do solo e dando condições para formações de poças. A partir daí, a água começa a escoar na superfície, primeiramente em lençol, depois em fluxos lineares, evoluindo para microravinas, podendo formar cabeceiras, com algumas delas sofrendo bifurcação, formando novas ravinas (Figura 3). O aprofundamento das ravinas pode levar a formação de voçorocas. Estas se caracterizam por grande profundidade e formação de paredes laterais íngremes (Guerra *et al.*, 1999). Alguns trabalhos diferenciam ravinas de voçorocas pelo fato de nestas últimas a sua dinâmica apresentar contribuições da água subterrânea (IPT, 1991). Porém neste trabalho optou-se por utilizar a classificação geométrica proposta por Guerra *et al.* (1999), uma vez que nos processos observados nas ravinas de maior porte (voçorocas) a contribuição das águas subterrâneas ocorria apenas na estação chuvosa.

A ação do *splash*, conhecido por erosão por salpicamento (Guerra e Guerra, 1997), é o estágio mais inicial da erosão. O papel do *splash* varia não só com a resistência do solo ao impacto das gotas de chuva, mas também com a energia cinética presente nessas gotas.

A medida que os agregados são destruídos e a superfície do solo se torna selada, as crostas formadas passam a oferecer uma resistência maior a ação do *splash*, mas por outro lado ocorre um aumento do escoamento, que ao atingir altas velocidades destacam os sedimentos e transportam os mesmos dentro das ravinas.

A água acumulada nas depressões do terreno começa a escoar quando o solo está saturado e as poças estão no seu limite máximo. No início o escoamento é difuso, uma espécie de escoamento em lençol (*sheetflow*), também conhecido por fluxo laminar, o que provoca a erosão em lençol, ou erosão laminar. Com o passar do tempo, à medida que o fluxo aumenta encosta abaixo, a erosão fa-

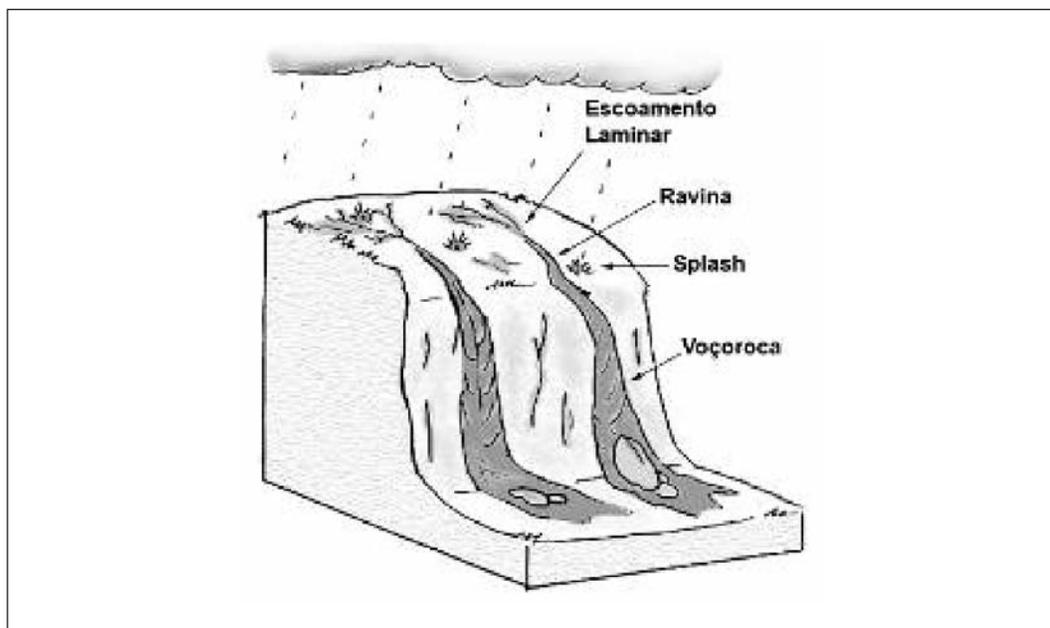


Fig. 3 – Erosão pluvial em encostas.

talmente irá começar a partir de uma distância crítica do topo da encosta. Uma pequena incisão no solo aparece neste estágio do processo erosivo, principalmente nas regiões onde o fluxo de água começa a se concentrar, dando origem às ravinas. Este é considerado o primeiro estágio do processo erosivo (Merritt, 1984).

A erosão pluvial é o processo mais freqüente observado na área. Ocorrem na forma de ravinas e voçorocas. Foram observadas erosões tanto no topo como na face das falésias. A sua ocorrência depende da área de contribuição do escoamento superficial, da granulometria do material, da inclinação do talude e do comprimento da trajetória da água no talude. A Figura 4 mostra alguns processos erosivos superficiais observados na área em estudo.

As erosões observadas estão associadas a existência de extensas áreas planas adjacentes às falésias e com leve inclinação em direção à crista do talude. Essas áreas recebem as águas de chuva que escoam superficialmente na direção do mar. No seu percurso formam sulcos no terreno que posteriormente se transformam em ravinas (Figura 4a) e eventualmente em voçorocas (Figura 4c). A implantação de rodovias próximas das falésias pode provocar a formação de ravinas associadas à saída de água dos dispositivos de drenagem (Figura 4b).

