

## Modelagem cinemática dos sistemas de falhas e aplicação em casos de taludes naturais N030 e N040 da cidade do Salvador, Bahia, Brasil

*Kinematics modelling of the faults systems and application in cases of N030 and N040 natural slopes in Salvador, Bahia, Brazil*

Lucas de Santana Menezes<sup>1</sup> , Luiz César Corrêa-Gomes<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Rua Barão de Jeremoabo, s/n, Ondina, CEP: 40170-290, Salvador, BA, BR (lsantana.geologo@gmail.com; lccgomes@ufba.br)

Recebido em 20 de setembro de 2021; aceito em 14 de maio de 2023.

### Resumo

O processo desordenado de ocupação urbana em uma região de variação topográfica acentuada transformou a cidade do Salvador em uma das cidades brasileiras mais suscetíveis a movimentos de massa. Paralelamente, poucos são os trabalhos que analisam os sistemas de falhas presentes no substrato da cidade como condicionantes das rupturas de taludes. Este trabalho propôs um estudo baseado na realização de uma modelagem cinemática a partir de rede estereográfica igual-área (Schmidt-Lambert). Foram considerados como parâmetros um conjunto de taludes naturais N030 e N040, respectivamente relacionados com o Sistema de Falhas de Salvador (SFS) e o Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI), e as principais estruturas rúpteis presentes na região. Essa modelagem foi aplicada no estudo de caso de 67 taludes próximos aos SFS e SFI, identificados através da interpretação de lineamentos morfoestruturais utilizando os dados geomorfométricos do projeto TOPODATA e por meio de seções transversais em mapa de curvas de nível da cidade do Salvador. Os dados obtidos pela modelagem cinemática viabilizaram a identificação de configurações de taludes suscetíveis aos mecanismos de ruptura associados às estruturas rúpteis descritas na região. O estudo de caso descreve seis locais em Salvador com presença de risco de movimento de massa por escorregamento em cunha e uma localidade onde o risco está relacionado com o mecanismo de tombamento. A divulgação desses dados permite tanto ao poder público quanto aos responsáveis técnicos por empreendimentos locais estabelecer um diagnóstico geotécnico mais acurado a respeito da estabilidade de taludes, com menor risco de prejuízos sociais e materiais.

**Palavras-chave:** Análise cinemática; Estabilidade de taludes; Mecanismos de ruptura; Sistemas de Falhas de Salvador; Sistema de Falhas do Iguatemi; Análise de risco de encostas.

### Abstract

The disorderly process of urban occupation in a region of marked topographic variation transformed the city of Salvador into the Brazilian city most susceptible to mass movement natural disasters. Simultaneously, there is a lack of geotechnical studies about the correlation between the city's substrate and its possible interference toward the deflagration of slope failures. This study was based on the kinematic modelling with equal-area stereographic projection (Schmidt-Lambert). Natural slopes N030 and N040, respectively related to the Salvador Fault System (SFS) and the Iguatemi Fault System (IFS), were considered as parameters, as well as the main brittle structures in the region. The kinematic modelling was applied to a case study of 67 slopes located near SFS and SFI. These slopes were identified and interpreted with morphostructural lineaments characterization, using the digital elevation model of the TOPODATA project, and through cross-sections in a contour map of the city of Salvador. The data obtained by kinematic modeling enabled the identification of slope configurations susceptible to failure mechanisms associated with brittle structures described in the region. The case study describes six locations in Salvador where wedge failure hazards are detected and one location where the hazard is related to the toppling mechanism. The findings of this study allow both policy makers and the technical officers of local enterprises to establish a more accurate geotechnical diagnosis regarding the stability of slopes, with less risk of social and material damages.

**Keywords:** Kinematic analysis; Slope stability; Slope failures; Salvador Fault System; Iguatemi Fault System; Landslide risk assessment.

## INTRODUÇÃO

A cidade do Salvador, uma metrópole brasileira densamente urbanizada, enfrenta problemas relacionados à estabilidade de taludes ao longo de sua história. O rápido crescimento populacional e a ocupação de áreas com declives acentuados colocam Salvador entre as cidades brasileiras com maior número de pessoas em áreas de risco de desastres naturais (IBGE, 2018). A topografia da cidade do Salvador é dividida em três principais domínios: Cidade Baixa, Cidade Alta/Alto de Salvador e região costeira atlântica. Esses domínios são limitados pelo Sistema de Falhas de Salvador (SFS), de direção N030, e pelo Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI), de direção N040. Esses sistemas de falhas estão relacionados à formação da bacia do Recôncavo e à abertura do Atlântico Sul no EoCretáceo.

As estruturas geológicas são parâmetros importantes para avaliar o comportamento dos movimentos de massa, tanto em taludes naturais quanto em projetos de geotecnia. O mecanismo controlador do movimento de massa gerado pela instabilização pode ser definido pela cinemática das estruturas, bem como pelos tensores envolvidos, processos geomorfológicos e composição das rochas (Glastonbury e Fell, 2000). A orientação das estruturas presentes pode contribuir de forma determinante para o processo de instabilização (Stead e Wolter, 2015). O método de análise cinemática (Hoek e Bray, 1981; Wyllie e Mah, 2004) permite classificar o tipo de mecanismo de ruptura a partir da análise das estruturas geológicas em redes estereográficas. Apesar dos vários fatores que condicionam os movimentos de massa, pouco se sabe sobre a influência das estruturas geológicas locais nos mecanismos de ruptura dos taludes do Salvador. No entanto, vários estudos na Bacia do Recôncavo identificaram estruturas fraturadas seguindo um modelo de rifteamento em *horst* e *graben*. É esperado que tanto a tectônica da Bacia do Recôncavo quanto as outras estruturas relacionadas à abertura do Oceano Atlântico Sul afetem significativamente o substrato rochoso da cidade do Salvador e os mecanismos de ruptura associados aos movimentos gravitacionais.

O objetivo deste estudo foi compreender a influência dos principais sistemas de falhas presentes no substrato (solos e rochas) da cidade do Salvador na ocorrência de movimentos de massa. Para isso, buscou-se identificar as características geométricas dos taludes relacionados aos sistemas de falhas longitudinais (N030 e N040) presentes na área de estudo e analisar os possíveis mecanismos de ruptura dos taludes associados às estruturas rúpteis presentes na região. Esses sistemas foram escolhidos por serem paralelos ao eixo longitudinal da cidade e serem os lineamentos de maior comprimento local. No entanto, pretende-se expandir futuramente os estudos sobre o tema para os outros sistemas de orientação presentes em Salvador.

