

Influência da Incisão Basal na Estabilidade de Falésias no Litoral do RN

Breno Marques Ferreira da Silva
UFRN, Natal - RN, Brasil, brenomarquesfs@gmail.com

Osvaldo de Freitas Neto
UFRN, Natal - RN, Brasil, osvaldocivil@ct.ufrn.br

Olavo Francisco dos Santos Júnior
UFRN, Natal - RN, Brasil, olavo@ct.ufrn.br

Ricardo Nascimento Flores Severo
IFRN, Natal - RN, Brasil, ricardo.severo@ifrn.edu.br

Nathália Marinho Barbosa
UFRN, Natal - RN, Brasil, nathaliamarinhobarbosa@hotmail.com

RESUMO: A linha costeira está em constante processo de modificação, tanto da sua posição (recoo), quanto da forma. O recoo de falésias litorâneas é um processo físico, dinâmico e complexo, controlado essencialmente pela geologia da área, propriedades de resistência dos materiais e as condições marinhas e climáticas da região. Esse processo está diretamente ligado à erosão basal, a qual é basicamente a destruição mecânica e/ou remoção de partículas de solo do “pé” das falésias costeiras, através principalmente da ação das ondas. A ação simultânea da erosão basal nas falésias e chuvas de elevadas intensidades, diminuem a estabilidade das encostas e podem deflagrar movimentos de massa e mudanças nas paisagens naturais. Variações geológicas, o intemperismo e o regime das marés exercem influência importante na evolução da erosão e interfere de forma direta no processo de recoo das falésias. Então, é indispensável uma reavaliação das implicações práticas do uso e ocupação das áreas costeiras. A zona costeira do Rio Grande do Norte é constituída predominantemente por praias arenosas e falésias ativas da formação barreiras. Nessa área, a ocupação humana vem se intensificando e, portanto, potencializa-se a probabilidade de ocorrência dos movimentos de massa. O objetivo deste trabalho é analisar a influência direta da erosão basal na estabilidade de taludes, nas falésias situadas no litoral do Rio Grande do Norte, no município de Tibau do Sul.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão basal, Erosão Costeira, Processos Erosivos, Estabilidade de Taludes, Falésias.

1 INTRODUÇÃO

A erosão basal pode ser definida como a destruição mecânica do solo, com remoção de material do “pé” do talude costeiro, sendo de acordo com Young A.P. (2015), largamente atribuído à ação marinha e seus processos e.g. impacto direto das ondas, abrasão e correntes

marinhas nas falésias vivas, com diminuição do volume de sedimentos que protegem sua base. Isso eleva o poder erosivo das ondas e a formação de grandes incisões, podendo provocar instabilização na parte superior do maciço, na forma de escorregamentos, quedas e tombamentos. De acordo com Richards e Lorriman (1987), o recoo de falésias mediante

processos erosivos na base das encostas é contínuo e a longo prazo, enquanto que a curto prazo é um processo cíclico de ruptura e estabilização temporária, ambos são influenciados pela eficiência da erosão basal.

Segundo Terzaghi (1950) apud Richards e Lorriman (1987), a estabilidade de taludes é influenciada por fatores passivos, relativos à litologia, estratigrafia, estrutura e topografia, variando apenas após longos períodos e ativos (deflagradores), os quais são associados à perda de resistência ao cisalhamento devido ao intemperismo e aumento da poro-pressão. Na erosão basal combina-se a esses fatores, acionando movimentos de massa, tornando os taludes mais íngremes, podendo ocorrer até inclinações negativas nos respectivos taludes.

Conforme Diniz (2002), a linha de costa norte-rio-grandense é formada por uma grande sequência de baías em forma de zeta (anzol), as quais são explicadas essencialmente pela presença de dois fatores: o domínio das ondas de sudeste e a presença de promontórios. Essa tipologia é uma das evidências mais importantes do balanço sedimentar nos processos erosivos costeiros. Visto que a força das ondas é mais intensa nos promontórios e mais fraca nas baías protegidas, algumas regiões estarão mais predispostas a sofrerem processos erosivos.