Processos erosivos superficiais também foram observados na face dos taludes. A Figura 5 mostra uma vista do início do trecho Norte. Nessa Figura pode-se observar a formação de ravinas provocadas pelo escoamento da água na face da falésia.

A erosão na face da falésia só foi observada em taludes com inclinação da ordem de 40° com a horizontal sem a presença de vegetação. Taludes com mesma inclinação, porém com presença de cobertura vegetal, assim como taludes mais íngremes não apresentaram problemas de erosão superficial na face da falésia. A cobertura vegetal protege o solo através de três fatores: impede o impacto direto das gotas de água, diminui a quantidade e a velocidade do escoamento superficial e reforça o solo através das raízes. Os taludes mais íngremes não apresentaram erosão pelo fato da água da chuva não atingir diretamente a face do talude, além de apresentarem menores áreas de captação e de comprimentos de rampa.



(a) Ravina no trecho norte



(b) Ravina provocada pela drenagem de rodovia adjacente a falésia



(c) Voçoroca no trecho sul

Fig. 4 – Fotos de processos erosivos na área estudada.



Fig. 5 – Foto de erosão superficial na face da falésia no trecho norte.

4.1.2 – Escorregamentos

Os escorregamentos se caracterizam pela formação de uma superfície de ruptura bem definida. Nesta ocorre concentração de deformações cisalhantes. A massa instável se desloca como um bloco ao longo da superfície de deslizamento. Podem ser rotacionais ou translacionais, dependendo da forma da superfície de ruptura (Figura 6).

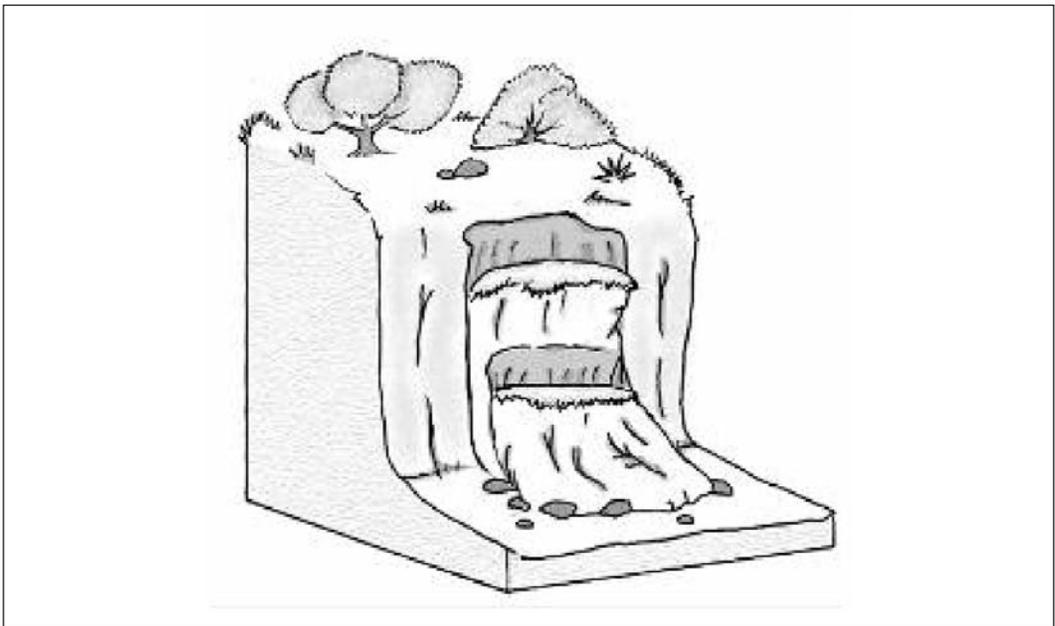


Fig. 6 – Escorregamentos.

Os escorregamentos de maior amplitude, embora não sejam muito frequentes na área, estão entre os movimentos que apresentaram conseqüências mais graves. A Figura 7 apresenta vistas de dois escorregamentos ocorridos na área estudada, após chuvas intensas.

O escorregamento da Figura 7a ocorreu no final do mês de Junho de 2000. No topo da falésia há um hotel com construções bem próximas a crista do talude, uma escada de acesso à praia e uma construção na parte inferior. A instabilização provocou danos na escadaria de acesso à praia e na construção na parte inferior da falésia.

A superfície de ruptura foi composta de duas partes: circular na parte superior e planar na inferior. De acordo com relato de pessoas que presenciaram o evento, teria ocorrido o primeiro escorregamento na parte inferior. A parte superior teria ficado sem sustentação e em seguida sofrido o deslizamento. No trecho da instabilização a falésia apresenta altura de 30 metros e inclinação de 50°. O talude era completamente revestido por vegetação.