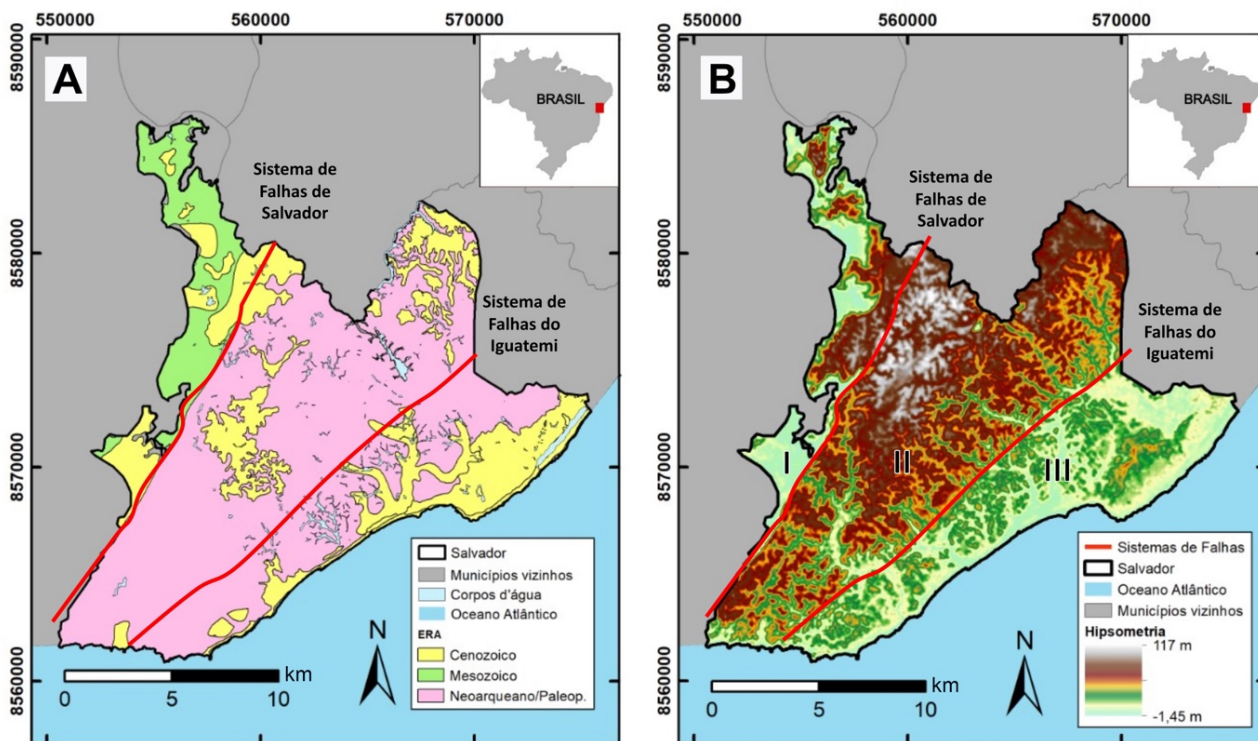
Assim, este trabalho pode servir como ferramenta para subsidiar a tomada de decisões da gestão municipal, desde a identificação de áreas prioritárias para a execução de ações preventivas até a fundamentação de projetos de infraestrutura urbana e habitação na cidade do Salvador.

## CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO

A cidade do Salvador está localizada na porção centro-leste da Bahia, limitada ao norte e ao nordeste pelos municípios de Simões Filho e Lauro de Freitas, ao oeste pela Baía de Todos os Santos e ao leste e ao sul pelo Oceano Atlântico. A cidade está situada em um substrato composto por três domínios geológicos (Figura 1A): um domínio de rochas neoarqueanas e paleoproterozoicas de fácies granulito, representando o Cinturão Salvador-Esplanada-Boquim (Barbosa e Dominguez, 1996; Oliveira, 2014); um domínio de rochas sedimentares mesozoicas da Bacia do Recôncavo, que faz parte do sistema de rifte intracontinental Recôncavo-Tucano-Jatobá (evento relacionado à formação dos SFSs e SFIs), formado durante a abertura do oceano Atlântico Sul no Eocretáceo (Magnavita, 1992; Corrêa-Gomes e Destro, 2012); e um domínio composto por depósitos sedimentares cenozoicos da Formação Barreiras e depósitos costeiros e aluviais do Quaternário (Arai, 2005).

A topografia da cidade do Salvador também é subdividida em três principais domínios (Figura 1B). A região da Cidade Baixa (I), delimitada ao leste pela escarpa do SFS, de direção N030, e ao oeste pela Baía de Todos os Santos, possui altitudes inferiores a 10 metros e é onde afloram as rochas sedimentares da Bacia do Recôncavo. Outra região é conhecida como Cidade Alta (II) ou Alto de Salvador (Barbosa et al., 2005), localizada a leste da escarpa do SFS, sendo caracterizada como estrutura do tipo *horst* com altitudes superiores a 60 m. É composta principalmente por rochas metamórficas paraderivadas e ortoderivadas de fácies anfibolito e granulito, além de solos residuais. O Alto de Salvador é subdividido pela zona rúptil de direção N040, chamada SFI. A porção localizada a leste dessa zona rúptil é denominada região costeira atlântica (III). A topografia dessa região tem altitudes inferiores a 30 m e é marcada por maior exposição de coberturas sedimentares cenozoicas.

A região do Salvador apresenta litotipos amplamente deformados de forma polifásica, tanto no estágio dúctil quanto no estágio rúptil. O limite atlântico brasileiro foi fortemente influenciado pelas estruturas dúcteis e rúpteis anteriormente registradas nas rochas do embasamento. Essas estruturas foram reativadas e acompanhadas por estruturas rúpteis neofornadas, delineando o arcabouço tectônico das bacias rifte da margem atlântica brasileira (Magnavita, 1992; Corrêa-Gomes e Destro, 2012).



**Figura 1.** (A) Mapa geológico simplificado da cidade do Salvador - Zona UTM 24L (adaptado de SGB-CPRM, 2015). (B) Mapa hipsométrico (variação de 117 m a -1,45 m em relação ao nível do mar) com representação gráfica do traçado principal dos Sistemas de Falhas do Salvador e do Sistema de Falhas de Iguatemi, com domínios geomorfológicos da Cidade Baixa, Cidade Alta e Região Costeira Atlântica assinalados com I, II e III, respectivamente.

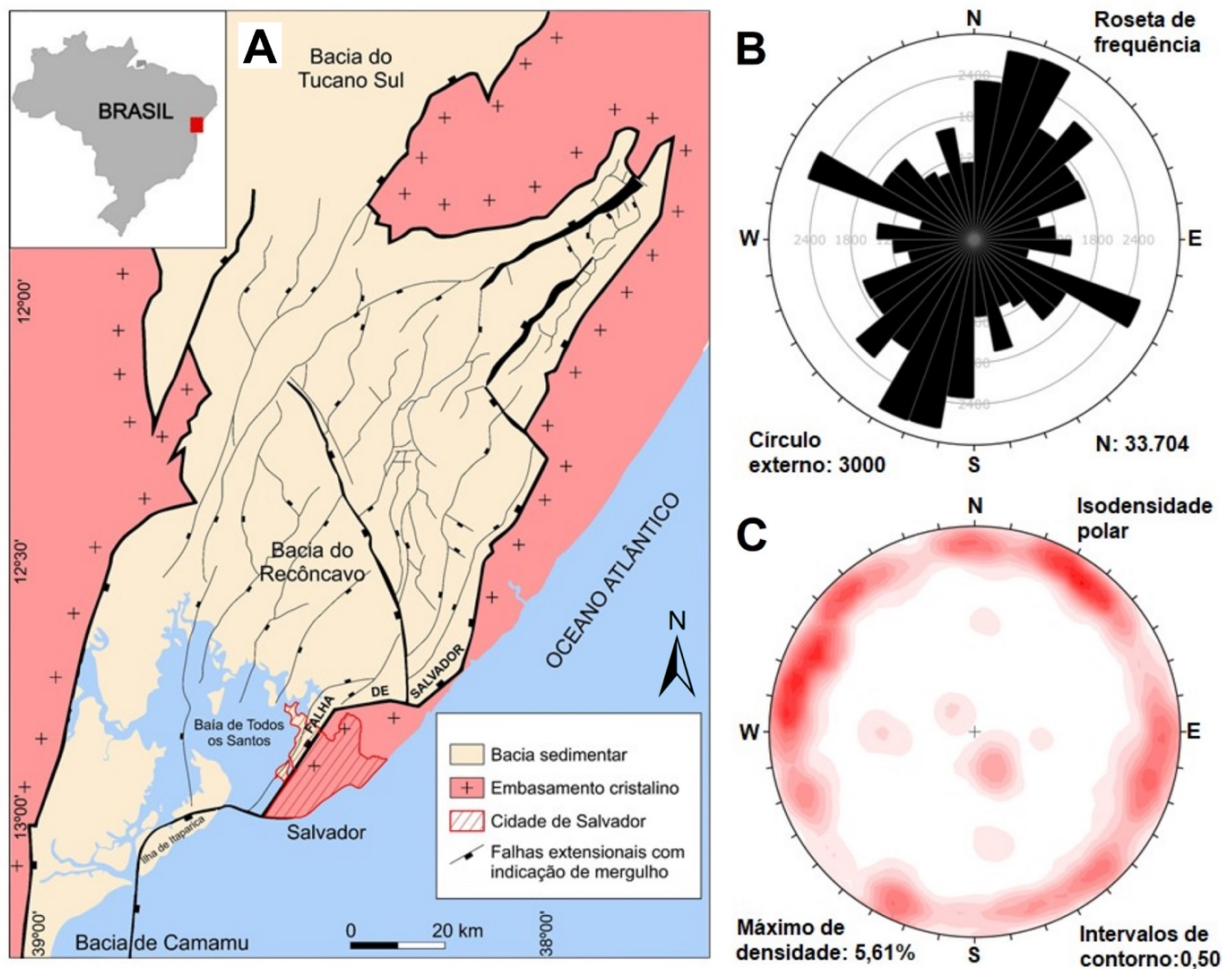
A Bacia do Recôncavo, que é a porção mais meridional do rifte que deu origem ao Sistema de Bacias Recôncavo-Tucano-Jatobá, formou-se durante a ruptura do paleocontinente Gondwana Ocidental e a abertura do Oceano Atlântico Sul no Eocretáceo da Era Mesozoica. A geometria estrutural da Bacia do Recôncavo é definida como um meio-*graben*, delimitado por um extenso conjunto de falhas normais longitudinais (N030-N040), falhas sintéticas e antitéticas, e por falhas transversais (N110-N120). As falhas transversais podem estar relacionadas a falhas de alívio (Destro et al., 2003), com cinemática predominantemente normal, além de falhas de transferência, com variação na cinemática entre normal-transcorrente e transcorrente-normal (Magnavita et al., 2005; Corrêa-Gomes e Destro, 2012).