Portanto, é de extrema relevância avaliar a influência direta da erosão basal na estabilidade de taludes. Para isso, foram utilizados os métodos de equilíbrio limite (EL) (Bishop, Fellenius, Janbu e Morgenstern & Price) e o método dos elementos finitos (MEF), este último conjugado com análises de tensão-deformação (TD) do maciço. Desse modo, com esse trabalho, pretende-se continuar auxiliando as políticas de uso e ocupação do solo, apresentando as condições de estabilidade das falésias frente à ocupação desenfreada de regiões sujeitas a esse tipo de erosão e a recuos costeiros.

2 DESCRIÇÃO GERAL DA ÁREA

As características da região exercem influência direta nos mecanismos de recuos costeiros, ou

seja, em diferentes localidades observam-se diferentes comportamentos relacionados à taxa de erosão. Isso ocorre, pois a evolução da erosão é um processo dinâmico e complexo, controlado diretamente pela geologia da área, propriedades de resistência dos materiais, condições marinhas e climáticas da área. Além destes, outro fator não menos importante está relacionado à ação antrópica, que é responsável por intensificar o problema de instabilização de encostas.

A área objeto de estudo localiza-se no município de Tibau do Sul, a aproximadamente 60km da capital Natal, no litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte. Consiste em um trecho de aproximadamente 16km de extensão composto por praias e falésias ativas da Formação Barreiras.

Conforme Severo (2005), as rochas sedimentares e os sedimentos ocupam praticamente toda a porção litorânea oriental potiguar, sendo representados predominantemente, da base para o topo, pelas rochas carbonáticas e areníticas cretácias e terciárias das Bacias Potiguar e Pernambuco-Paraíba, os depósitos areno-argilosos terciário-quadernários da Formação Barreiras, culminando com as acumulações quadernárias compostas pelos arenitos de praia e sedimentos arenosos, argilosos e argilo-arenosos de ambientes fluviais, lacustres estuarinos, dunares e praias.

De acordo com Severo (2005), as principais formas de relevo identificadas na região são, os tabuleiros costeiros e a planície costeira. Na primeira ocorrem sedimentos da formação Barreiras, que segundo Amaral (2000) apud Severo (2005), consistem de camadas intercaladas de arenitos argilosos, argilitos, conglomerados e arenitos ferruginosos e as dunas são formadas por areias finas quartzosas de origem eólica. Na planície costeira ocorrem praias arenosas. Na região das falésias de Tibau do Sul são encontrados solos que variam do branco com pequenos nódulos vermelhos, passando por alguns tons de amarelo e marrom, até solos completamente vermelhos, todos da formação Barreiras, provenientes de um processo de laterização.

A região estudada possui um trecho com erosão mais severa, a qual inicia-se nas proximidades da praia de Pipa e se estende para

Norte, progredindo por 1,6km, atuando sobre imponentes falésias da Formação Barreiras (Figura 1) e demolindo algumas edificações, incluindo parte do cemitério local (Diniz, 2002). A ocupação humana vem se intensificando e assim, potencializa-se a probabilidade de ocorrência de movimentos de massa, provocando o recuo da linha costeira. Na área, observa-se uma ocupação do solo, relacionada principalmente a residências e empreendimentos turísticos (hotéis, bares e restaurantes).

De forma geral, a região possui falésias com alturas variando de 20 a 40 metros, apresentando basicamente 2 perfis geométricos típicos: inclinados 90° (paredões íngremes) e com inclinações mais amenas próximas a 45° (forma escalonada).



Figura 1. Evidências de erosão nas falésias, com deslocamento causado por solapamento e posterior deposição de sedimentos em sua base, na praia da Baía dos Golfinhos - Pipa/RN (Piérri, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar a influência direta da erosão basal na estabilidade dos taludes costeiros situados em Tibau do Sul/RN, foram modeladas falésias características com feições geométricas típicas da região, por meio de programa computacional do pacote GeoStudio, com a finalidade de calcular o fator de segurança (FS) e sua variação com o aumento da extensão da incisão basal, através de métodos de equilíbrio limite e elementos finitos, bem como verificar o

comportamento da evolução das tensões e deformações nas mesmas condições (aumento da erosão na base).