O escorregamento mostrado na Figura 7b foi observado em Junho de 2004. A superfície de deslizamento era aproximadamente circular e atingiu a parte superior da falésia. No local do deslizamento a falésia tinha 40 metros de altura possuía vegetação apenas na parte superior. O perfil do talude era próximo da vertical na metade inferior e inclinação de 60° na parte superior. Não havia construções nas imediações e a superfície de escorregamento foi condicionada pela existência de fraturas verticais (fendas de tração) na parte superior do material que forma a falésia.

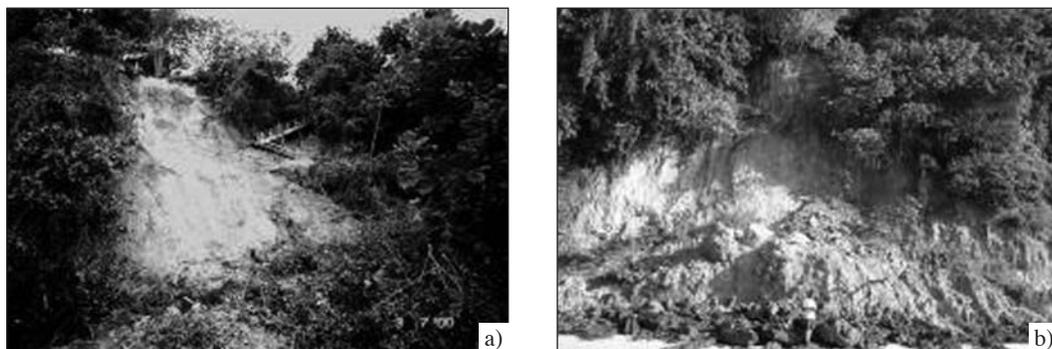


Fig. 7 – Fotos de escorregamentos no trecho central da área estudada.

4.1.3 – Quedas e tombamentos

Nas quedas, o material se destaca da encosta e se movimenta em queda livre. Comumente, os movimentos são muito rápidos e podem ou não ser precedidos por movimentos menores que levam à separação progressiva do seu local de origem. Durante o percurso da queda, o material pode atingir outros pontos da encosta deflagrando novas quedas.

Nos tombamentos, o material instável gira em torno de um ponto na sua base. Atuam no sentido de desestabilização a força da gravidade e as pressões de fluido que preenchem as descontinuidades. As quedas e os tombamentos de materiais normalmente estão associados a encostas íngremes, rochosas e com padrão de fraturamento que proporcione a compartimentação do maciço na forma de blocos (Figura 8).

A Figura 9 mostra alguns exemplos desse tipo de movimento de massas. As quedas e os tombamentos foram observados em falésias íngremes, associadas com a presença de fraturas que compartimentavam o maciço em vários blocos e lascas. As instabilizações ocorrem com mais frequência no período chuvoso, no entanto já ocorreram alguns movimentos nos períodos de seca.

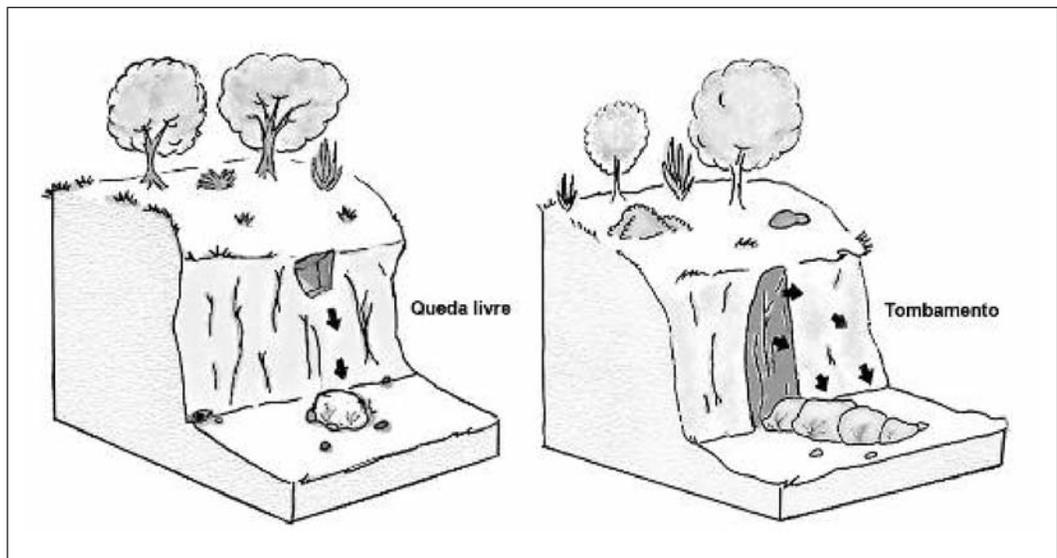


Fig. 8 – Quedas e tombamentos de blocos.

4.1.4 – Ação do mar na base da falésia

A erosão marinha no pé de taludes costeiros provoca escavações na área atingida (Figura 10). A escavação aumenta a inclinação da base da encosta, formando taludes negativos, o que pode provocar movimento de massas de segmentos inteiros do talude. Este material depositado na base pode ser removido pela ação das ondas, contribuindo no balanço sedimentar. Esse processo é regulado pelo balanço entre as forças hidrodinâmicas (ondas e marés) e pela proteção proporcionada pela faixa de praia à base da encosta. Os fatores relativos à encosta são formados pela geologia, comportamento geotécnico, hidrologia e a geometria do perfil (Silva, 2003). Na área em estudo foram identificados vários pontos onde há a formação de incisões na base da falésia. Essa situação foi mais frequente no trecho central (Figura 10b).