A partir de um levantamento sistemático realizado pelos projetos Rifte Bahia I e II no Sistema de Bacias tipo Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá (Corrêa-Gomes e Destro, 2012; Da Silva, 2013), foram obtidas 33.704 atitudes de falhas e fraturas em 112 afloramentos da Bacia do Recôncavo e de seu embasamento proximal (Figura 2). As principais estruturas rúpteis foram caracterizadas com direções (*strike*) N000, N010, N030, N040, N090, N120 e N160 e mergulho de aproximadamente 70° em sentidos opostos (de acordo com o modelo de rifteamento em *horst* e *graben*).

## PARÂMETROS GEOMECÂNICOS EM SALVADOR

As rochas metamórficas de fácies granulito do Cinturão Salvador-Esplanada-Boquim, devido à ação de agentes intempéricos, deram origem a um manto de latossolo vermelho-escuro. Esse solo residual, proveniente do embasamento cristalino, pode ocorrer em até 80% do território da cidade do Salvador, sendo importante considerar também os parâmetros de sua resistência para a compreensão dos mecanismos de movimentos de massa da região. Análises de resistência de 369 amostras desses solos residuais, realizadas por Jesus et al. (2005), resultaram em valores de ângulo de atrito médio de 29,32°, com desvio padrão de 3,32°. Já Jesus (2008) encontrou valores de ângulo de atrito médio de 34° (com mínimo de 30° e máximo de 35°) em retroanálises de taludes localizados nas proximidades do Sistema de Falhas de Salvador.

Embora os estudos tenham sido realizados em solos residuais, a literatura propõe que solos que apresentam estruturas reliquias e minerais primários deverão ser avaliados em termos dos princípios da mecânica dos solos e das rochas em função do seu grau de heterogeneidade e anisotropia das propriedades. Já em solos com horizontes menos evoluídos, onde a rocha não se mostra afetada pelo intemperismo, caso desse presente estudo sobre taludes rochosos, deve ser tratado sob o



Fonte: adaptada de Corrêa-Gomes e Destro (2012) e Da Silva (2013).

**Figura 2.** Localização da área de estudo no Brasil. (A) Mapa do arcabouço estrutural simplificado da Bacia do Recôncavo (adaptado de Aragão e Peraro, 1994). (B) Roseta de frequência das estruturas rúpteis da Bacia obtidas em mapeamento de 112 afloramentos ao longo da bacia e suas margens. (C) Representação de isodensidade polar das estruturas rúpteis descritas na região da Bacia do Recôncavo.

ponto de vista da mecânica das rochas (Mello, 1972). As heterogeneidades dos solos residuais presentes na cidade do Salvador podem dificultar a obtenção de parâmetros realísticos que possam ser utilizados na prática (Figura 3). A existência de superfícies de ruptura relacionadas com estruturas rúpteis presentes no substrato rochoso demanda a aplicação de parâmetros de resistência mais conservadores. Sendo assim, a fim de produzir uma análise de estabilidade mais conservadora, priorizando a segurança, optou-se por realizar uma análise cinemática das estruturas identificadas utilizando o parâmetro de ângulo de atrito obtido nos estudos sobre os solos residuais.

## MATÉRIAS E MÉTODO

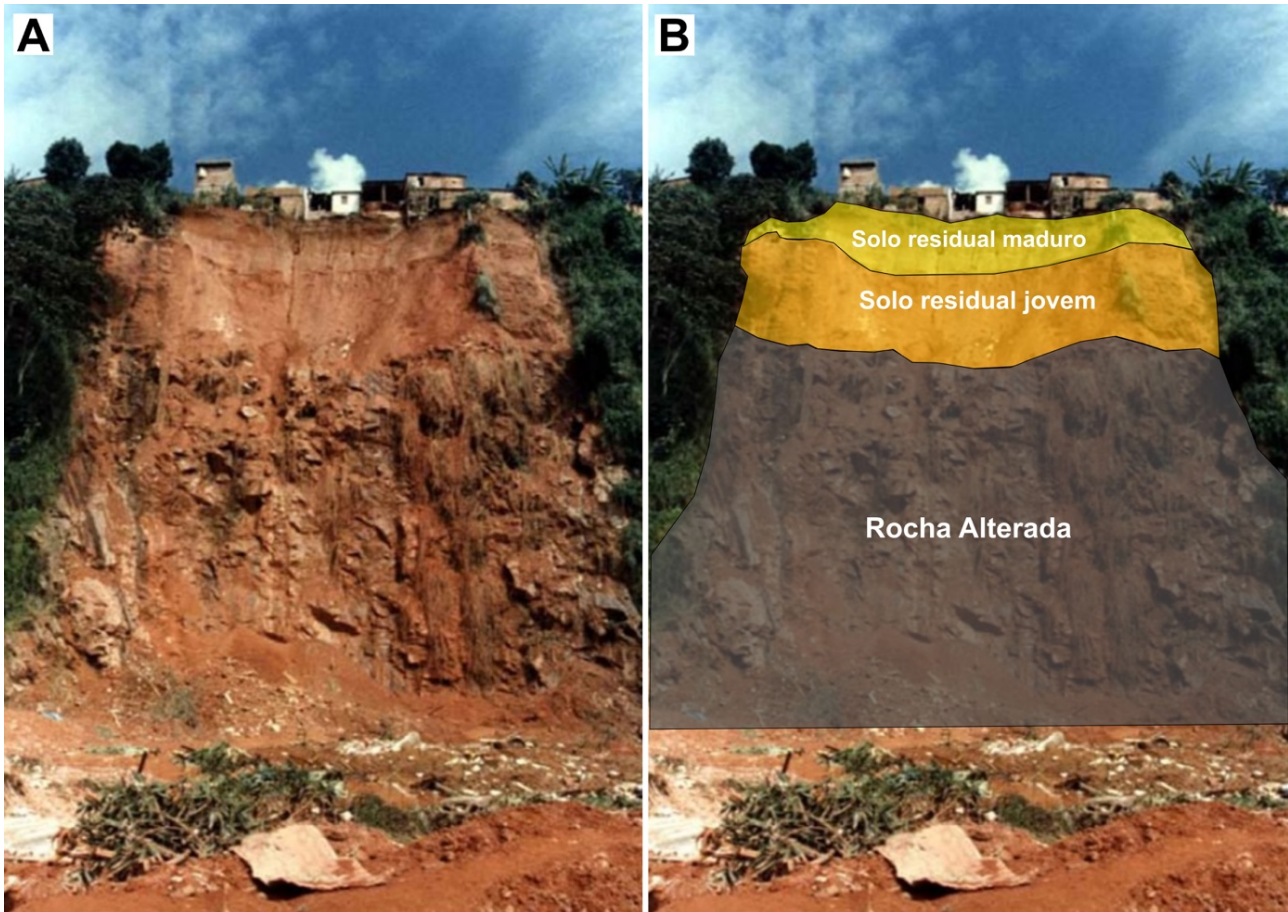
O método adotado por este estudo é composto por duas etapas, sendo a primeira delas produzida a partir de uma