Foram avaliados os perfis dispendo de 35m de altura, com aproximadamente 90° de inclinação (Figura 2) e o escalonado com aproximadamente 45° de inclinação (Figura 3). Ambos foram analisados com a progressão da incisão basal nas falésias, ou seja, primeiramente sem erosão seguida do aumento gradual da extensão da mesma até 3m. Durante esse processo, a altura da incisão manteve-se constante no valor de 1m.

No tocante aos materiais, foram consideradas duas hipóteses para as simulações: a) considerando uma camada de solo superficial saturada em toda a face externa da falésia (capa saturada) e a porção interna do maciço na umidade natural (não saturada); b) considerando o maciço completamente saturado, situação essa extremamente desfavorável, se tratando da estabilidade de taludes, sobretudo na região ora estudada.

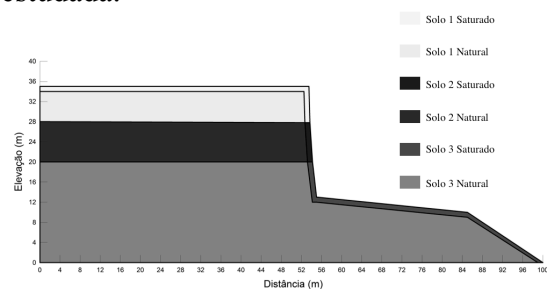


Figura 2. Perfil com aproximadamente 90° de inclinação, com uma capa saturada nas bordas externas (utilize o zoom para melhor visualização).

As propriedades de resistência dos materiais e de deformabilidade utilizadas foram obtidas a partir de Severo (2005; 2011). Os módulos de deformabilidade, ou módulo de Young, foram obtidos a partir das curvas tensão-deformação. Os parâmetros de resistência de pico dos solos da falésia da Ponta do Pirambu (Tibau do Sul) foram obtidos, através de ensaios triaxiais consolidado isotropicamente drenado (CID) (Tabela 1).

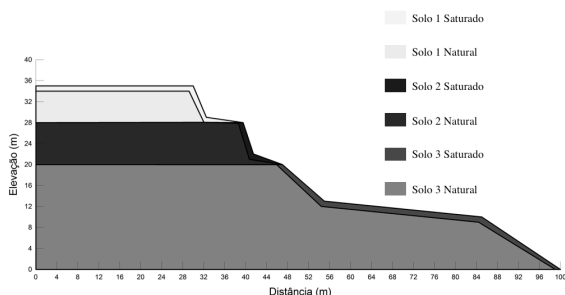


Figura 3. Perfil com aproximadamente 45° de inclinação, com uma capa saturada nas bordas externas (utilize o zoom para melhor visualização).

Tabela 1. Resumo dos parâmetros de resistência e módulo de deformabilidade (módulo de Young) dos solos, utilizados nas simulações (Severo 2005; 2011).

Solo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (MPa)
Solo 1 Saturado	17,2	6,5	29,4	14,7
Solo 1 Natural	15,35	233,0	27,7	14,7
Solo 2 Saturado	18,4	62,5	30,5	71,6
Solo 2 Natural	15,35	233,0	27,7	71,6
Solo 3 Saturado	18,8	110,5	28,3	88,8
Solo 3 Natural	18,81	384,1	28,4	88,8

Nas análises pelo método do equilíbrio limite foram utilizados os métodos de Bishop Simplificado, Fellenius, Janbu e Morgenstern & Price, entretanto para efeito de comparação, utilizou-se aquele que apresentou o valor de fator de segurança mais baixo, o qual em geral foi o método de Morgenstern e Price. Para as análises de tensão x deformação (TD), empregou-se o método dos elementos finitos, onde para os solos, foi considerado o modelo elasto-plástico, cujos parâmetros requeridos estão apresentados na Tabela 1. Posteriormente às análises de TD, foram determinados os fatores de segurança para os respectivos taludes, também pelo método dos elementos finitos, a fim de compará-los com aqueles obtidos pelos métodos de equilíbrio limite supracitados.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Equilíbrio-Limite x Elementos Finitos

Os resultados das análises mostram, conforme esperado, a diminuição do FS com o avanço da extensão da incisão basal na falésia, independente do método utilizado nas análises de estabilidade. As Figuras 4 e 5 expõem essa afirmativa, tomando como hipótese o solo saturado, através de gráficos comparativos.