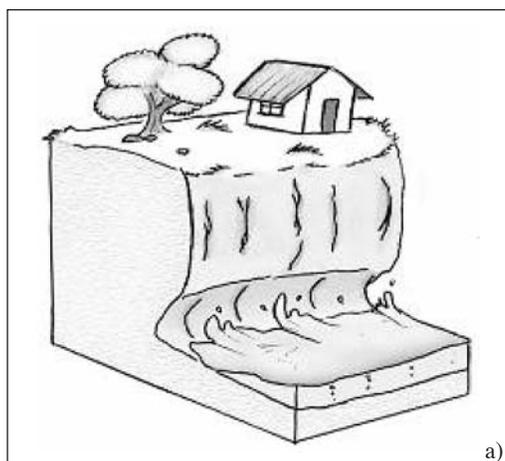


Fig. 10 – Fotos de incisões na base da falésia formadas pela ação das ondas.



(a) Acúmulo de material na base da falésia proveniente de quedas



(b) Bloco destacado na iminência de tombar



(c) Bloco tombado

Fig. 9 – Fotos de quedas e tombamentos de materiais das falésias.

4.2 – Propriedades geotécnicas dos solos que formam as falésias

4.2.1 – Caracterização do material

O material que forma as falésias pertence à Formação Barreiras. Esta consiste de camadas de arenitos argilosos com diversos teores de silte e argila, siltitos e argilitos. Algumas camadas são fortemente cimentadas com óxido de ferro, o que lhe confere uma coloração escura. A maior parte do material é escavável com equipamentos manuais, exceto as camadas com cimentação ferruginosa mais intensa.

O bloco denominado Topo – Falésia apresenta coloração avermelhada, bastante homogêneo, sem fissuras e com incrustações de grãos de quartzo, de granulometria variada. O bloco Base – Falésia é de coloração esbranquiçada, apresentando nódulos vermelhos, sem fissuras. Este tem uma grande resistência ao destorroamento. O bloco Piau – RN 003 é bastante heterogêneo com coloração variegada, indo do amarelo ao vermelho escuro, passando por tons de marrom, apresentando fissuras variadas. Este se caracteriza pelo fácil destorroamento e por possuir nódulos de cimentação, com óxido de ferro, de cor roxa, de grande resistência. Finalmente o bloco BR – 101 apresenta coloração variegada, com vários tons de marrom e com menor presença de fissuras e, por consequência, uma maior resistência ao destorroamento quando comparado ao bloco Piau - RN 003. O Quadro 1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização e a classificação obtida pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos.

Quadro 1 – Resultado dos ensaios de caracterização e classificação dos solos (ISSMFE).

Amostra	Ped.(%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL	IP	Gs
Topo - Falésia	0,0	37,5	18,5	44,0	28,8	7,3	2,66
Base - Falésia	0,0	63,0	2,5	34,5	31,5	16,3	2,61
Piau - RN 003	2,6	25,4	10,2	61,8	30,1	6,3	2,67
BR - 101	0,7	54,8	4,5	40,0	37,0	18,6	2,64

Ped. = Pedregulho ($\Phi > 2,0\text{mm}$); Areia ($0,06 < \Phi < 2,0\text{mm}$); Silte ($0,002 < \Phi < 0,06\text{mm}$); Argila ($\Phi < 0,002\text{mm}$); Gs = densidade dos sólidos; Φ = diâmetro das partículas.

Os solos das amostras indeformadas consistem de argilas de baixa plasticidade (CL) de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), pois todos apresentaram porcentagem passando na peneira N° 200 ($\Phi = 0,075 \text{ mm}$) entre 55,0 e 68,0%.

Os solos apresentam baixa atividade da fração argilosa, o que é compatível com as análises mineralógicas realizada por Chaves (1979) que encontrou na fração fina do solo o argilomineral caulinita, da subclasse dos filossilicatos e ainda, os não-silicatos, goetita e hematita.

4.2.2 – Resultados da imersão total do solo (crumb test)

Foram realizados doze ensaios para verificar a dispersão do solo, onde cinco, foram com amostras provenientes do topo das falésias, cinco com amostras oriundas da base e mais duas com material proveniente da BR 101. Tanto o material da base quanto o do topo rapidamente passavam a liberar partículas de solo.

O material proveniente da base praticamente se desintegrou e isso se deu em menos de cinco minutos. As amostras que possuem uma grande quantidade de nódulos avermelhados apresentam uma característica interessante: a parte mais clara da amostra se solta primeiro e isto ocorre na

forma de escamas ou pastilhas. Já o material mais avermelhado se solta em partículas com velocidade bem inferior. Após 24 horas em repouso, o material mais claro fica quase que totalmente desagregado. Já o mais avermelhado ainda apresenta-se de forma aglutinada. A dispersividade deste material pode ser considerada pequena, embora deixe a água um pouco turva e forme um anel na superfície do líquido. O material mais claro é o maior contribuinte para a formação do anel.