modelagem cinemática entre um conjunto de taludes e estruturas rúpteis presentes na região, para identificar as configurações geométricas de taludes passíveis de ruptura e consequentes movimentos de massa. E a segunda etapa é representada por um estudo de caso, o qual aplica os resultados dessa modelagem em taludes identificados em Salvador.

## Modelagem cinemática

A modelagem cinemática seguiu o método de análise cinemática proposto por Hoek e Bray (1981) realizada em redes estereográficas de hemisfério inferior do tipo igual-área ou rede Schmidt-Lambert. Nas redes estereográficas, são inseridos os parâmetros de relações geométricas entre os taludes e as estruturas geológicas presentes, o ângulo de atrito do material rochoso, o tipo de mecanismo de ruptura e seu campo de estabilidade correspondente. Os riscos





Fonte: adaptada de Silva (2005).

**Figura 3.** (A) Exemplo de talude localizado no bairro São Gonçalo do Retiro, em Salvador. (B) Interpretação de seção vertical evidenciando a expressiva heterogeneidade no perfil de alteração, a qual pode comprometer análises de estabilidade realizadas sob o ponto de vista da mecânica de solos.

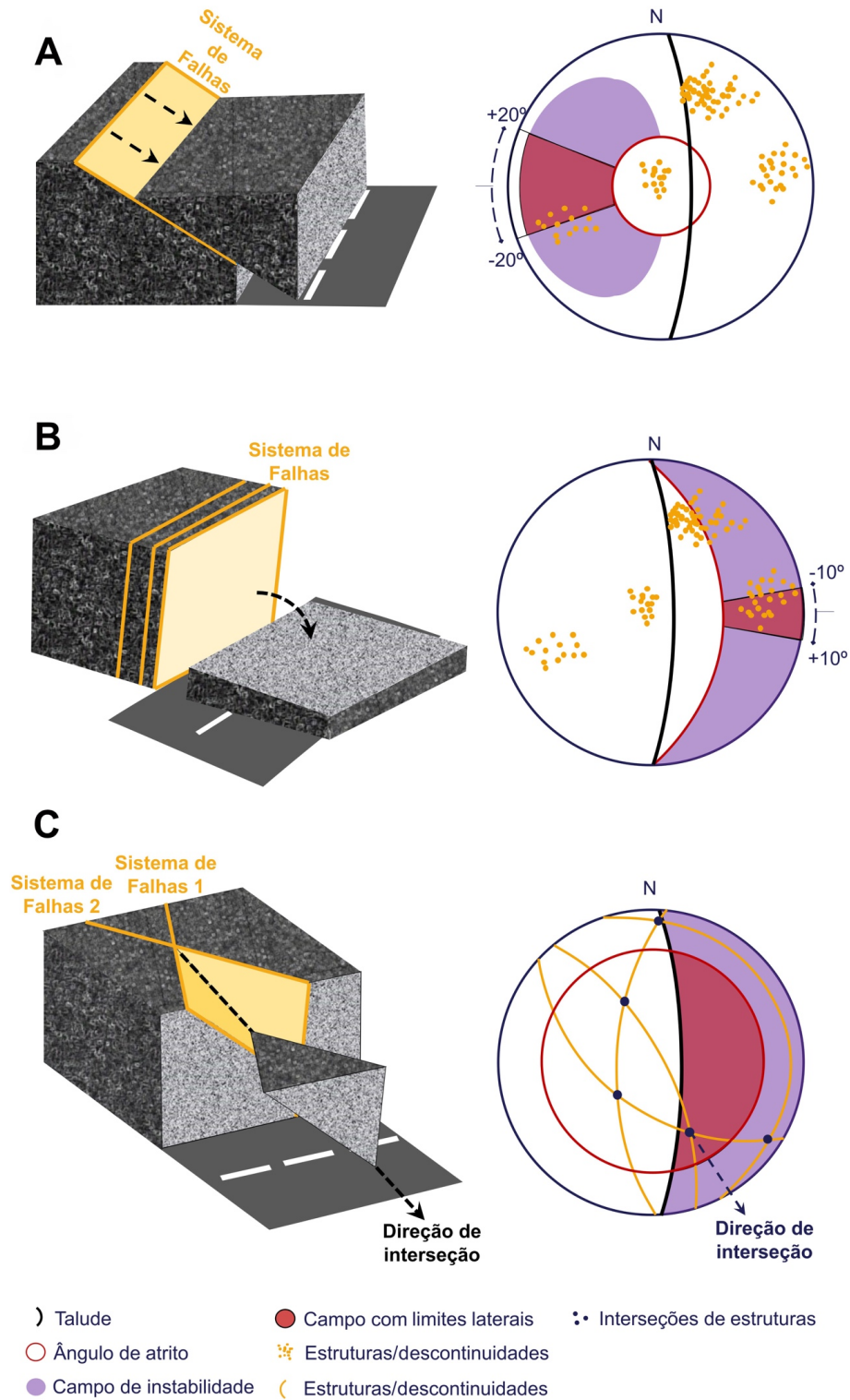
de movimentos de massa foram classificados segundo os mecanismos de ruptura de escorregamento planar, tombamento e escorregamento em cunha (Figura 4). Nas análises dos mecanismos de escorregamento planar e tombamento, considerou-se os ângulos de  $20^\circ$  e  $10^\circ$ , respectivamente, como limites laterais entre a direção das estruturas e dos taludes para o desprendimento de massas rochosas, valores sugeridos por Hoek e Bray (1981) e Wyllie e Mah (2004). Embora ângulos de  $30^\circ$  possam ser sugeridos por outros autores para o tombamento (p. ex., Goodman, 1989).