Analisando o perfil de 90° por MEF (Método dos Elementos Finitos) (Figura 5), constata-se uma variação de 10,7% no FS, comparando o início, sem erosão basal com o final (3m de incisão). Confrontando esse valor, com o apresentado no perfil de 45° (8,9%) nas mesmas condições, observa-se maior influência da erosão na diminuição dos FS no perfil mais íngreme.

No perfil de 90°, considerando o cenário da capa de solo saturado (Figura 6), percebe-se que a diminuição do FS é da ordem de 5,14%, enquanto que no caso do solo saturado esse número aumenta mais de 2 vezes (10,68%).

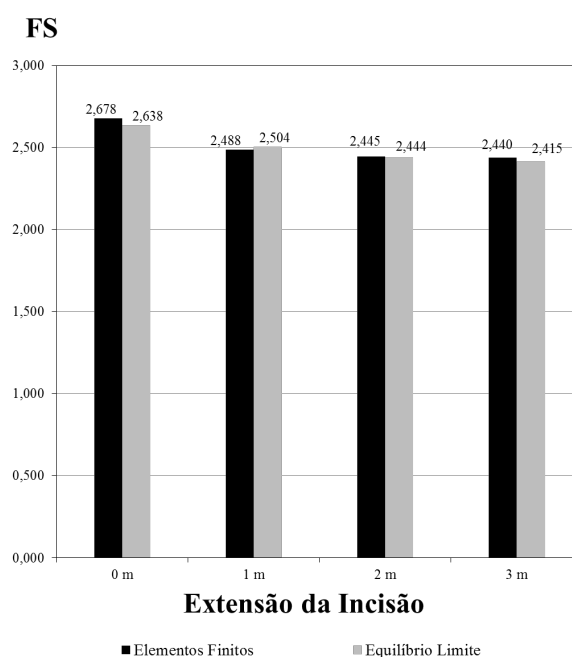


Figura 4. Gráfico comparativo: Modelo com perfil 45° e solo saturado - Evolução dos fatores de segurança (EL e MEF) x Extensão da Incisão Basal.

Dessa forma, constata-se que a coesão do solo é fator preponderante na evolução desse processo, ficando evidente que em solos com coesões menores, a diminuição nos FS, com o aumento da extensão da incisão basal, seria mais significativa, podendo inclusive ocorrer a ruptura do maciço.

Nos resultados resumidos na Figura 7 (perfil de 45°, método de EL), o comportamento se repete, de forma análoga ao explicado anteriormente. Na hipótese da camada de solo superficial saturada, a diminuição do FS com a progressão da incisão é igual a 5,54% do total, ao passo que com o solo saturado, esse valor sobe para 8,45%. Portanto, o processo erosivo

aliado a uma frente de umedecimento no maciço, diminuindo o valor da coesão do solo, os FS cairiam significativamente.

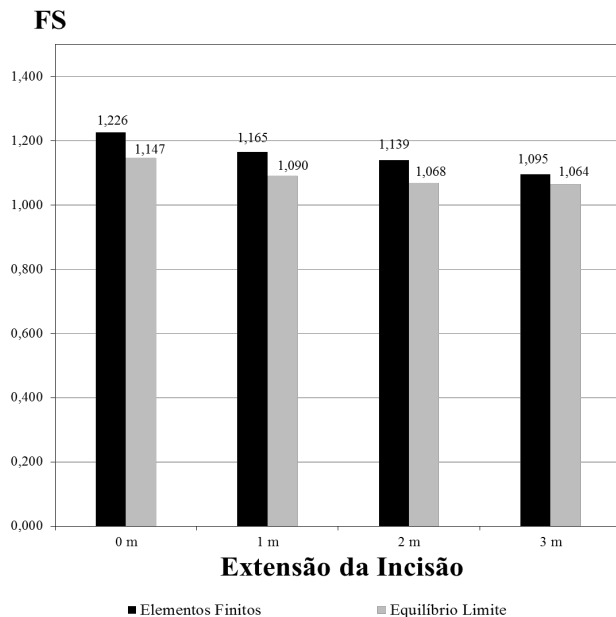


Figura 5. Evolução dos fatores de segurança (MEF e EL) x Extensão da Incisão Basal - Modelo com perfil 90° e solo saturado