O material proveniente do topo possui uma tonalidade avermelhada e oferece, em relação ao material da base, uma grande resistência à liberação das partículas quando imerso. À medida que as bolhas vão surgindo neste material, os espaços vazios vão sendo preenchidos e as fissuras (fraturas) tornam-se bastante visíveis.

A perda por imersão do material do topo se dá através de escorregamentos ou quedas e o material se solta em placas. Mesmo após 24 horas o material permanece praticamente intacto, exceto em casos onde a amostra encontrava-se fortemente fraturada e com plano de ruptura pré-definido. Até mesmo o material oriundo do movimento de massa permanece com sua estrutura preservada, ou seja, na forma de pequenos blocos.

Em uma das amostras da BR 101 a esfera moldada apresentava uma fissura natural, verificou-se que cinco minutos após o início do Crumb test, com a amostra já saturada, houve uma expansão da fissura devido ao aumento da poro-pressão.

Aos 15 minutos, verificou-se o desprendimento de um bloco da região fissurada de aproximadamente 1cm³. Aos 55 minutos verificou-se a ruptura completa do local fissurado na esfera, o que equivale a aproximadamente 1/5 da esfera. Foi observado que não ocorreu a presença de materiais em suspensão; ao se adicionar Hidróxido de Sódio no bécher. Observou-se que na presença do mesmo houve desprendimento de partículas finas no bloco, elevando a turbidez da água.

Em resumo, verificou-se que o material da base apresenta forte reação, sendo considerado de grau 4, caracterizando um solo dispersivo, enquanto o solo do topo e da BR 101 apresentaram uma reação muito suave, de grau 2, caracterizando um solo não-dispersivo.

4.2.3 – Resultados da imersão parcial dos solos (capilaridade)

Ao todo, foram realizados quatro ensaios de imersão parcial (capilaridade), com amostras provenientes dos blocos indeformados, com comportamento muito semelhante. Com a submersão de 1,0 cm da esfera de 5 cm de diâmetro; a água começava a se deslocar em sentido ascendente no corpo de prova. Após 2 minutos foi verificado que havia uma cinta de ascensão de água de aproximadamente 1,0 cm acima do nível da água. Em um dos blocos havia uma fissura proveniente de seu estado natural. Foi observado que na região da fissura a velocidade de ascensão da água foi visivelmente maior.

Após 5 minutos, a cinta de saturação se elevou mais 0,5 cm. Toda a região fissurada apresentou sinais de umedecimento. Entre 10 e 25 minutos a saturação da esfera permaneceu avançando lentamente em direção ao centro da mesma. A cinta de saturação horizontal continuou elevando-se gradualmente.

Após 20 minutos, na amostra da BR 101, a região da amostra acima da parte fissurada apresenta sinais de umedecimento. Decorridos 40 minutos os sinais de umedecimento permaneceram avançando rumo ao topo da esfera. Decorridos 50 minutos os sinais de umedecimento tomaram praticamente toda a esfera (95%), e após 60 minutos todas as esferas ficaram completamente tomadas por sinais de umedecimento.

4.2.4 – Resultados dos ensaios de permeabilidade

Foram realizados quatro ensaios de permeabilidade em laboratório com solos da Formação Barreiras. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 2, onde se indicam a localização das amostras, o coeficiente de permeabilidade, o índice de plasticidade e o tipo de solo conforme o SUCS.

Quadro 2 – Resultados dos ensaios de permeabilidade.

Amostra	k (m/s)	% de argila	IP (%)	Classificação (SUCS)
Topo-Falésia	$6,3 \times 10^{-6}$	44,0	7,3	CL
Base - Falésia	$8,2 \times 10^{-9}$	34,5	16,3	CL
Piau – RN 003	$6,5 \times 10^{-5}$	61,8	6,3	CL
BR - 101	$1,5 \times 10^{-8}$	40,0	18,6	CL

A análise do Quadro 2 mostra que os coeficientes de permeabilidade variam sensivelmente. A amostra de Piau – RN 003 apresentou resultado atípico em se tratando de solos argilosos. Na análise granulométrica verificou-se que esse solo possui 61,8% de argila e apresentou elevada permeabilidade. Essa característica pode ser atribuída à existência de microfissuras observadas no interior do solo, microestrutura e agregação por laterização.

De todas as amostras, observou-se que no topo o material é mais permeável que na base, o que deve facilitar a sua saturação por infiltração. De maneira geral, os solos com índices de plasticidade mais elevados apresentam menores coeficientes de permeabilidade.

Esses resultados evidenciam que a falésia é formada por camadas com permeabilidade bastante diferentes. Assim, o sistema de fluxo interno nas falésias é condicionado pela disposição relativa das camadas e pela presença de fissuras nos solos.

4.2.5 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto

Com vistas a se obter os parâmetros de resistência dos solos da Formação Barreiras, coesão e ângulo de atrito, foram realizados os ensaios de cisalhamento direto. Os ensaios foram realizados nas condições naturais (amostras com teor de umidade existente no momento da coleta) e no estado inundado com o objetivo de analisar o efeito da perda de sucção nos parâmetros de resistência do solo.