Os taludes submetidos a esta análise de estabilidade apresentam como parâmetros (Tabela 1) atitudes N030 e N040 com mergulhos variando de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  e estão relacionados com as atitudes dos principais sistemas longitudinais presentes em Salvador: SFS e SFI, respectivamente. As estruturas ou discontinuidades empregadas na modelagem cinemática correspondem às falhas de atitude N000, N010, N030, N040, N090, N120 e N160 com mergulho de  $70^\circ$  para sentidos opostos. Tais estruturas compõem as atitudes gerais dos sistemas de falhas da Bacia do Recôncavo

presentes em Salvador, de acordo com o levantamento feito pelos projetos Rife Bahia I e II (Corrêa-Gomes e Destro, 2012; Da Silva, 2013). Já os ângulos de atrito incorporados na modelagem cinemática, com valores de  $30^\circ$ ,  $32^\circ$ ,  $34^\circ$  e  $36^\circ$ , correspondem à variação de ângulo de atrito identificada em Salvador a partir dos estudos de Jesus et al. (2005) e Jesus (2008).

Deve ser destacado que os ângulos internos de atrito podem mudar devido a vários aspectos (Wyllie e Mah, 2004). Podem ter ângulos diferentes, por exemplo:

- Maciços rochosos: i) com rochas intactas incompetentes, ou ii) com rochas competentes fraturadas;
- Descontinuidades: i) do tipo fraturas rugosas, ou ii) do tipo fraturas limpas e polidas, ou iii) do tipo fraturas preenchidas (e ainda com a possibilidade de diferentes tipos de preenchimentos, tais como sílica ou carbonatos);
- Solos residuais, com estruturas reliquias, com diferentes tipos de argilominerais sendo formados nas fraturas das rochas.



Fonte: adaptado de Wyllie e Mah (2004).

**Figura 4.** Tipos de mecanismos de ruptura de taludes rochosos e suas representações em rede estereográfica. (A) Mecanismo de ruptura por escorregamento planar e campo de instabilidade formado na face côncava do grande círculo do talude, com limite lateral de 20° em relação à direção de mergulho do talude. (B) Mecanismo de ruptura por tombamento e campo de instabilidade formado na face convexa do grande círculo do talude com limite lateral de 10° em relação à face do talude. (C) Mecanismo de ruptura por escorregamento em cunha e campo de instabilidade delimitado pelo ângulo de atrito que marca o caimento mínimo e a face do talude que marca o caimento máximo para a linha de interseção representar risco.

- No que diz respeito ao parâmetro de ângulo de atrito, algumas considerações ainda podem ser feitas:
- Nos estudos de Mecânica das Rochas, a resistência ao cisalhamento das descontinuidades (“*rock joints*”) é bem representada pelo critério de Barton e Choubey (1977), onde se considera um ângulo de atrito residual (ou básico), que representa o atrito de superfícies lisas da rocha, somado a um termo de dilatância, que representa a contribuição da rugosidade das descontinuidades. Nas análises cinemáticas, o ângulo de atrito básico pode ser o mais adequado;
- O ângulo de atrito básico pode ser determinado em ensaios de deslizamento (“*tilt test*”), onde a descontinuidade que separa dois blocos de rocha é inclinada até que o bloco superior deslize;
- Estudos de ensaios de deslizamento (“*tilt test*”) foram realizados por Silva (2013), em uma pedreira na Região Metropolitana do Salvador. Silva (2013) encontrou valores de ângulo de atrito com distribuição com valores modais em 36 e 40°. Os ensaios de Silva (2013) foram realizados em descontinuidades rugosas, utilizando o clinômetro da bússola para medir o ângulo de deslizamento. Deve ser considerado que os valores não são de ângulo de atrito básico, mas ponderam a rugosidade das descontinuidades também;
- Ensaios de deslizamento (“*tilt test*”) nas laterais de testemunhos de sondagem podem apresentar valores mais próximos do que seria um ângulo de atrito residual (ou básico). Os valores de ângulo de atrito adotados nas análises deste artigo são favoráveis para a segurança e consistentes com os encontrados por Silva (2013);
- A *International Society for Rock Mechanics* (ISRM) apresenta sugestão de método para determinação de ângulos de atrito por ensaios de deslizamento (“*tilt test*”), ver Alejano et al. (2018). Os procedimentos gerais da sugestão de método podem ser considerados, principalmente

no que se refere ao número de leituras. Mas a ideia de usar um valor que garanta uma probabilidade alta do valor do ângulo de atrito ser maior que o valor característico não é o caso no contexto da análise apresentada.

## Estudo de caso

A segunda etapa do método empregado deu-se por meio da aplicação dos resultados da modelagem cinemática em 67 taludes, sendo 33 taludes próximos ao SFS e 34 taludes próximos ao SFI. Para a identificação dos taludes, foi realizada a delimitação dos principais lineamentos morfoestruturais da cidade do Salvador a partir da utilização do modelo digital de elevação (MDE) do projeto TOPODATA. A extração dos lineamentos morfoestruturais foi realizada na escala 1:50.000, utilizando como parâmetros de relevo sombreado a inclinação de 45° e o fator de correção de altitude (fator Z) de 0,000912, recomendado para a faixa de latitude do Salvador. As direções de iluminação aplicadas foram 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 e 315. Com o plugin Azimuthfinder (Queiroz et al., 2014) em plataforma SIG, foram tabeladas as informações de frequência e comprimento dos lineamentos morfoestruturais, exibidas em diagramas de rosetas. Em seguida, aplicou-se filtragem dos traçados de lineamentos morfoestruturais com distância de até um quilômetro do traço principal dos sistemas de falhas que delimitam as regiões do Salvador, para a análise do SFS e do SFI. A filtragem de lineamentos permitiu a identificação das características geométricas, de direção e mergulho, dos 67 taludes ao longo dos SFS e do SFI. Essas características foram obtidas por meio de seções transversais aos taludes em curvas de nível com intervalo de um metro, fornecidas pela Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia (CONDER). Os taludes críticos foram analisados quanto às estruturas rúpteis que podem produzir risco de movimentos de massa e em quais intervalos de mergulho e de ângulo de atrito do material rochoso esse risco está presente.

**Tabela 1.** Configuração de parâmetros de entrada inseridos na modelagem cinemática.

Parâmetros	Configuração	Referências
<b>Mecanismos de ruptura</b>	Escorregamento planar (limite lateral de 20°), Tombamento (limite lateral de 10°) e Escorregamento em cunha	Hoek e Bray (1981); Wyllie e Mah (2004)
<b>Direção de taludes</b>	N030 e N040	Barbosa et al. (2005)
<b>Ângulo de mergulho dos taludes</b>	0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80° e 90°	-
<b>Estruturas ou descontinuidades</b>	N000, N010, N030, N040, N090, N120, N160, N180, N190, N210, N220, N270, N300 e N340	Corrêa-Gomes e Destro (2012); Da Silva, 2013
<b>Ângulo de mergulho das estruturas</b>	70°	Corrêa-Gomes e Destro (2012); Da Silva, 2013
<b>Ângulos de atrito analisados</b>	30°, 32°, 34° e 36°	Jesus et al. (2005); Jesus (2008)
<b>Rede estereográfica</b>	Igual-área ou Schmidt-Lambert	Hoek e Bray (1981); Wyllie e Mah (2004)

## RESULTADOS

### Modelagem cinemática: escorregamento planar

A análise de ruptura por escorregamento planar (Figura 5) mostra o risco de movimento de massa em taludes com ângulo de inclinação igual ou maior que 70°. Nota-se um aumento no número de estruturas que oferecem risco de ruptura quando se aumenta de 70° para 80° de inclinação da face do talude, sendo este aumento maior nos taludes de direção N030 em comparação com os taludes de direção N040. No entanto, não se observa influência do ângulo de atrito do material rochoso dentro do intervalo modelado na possibilidade de ocorrência de ruptura.