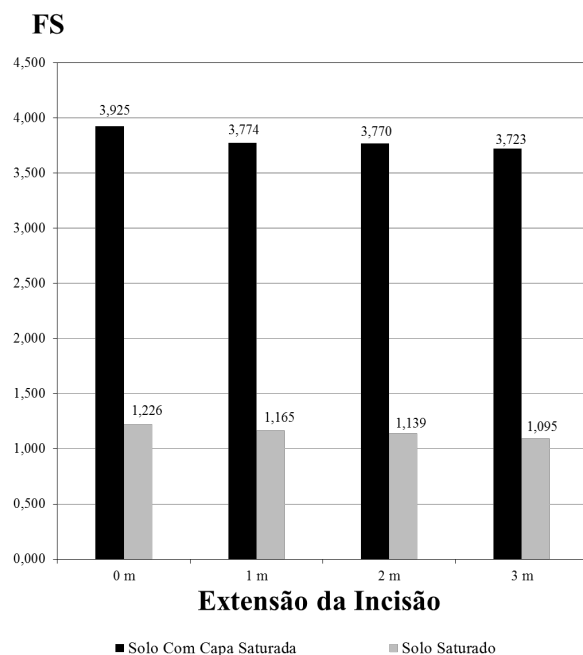


Figura 6. Evolução dos fatores de segurança do perfil com 90° de inclinação, considerando o maciço saturado e apenas a camada superficial do maciço saturada (capa saturada) em função da extensão da incisão basal.

FS

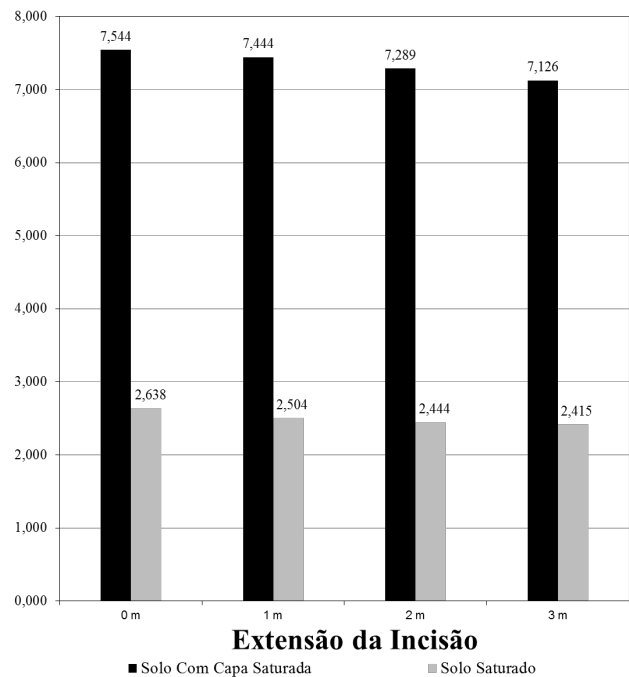


Figura 7. Evolução dos fatores de segurança do perfil com 45° de inclinação, considerando o maciço saturado e apenas a camada superficial do maciço saturada (capa saturada) em função da extensão da incisão basal.

4.2 Tensão x Deformação

Nos resultados das análises de TD, percebe-se o desenvolvimento de tensões mais elevadas, em zonas próximas à incisão basal. Esse comportamento afirma a tendência do rearranjo das partículas do solo na progressão de processos erosivos na falésia.