Os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto estão apresentados no Quadro 3. A análise dos dados indica que a inundação das amostras provoca redução na coesão e quase não afeta o ângulo de atrito. A maior perda de coesão ocorreu na amostra da base da falésia onde a coesão da amostra inundada corresponde a 11,8% da coesão do solo na umidade natural. O solo que apresentou menor redução na coesão foi o da BR 101 cuja coesão no estado inundado corresponde a 42,3%

Quadro 3 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto.

Amostra	Condição	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito ϕ (°)
Topo - Falésia	Natural	233.0	28
	Inundada	50.6	28
Base - Falésia	Natural	384.1	28
	Inundada	45.4	27
Piau – RN 003	Natural	396.6	32
	Inundada	95.5	30
BR - 101	Natural	259.3	27
	Inundada	109.7	26

da coesão no estado natural. A menor redução na amostra da BR 101 provavelmente reside no fato da amostra apresentar maior teor de cimentação entre as partículas.

4.3 – Discussão dos resultados obtidos

Ao longo da área estudada foram observados três perfís tipo (Figuras 11 a 13). O primeiro é um talude vertical ao longo de toda a altura da falésia (Figura 11). O segundo apresenta a parte inferior vertical e a parte superior com inclinação em torno de 45° a 60° (Figura 12). O terceiro apresenta-se inclinado a partir da base da encosta, formando um ângulo em torno de 40° a 50° com a horizontal (Figura 13).

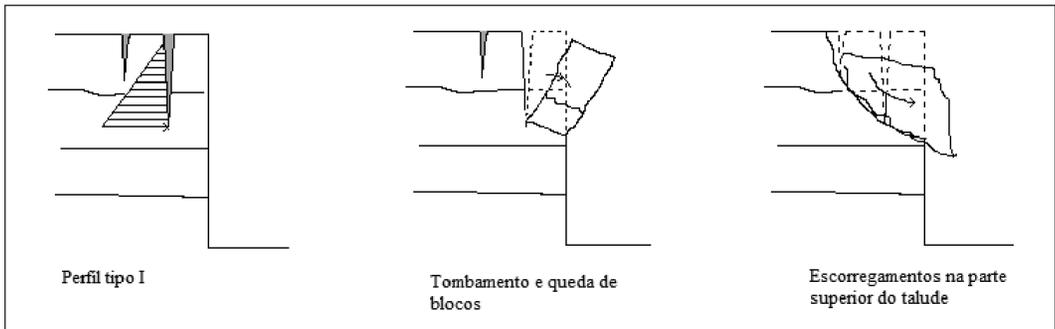


Fig. 11 – Perfil Tipo I.

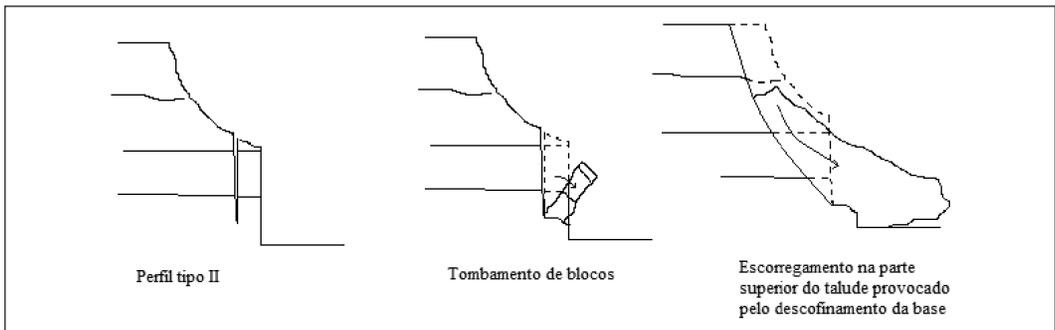


Fig. 12 – Perfil Tipo II.

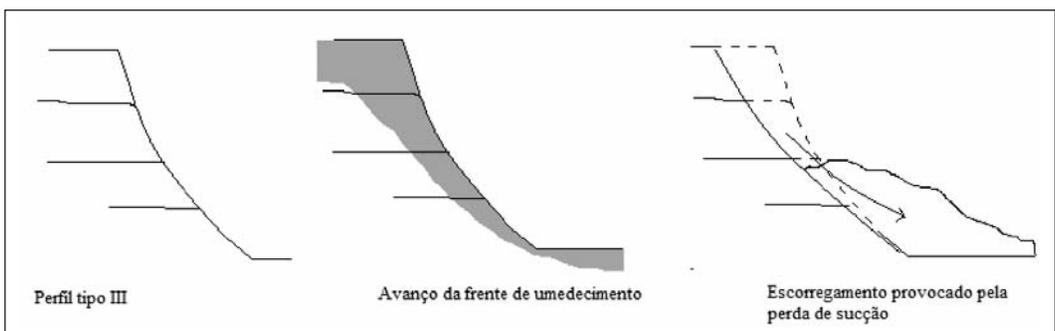


Fig. 13 – Perfil Tipo III.