### Modelagem cinemática: tombamento

Na análise de ruptura por tombamento (Figura 6), observou-se a possibilidade de movimento de massa em taludes com inclinação a partir de 50°, em material rochoso com ângulo de atrito de 30°. Aumentar o ângulo de atrito permite inclinações maiores que 50° sem a presença de estruturas instáveis. Para taludes

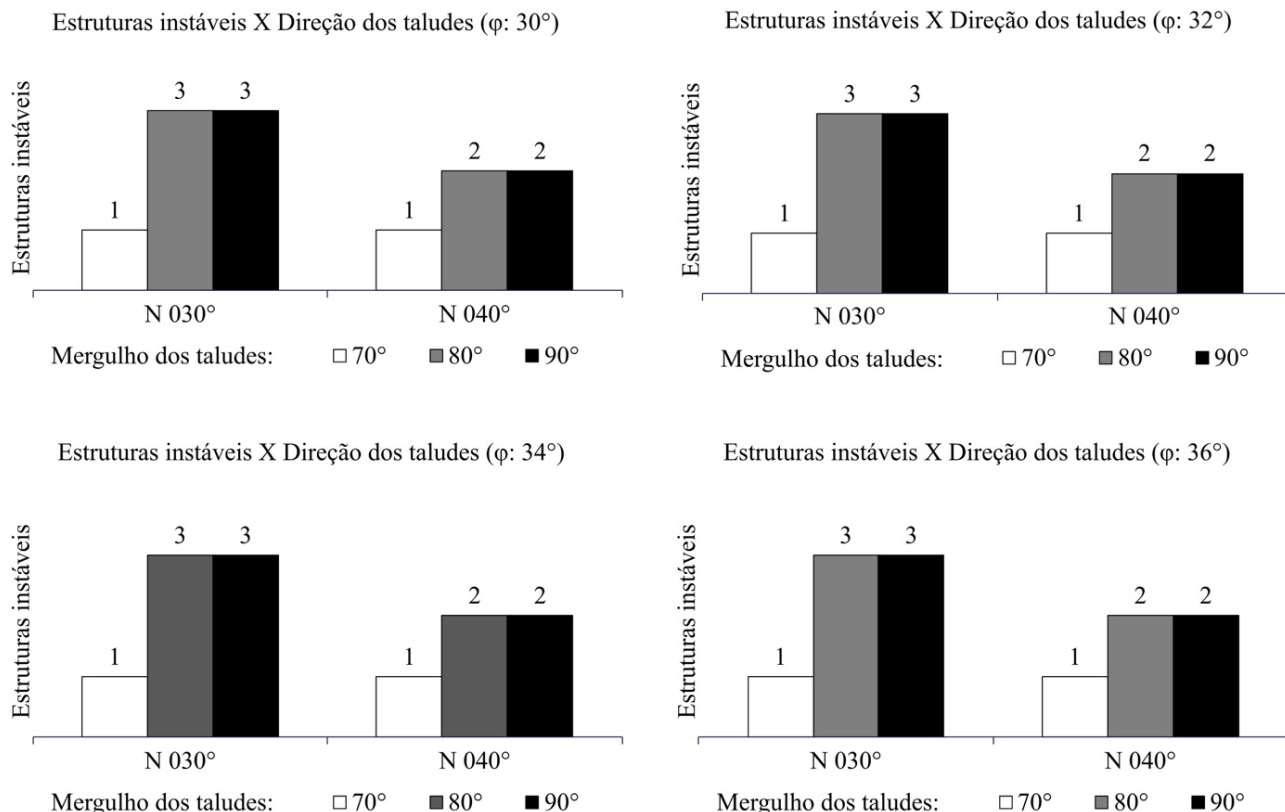
com inclinação igual ou maior que 60°, o número de estruturas instáveis permanece o mesmo e o aumento do ângulo de atrito não reduz o risco. Não houve diferenças na quantidade de estruturas instáveis entre os taludes de direção N030 e N040.

### Modelagem cinemática: escorregamento em cunha

Na análise de ruptura por escorregamento em cunha (Figura 7), observou-se que o risco de movimento de massa pode ocorrer em taludes com inclinação igual ou maior que 40°. Aumentar o ângulo de inclinação do talude resulta em mais estruturas instáveis em todas as situações modeladas. Ao comparar os taludes de direção N030 e N040, verificou-se que a direção dos taludes influencia o número de estruturas instáveis, mas essa influência varia de acordo com o ângulo de inclinação dos taludes comparados.

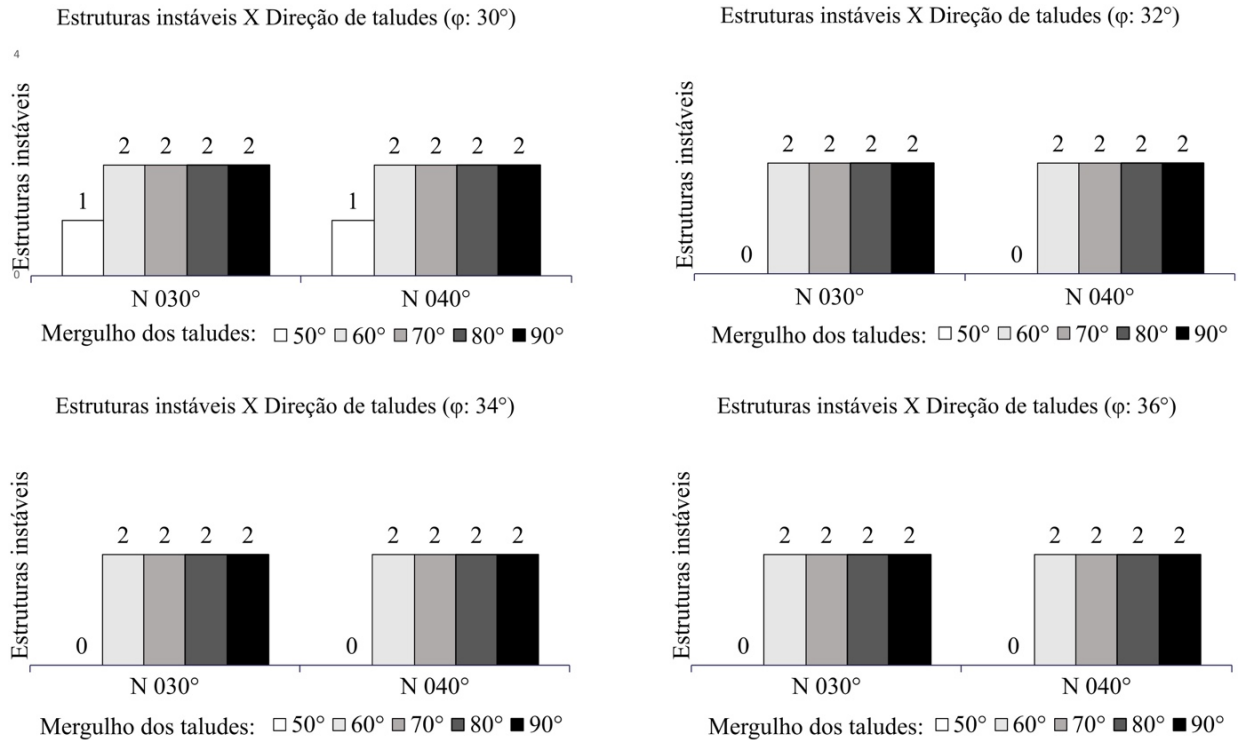
### Estudo de caso

Por meio da fotointerpretação dos lineamentos morfoestruturais utilizando dados geomorfométricos do projeto TOPODATA, nas direções de iluminação N000,