Tomando o perfil de 90° no início do processo (Figura 8a), ainda sem incisão no pé do talude, as tensões máximas de compressão estão situadas na base do interior da falésia (elevação 0m), cujos valores estão entre 500kPa e 550kPa. Conforme a incisão avança na base da falésia, percebe-se uma mudança no estado de tensões na região adjacente à erosão, conforme é possível observar nas Figuras 8b, 8c e 8d as tensões tendem a se concentrar adjacentes à incisão basal, quando surgiram tensões de compressão na base da ordem de 2300kPa.

Vale destacar que foram observados esforços de tração no solo situado na região superior à incisão (Tabela 2) (Figuras 8d e 8e). Essa zona sob tração, pode justificar a tendência de ocorrência de outros tipos de movimentos de massa localizados, e.g. tombamentos e quedas

de blocos (Figura 1), os quais não estão contemplados nas análises computacionais realizadas nesse estudo, entretanto, são correntemente observadas *in loco*.

Os resultados apresentados para o perfil de 45° seguem de forma análoga, ao descrito anteriormente na progressão das tensões, porém com valores moderados. Assim, no início as tensões máximas de compressão estão situadas na base (450kPa a 500kPa) e à medida que a

erosão progride, as tensões de compressão aumentam ao lado do entalhe formado. Na última fase, surgem altos valores de tensão de compressão, e valores relevantes de tração, situados na região idêntica ao relatado anteriormente (Figura 9). Os valores de tensões efetivas máximas observados no pé do talude (região vizinha a incisão), para os dois perfis estão apresentados na Tabela 2.

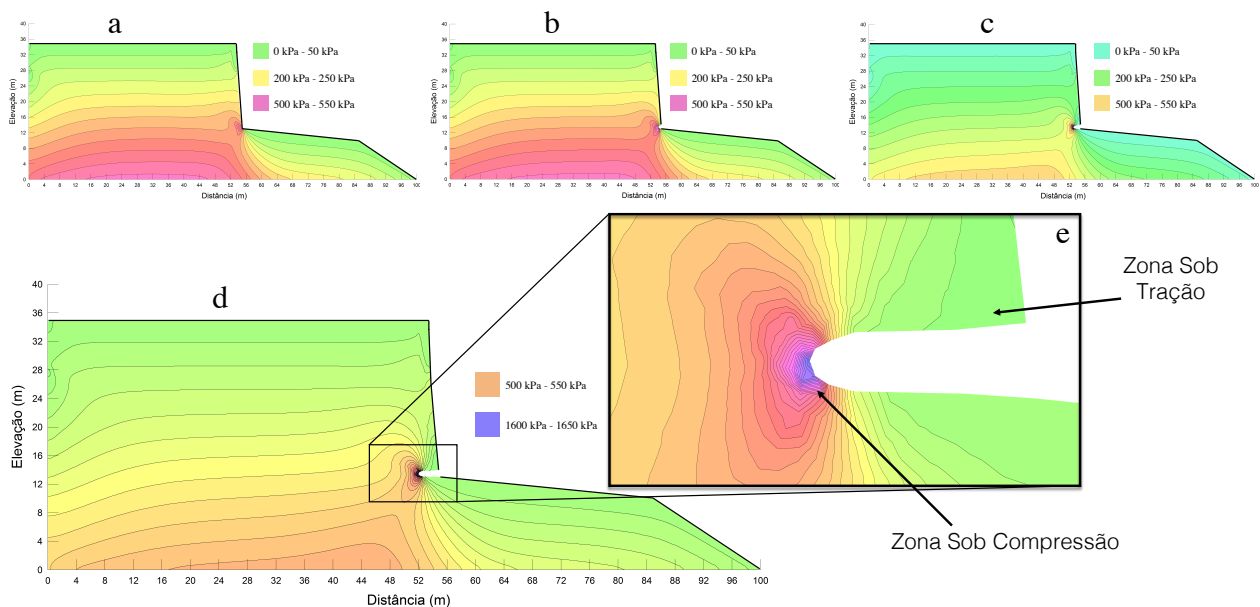


Figura 8. Distribuições de tensões no modelo de capa saturada, no perfil 90° com o avanço da incisão basal. (a) Falésia sem erosão basal; (b) 1m de incisão; (c) 2m de incisão; (d) 3m de incisão; (e) Detalhe da distribuição de tensões com 3m de incisão, mostrando as zonas de tração e compressão.