O Perfil Tipo I mostrado na Figura 11 apresenta elevada susceptibilidade à ocorrência de quedas e tombamentos de materiais. Os taludes verticais também estão susceptíveis a escorregamentos na parte superior da encosta. O Perfil Tipo II, representado na Figura 12 é susceptível a ocorrência de quedas e tombamentos do material da parte inferior pelo fato de possuir talude vertical nesse setor. A parte superior pode sofrer escorregamentos pela falta de confinamento na base do talude e erosão na face inclinada superior. O Perfil Tipo III (Figura 13) apresenta-se mais estável, no entanto podem sofrer escorregamentos e erosão na face do talude. As descontinuidades no maciço provenientes de planos de estratificação, falhas, fraturas e contatos geológicos mergulhando em direção ao talude também se constituem em fatores importantes, uma vez que as rupturas de maciços são condicionadas por tais descontinuidades. Juntas de alívio de tensões subverticais paralelas à crista da encosta tornam-na susceptível a sofrer quedas, tombamentos e escorregamentos. Isso ocorre principalmente associado à pressão exercida pela água que preenche a junta e atua no sentido de expulsar o bloco do talude.

Os escorregamentos superficiais podem ser induzidos pela perda de resistência do solo devido ao aumento do teor de umidade, conforme evidenciado pelos resultados dos ensaios de cisalhamento direto. À medida que a frente de umedecimento avança no solo, ocorre a diminuição da sucção e, por conseguinte o decréscimo da coesão. Assim, taludes que permanecem estáveis com baixo teor de umidade podem romper após um longo período de chuva. Embora a redução da coesão seja comum na maioria dos solos, durante o umedecimento, observou-se que para algumas amostras estudadas o decréscimo da coesão foi da ordem de 80%, quando inundadas, fato esse que pode ser significativo para diminuição da estabilidade das falésias da Formação Barreiras.

Esses escorregamentos estão de acordo com o mecanismo observado nas encostas de solos não saturadas da cidade de Salvador por Menezes e Campos (1992) e por Anjos e Carvalho (1997) nas encostas da Formação Barreiras na cidade de Maceió. Esse mecanismo permite explicar o fato de ocorrerem com maior frequência rupturas em taludes com inclinações menores que outros mais íngremes. O fato é que os taludes mais íngremes favorecem o escoamento superficial, enquanto que nos outros ocorre infiltração. Assim, nos taludes mais íngremes são mantidos os efeitos estabilizantes da sucção (Santos Jr., 2005).

A condição da estabilidade das falésias é agravada quando a água do mar atinge a sua base. Nesses casos, pode ocorrer a formação de incisões no sopé da encosta e levar ao solapamento das camadas superiores. A ação do mar favorece de forma expressiva a ocorrência de movimentos dos tipos quedas, tombamentos e escorregamentos de maiores proporções.

De acordo com os resultados dos ensaios de imersão (*crumb test*), o material da base da falésia foi considerado dispersivo, ou seja, quando em contato com a água se desintegra. Esse aspecto é corroborado pelos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto. Dentre as amostras estudadas, o solo proveniente da base da falésia foi o que apresentou a maior perda de resistência durante a inundação da amostra. Os resultados dos ensaios explicam porque é comum a formação de incisões basais nos trechos de falésias aonde a água do mar chega até o pé do talude.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou o resultado de uma pesquisa a respeito da observação dos mecanismos de ruptura de falésias no Estado do Rio Grande do Norte, Brasil. Foi possível verificar que os taludes da área objeto da análise sofrem instabilizações associados a ocorrência de chuvas e a ação do mar na base da falésia. Ensaios de cisalhamento direto evidenciaram que de fato o solo sofre redução da coesão com o aumento do teor de umidade devido à perda de sucção, enquanto que o ângulo de atrito permanece praticamente inalterado. Taludes verticais apresentam queda de blocos, tombamentos e escorregamentos do material existente na parte superior da encosta. Taludes com inclina-