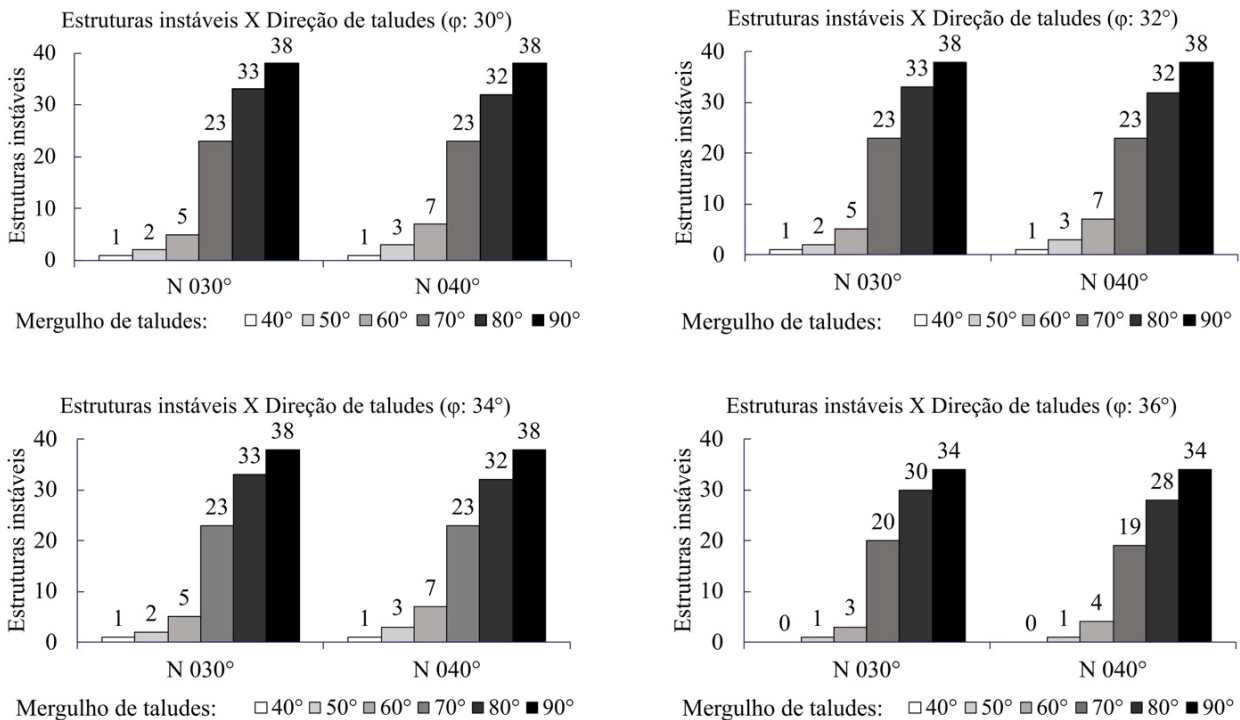


**Figura 5.** Histogramas de estruturas instáveis presentes nos diferentes taludes analisados de acordo com o ângulo de atrito modelado na análise cinemática. Os histogramas evidenciam a ausência de interferência do ângulo de atrito na elevação do risco de escorregamento planar nas situações analisadas.





**Figura 6.** Histogramas de estruturas instáveis presentes nos diferentes taludes analisados de acordo com o ângulo de atrito modelado na análise cinemática. A partir dos histogramas é possível identificar a interferência do ângulo de atrito no risco de tombamento de blocos em taludes de 50° de mergulho.



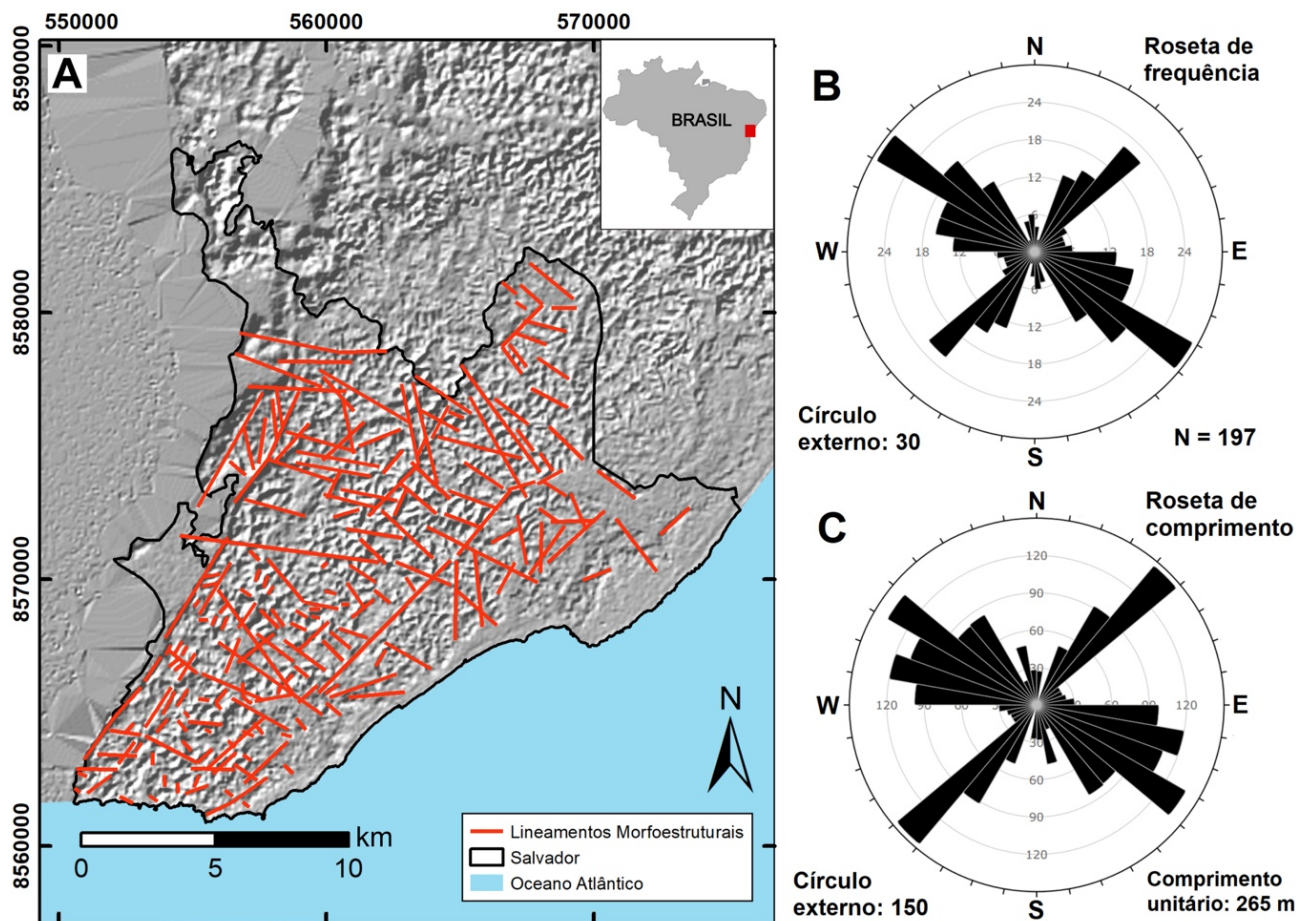
**Figura 7.** Histogramas de estruturas instáveis presentes nos diferentes taludes analisados de acordo com o ângulo de atrito modelado na análise cinemática. A partir dos histogramas é possível identificar a relevância do ângulo de mergulho dos taludes no quantitativo de interseções de estruturas em risco de escorregamento em cunha. O ângulo de atrito mostra-se influente no risco quando se compara taludes de 40° de mergulho.