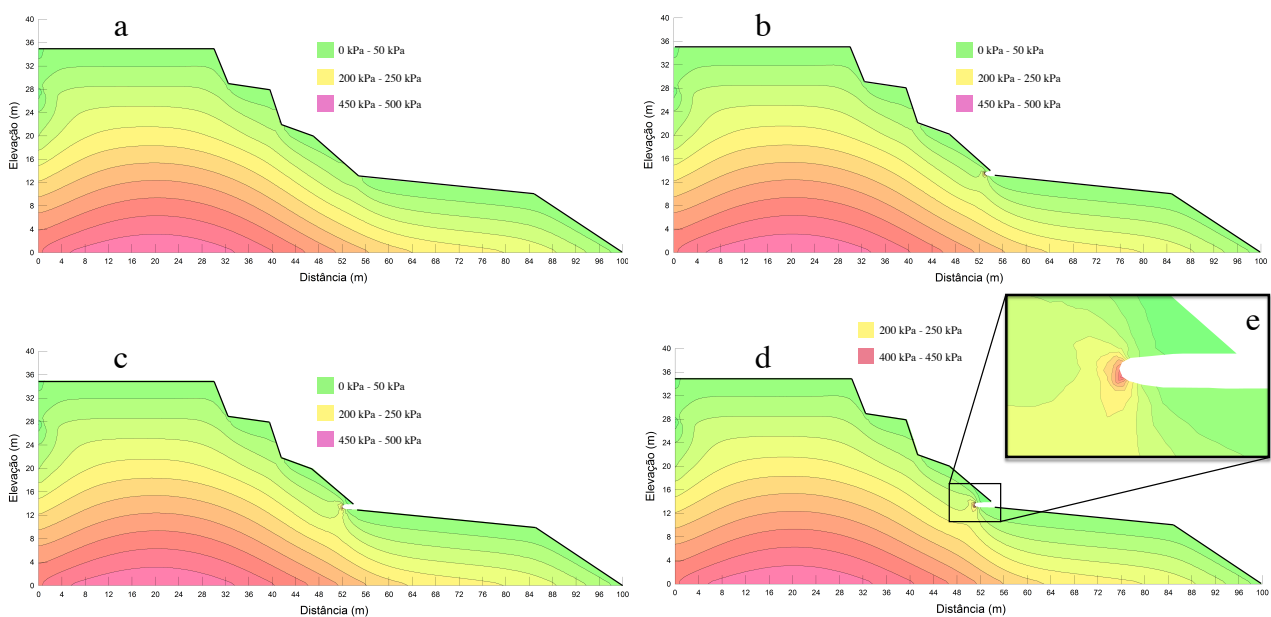


Figura 9. Distribuições de tensões no perfil 45° no modelo de capa saturada, com o avanço da incisão basal. (a) Falésia sem erosão basal; (b) 1m de incisão; (c) 2m de incisão; (d) 3m de incisão; (e) Detalhe da distribuição de tensões com 3m de incisão.

Tabela 2. Resumo das tensões máximas no pé do talude, na região adjacente à incisão basal (perfil 90° e 45°) para o modelo com capa saturada.

Perfil	Extensão da Incisão	Tensões Máximas de Compressão (kPa)		Tensões Máximas de Tração (kPa)	
		σ'_x	σ'_y	σ'_x	σ'_y
90°	0 m	387,7	711,7	0,0	0,0
	1 m	570,5	965,7	47,6	6,4
	2 m	1239,8	2079,6	6,0	31,4
	3 m	1184,0	2359,0	16,6	55,6
45°	0 m	254,9	117,4	0,0	0,0
	1 m	530,8	736,5	5,3	1,0
	2 m	407,8	417,1	22,2	17,7
	3 m	392,3	583,6	17,4	26,4

De acordo com os resultados obtidos observa-se que ao considerar os solos saturados em todo o maciço, há uma maior influência da incisão basal no incremento de tensões adjacente à incisão basal. Além disso, observou-se que o nível de tensões de compressão observadas no entorno da incisão basal é significativamente maior para o perfil com inclinação de 90°, atingindo valores de até 1184,0 kPa e 2359,0 kPa nas direções x e y respectivamente. No modelo com solos saturados, as tensões de compressão e tração possuem valores mais expressivos e avançam até locais um pouco mais distantes da zona da incisão, em comparação com o comportamento notado nas Figuras 8 e 9.