ção variando de 40° a 60° apresentam erosão superficial e podem sofrer escorregamentos. A ação do mar na base da encosta, através do ataque das ondas e correntes, forma uma incisão no sopé, o que a torna mais instável. Esta ação é facilitada pelo fato de que o solo na base da falésia é dispersivo, conforme mostrado pelos ensaios de imersão.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Pesquisa (Brasil) pelo apoio financeiro através do Processo 478253/2003-6. Agradecem ainda a CAPES pela bolsa de Pós –Doutorado dos autores Ada C. Scudelari e Olavo F. Santos Jr., Processos BEX 2563/06-1 e BEX 0522/06-6 respectivamente.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 7181 (1984). *Análise Granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 6459 (1984). *Determinação do Limite de Liquidez*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 7180 (1984). Solo – *Determinação do Limite de Plasticidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- ABNT NBR 6508 (1984). Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.
- Amaral, R.F. (2001). A Dinâmica Ambiental e o Problema da Erosão na Zona Costeira do Município de Tibau do Sul. IDEMA, Relatório Interno. 45p.
- Amaral, R.F. (2000). Contribuição ao Estudo da Evolução Morfodinâmica do Litoral Oriental Sul do Rio Grande do Norte, Entre Ponta de Búzios e Baía Formosa. Tese (Doutorado em Geociências) Instituto de Geociências – UFRGS, Porto Alegre.
- Amaral, R. F.; Medeiros Júnior, E.; Santos Júnior, O. F. dos; Mendonça, F. J. B. (1997). A Utilização de Fotografias Aéreas de Pequeno Formato No Monitoramento da Falésia de Tabatinga, No Litoral do Rio Grande do Norte. Congresso e Feira Para Usuários de Geoprocessamento. In: CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO, 3. Congresso e Feira para Usuários de Geoprocessamento, CD-Rom. Sagres Editora. Curitiba.
- Anjos, C. A. M.; Carvalho, J. B. Q. (1997). *Análise da estabilidade de encostas em Maceió, Brasil*. Anais 2ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas – II PSL/COBRAE, ABMS/ABGE/ISSMGE, Rio de Janeiro, v. 1, p. 593-599.
- Budetta, P.; Galiotta, G.; Santo, A. (2000). A methodology for of the relation between coastal cliff erosion and the mechanical strength of soils and rock masses. *Engineering Geology*, v. 56, p. 243-256.
- Braga, K.G. (2005). *Uso do Checklist na Identificação dos Processos Erosivos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - UFRN, Natal.
- Bray, M. J.; Hooke, J. M. (1997). *Prediction of Soft-cliff Retreat with Accelerating Sea-level Rise*. *Journal of Coastal Research*, Fort Lauderdale (Florida), v. 13, n. 2, p.453-467.

- Chaves, L. F. M. (1979). Propriedades Químicas e Mineralógicas de Três Solos Vermelhos Tropicais do Estado do Rio Grande do Norte. Dissertação (Mestrado em Ciências) - UFPB, Campina Grande.
- Diniz, R. F. (2002). A Erosão Costeira ao Longo do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte: Causas, Conseqüências e Influência nos Processos de Uso e Ocupação da Região Costeira. Tese (Doutorado em Geociências) Instituto de Geociências – UFBA, Salvador.
- Duperret, A.; Genter, A.; Mortimore, R.N.; Delacourt, B.; De Pomerai, M. R. (2002). *Coastal Rock Cliff Erosion by Collapse at Puys, France: The Role of Impervious Marl Seams within Chalk of NW Europe*. Journal of Coastal Research, West Palm Beach (Florida), v. 18, n. 1, p. 52-61.
- Guerra, A. T.; Guerra, A. J. T. (1997). *Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico*. Rio de Janeiro. Ed. Bertrand Brasil. 652p.
- Guerra, A. J. T.; Silva, A. S.; Botelho, R. G. M. (1999). *Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.
- Head, K.H. (1985). *Manual of Soil Laboratory Testing*. v.1, 2. London: Pentech Pres.
- Hutchinson, J. N.; Chandler, M. P.; Bromhead, E. N. (1981). *Cliff recession on the Isle of Wight, SW coast*. In: International Conference of the Soil Mechanics and Foundation Engineering, 10., Stockholm. Proceedings. vol. 1, pp. 429-434.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. (1991). *Manual de Ocupação de Encostas*. Márcio Angeliere Cunha (coordenador). IPT, São Paulo.
- Lizarraga–Arciniega, R.; Fischer, D.W. (1998). *Coastal Erosion Along the Todos Santos Bay, Ensenada, Baja California, Mexico: An Overview*. Journal of Coastal Research, Royal Palm Beach (Florida), v. 14, n. 4, p.1231-1241.
- Menezes, M. S. S.; Campos, L. E. P. (1992). *Estabilização de taludes em solos residuais tropicais*. Anais 1ª Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas – 1ª COBRAE, ABMS/ABGE, Rio de Janeiro, v. 1., p. 101-109.
- Merritt, E. K. (1984). *The identification of four stages during micro-rill development*. Earth Surface Processes and Landforms, 9, 493-496.
- Santos Júnior, O. F. dos (2005). *Estabilidade de encostas e erosão*. In: Geotecnia do Nordeste. 1ª ed. Recife: Editora Universitária da UFPE, v. 1, p. 181-203.
- Santos Júnior, O. F.; Amaral, R. F.; Scudelari, A. C. (2004). Geotechnical Properties of Tertiary Sediments and Failure Mechanism of a Sea Cliff in the State of Rio Grande do Norte, North East Brazil. IX ISL, v. 1, p. 729-733.
- Scudelari, A. C. ; Santos Junior, O. F. dos ; Amaral, R. F. ; Freire, L. C. da S. (2003). *Zoneamento De Áreas Susceptíveis À Ocorrência De Processos Erosivos Costeiros Em Barra Do Cunhaú*. In: II Congresso Sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de Expressão Portuguesa. II Congresso Sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de Expressão Portuguesa. v. 1. Recife. p. 1-10.
- Severo, R. N. F. (2005). *Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa – RN*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – UFRN, Natal.
- Silva, W. de S. (2003). Estudo da Dinâmica Superficial e Geotécnico das Falésias do Município de Tibau do Sul – Litoral Oriental do RN. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – UFRN, Natal.