5.0 CONCLUSÕES

O recuo causado pela erosão costeira é um processo físico que envolve perdas de terras, mudanças nas paisagens naturais e uma reavaliação contínua das implicações práticas do uso e ocupação da área. Portanto este trabalho procura contribuir com o propósito de auxiliar nesse contexto, demonstrando o risco da ocupação desenfreada de regiões sujeitas a erosão basal e consequentemente a deslizamentos e movimentos de massa.

Mediante as análises realizadas nesse estudo, e às comparações realizadas, o entendimento dos processos erosivos e seus mecanismos, é possível conjecturar alguns pontos importantes na influência da erosão basal na estabilidade de falésias:

- A incisão basal interfere de forma significativa na estabilidade dos taludes. A curto prazo, o processo cíclico de ruptura e estabilização temporária, varia de acordo com a taxa de erosão basal, a qual depende diretamente da estrutura do solo erodido;

- Comparando-se as duas hipóteses desse trabalho, nos solos saturados (menores coesões), a diminuição do FS é mais acentuada do que no modelo com porção superficial do solo saturado (capa saturada). De acordo com as análises realizadas, em solos menos coesivos esse redução do fator de segurança atinge valores acima de 10%. Portanto, supondo uma frente de umedecimento no maciço, aliado ao processo erosivo, o FS reduziria expressivamente;

- Comparando os métodos utilizados (EL e MEF), nota-se de maneira geral, que o método de EL é mais conservador, retornando na maioria das vezes valores mais baixos de FS;

- As análises de Tensão x Deformação evidenciam a influência da erosão basal na estabilidade de falésias de forma direta. Concomitantemente à evolução da incisão basal, surgem tensões mais elevadas em regiões vizinhas à mesma, sobretudo no modelo com 90° de inclinação;

- Constata-se maior eficiência na ação da erosão em taludes mais íngremes, os quais apresentam menores FS. Esse comportamento é demonstrado, através das comparações realizadas entre os perfis (MEF) e expondo os maiores valores de tensões no pé do talude de 90° (TD);

– À medida que a incisão basal progride, surge uma região sob tração (Figura 8e). Esse comportamento, aliado ao impacto gerado pelas ondas e correntes marinhas, justificam a tendência a outros tipos de movimentos de massa, e.g. tombamentos e quedas de blocos (modo de ruptura esperado). Embora esses mecanismos de ruptura não estejam contemplados nessas análises de estabilidade, tais movimentos de massas são frequentes na região, fazendo-se necessário sua análise em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- Diniz R.F. (2002). *A Erosão Costeira Ao Longo Do Litoral Oriental Do Rio Grande Do Norte: Causas, Consequências E Influência Nos Processos De Uso E Ocupação Da Região Costeira*. Tese de Doutorado da Universidade Federal da Bahia.
- Piérri G.C.S. (2008). *Análise de Risco à Erosão Costeira na Região de Tibau do Sul/RN Através de Mapeamento Geoambiental e Análise Morfodinâmica*. Tese de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Richards K.S. e Lorrman N.R. (1987). *Slope Stability - Geotechnical Engineering and Geomorphology, Chapter 10 Basal Erosion and Mass Movement*. Editado por Anderson M.G. e Richards K.S.;
- Severo, R.N.F. (2005). *Análise da Estabilidade das Falésias entre Tibau do Sul e Pipa - RN*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Severo, R.N.F. (2011). *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*. Tese de Doutorado da Universidade Federal de Pernambuco.
- Young A.P. (2015). *Recent deep-seated coastal landsliding at San Onofre State Beach, California*. Geomorphology;