N045, N090, N135, N180, N225, N270 e N315, foram identificados 197 lineamentos (Figura 8A). Apenas os lineamentos mais confiáveis em diferentes iluminações foram traçados. A análise da roseta de frequência dos lineamentos morfoestruturais (Figura 8B) mostra predominância de lineamentos transversais (direção NW-SE), enquanto a roseta de comprimento (Figura 8C) evidencia a maior expressão regional das feições morfoestruturais longitudinais (direção NE-SW). Esses lineamentos longitudinais são mais representativos no mapa de hipsometria da cidade do Salvador (Figuras 1B e 9) e está relacionada com expressão geomorfológica dos SFS e do SFI. Em resumo, os lineamentos NW-SE são mais numerosos, mas os lineamentos NE-SW são mais longos.

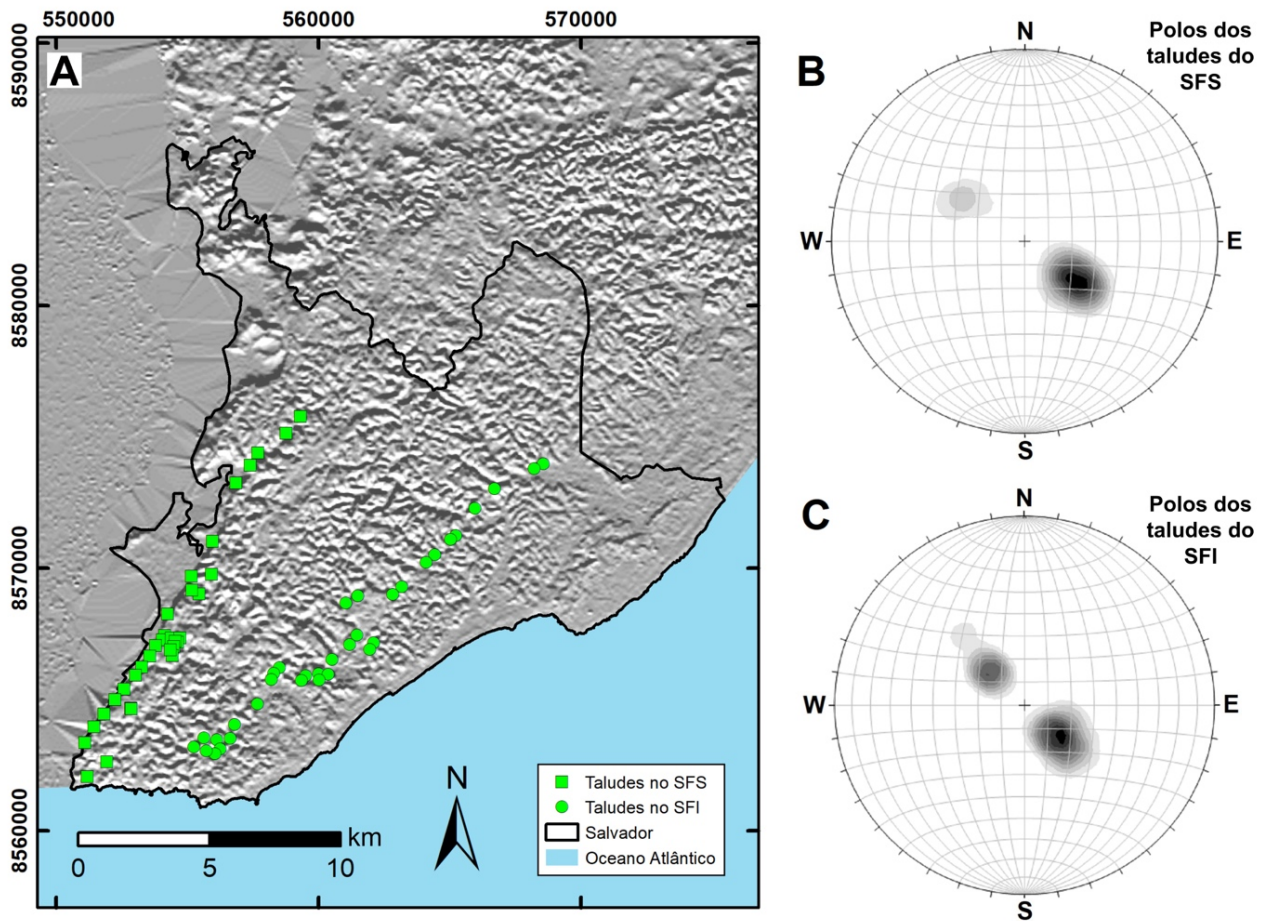
A filtragem dos lineamentos próximos aos SFSs e SFIs permitiu a caracterização geométrica de 33 taludes representativos do SFS (Figura 9A) e 34 taludes

representantes do SFI (Figura 9B). Os taludes do SFS apresentam mergulhos predominantemente orientados para noroeste, com máxima densidade polar em N128/28 e apenas seis taludes com mergulhos orientados para sudeste, com polo médio N326/30. Enquanto os taludes do SFI apresentam 22 taludes orientados para noroeste e máxima densidade polar na atitude N132/22, e 12 taludes orientados para sudeste com polo médio em N344/25 (Tabela 2).

Identificaram-se seis taludes críticos com risco de instabilidade (Tabela 3), sendo três na região do SFS e três próximos ao SFI. Todos os seis taludes críticos apresentaram risco de ruptura por escorregamento em cunha (Figura 10), e apenas um deles apresentou risco de ruptura por tombamento (Figura 10G). O risco de ruptura por escorregamento planar não foi observado em nenhum dos 67 taludes analisados dentro das configurações propostas na modelagem cinemática.



**Figura 8.** (A) Mapa de lineamentos morfoestruturais do Salvador interpretados a partir dos dados geomorfométricos do projeto TOPODATA iluminado nas direções N000, N045, N090, N135, N180, N225, N270 e N315. (B) Roseta de frequência dos 197 lineamentos fotointerpretados na área. (C) Roseta de comprimento dos lineamentos, ressaltando a maior expressão regional das feições morfoestruturais longitudinais NE-SW.



**Figura 9.** (A) Mapa de relevo sombreado da cidade do Salvador com distribuição espacial dos taludes do Sistema de Falhas de Salvador e do Sistema de Falhas do Iguatemi. (B) Representação da densidade polar dos taludes na região do Sistema de Falhas de Salvador. (C) Representação da densidade polar dos taludes na região do Sistema de Falhas do Iguatemi.

**Tabela 2.** Configuração geométrica dos taludes analisados no Sistema de Falhas de Salvador e no Sistema de Falhas do Iguatemi.

Orientação do talude	Quantidade de taludes	Polo médio	Direção média	Mergulho médio	Limite de confiança 95%
<b>Taludes do Sistema de Falhas de Salvador</b>					
Mergulho para NW	27	N128/28	38	28	2,57
Mergulho para SE	6	N326/30	34	30	5,96
<b>Taludes do Sistema de Falhas de Iguatemi</b>					
Mergulho para NW	22	N132/22	42	22	3,04
Mergulho para SE	12	N344/25	44	25	4,47

## DISCUSSÃO

### Modelagem cinemática

A modelagem cinemática permitiu analisar a suscetibilidade dos taludes ao risco, levando-se em consideração o mecanismo de ruptura, o ângulo de atrito do material rochoso e o mergulho da face do talude.

Para o mecanismo de escorregamento planar, todos os taludes de direções analisadas são estáveis quando o ângulo de mergulho é inferior a  $70^\circ$  (Figura 5). Quando o mergulho do talude é igual a  $70^\circ$ , o risco de instabilidade está associado apenas às estruturas com a mesma direção de mergulho que o talude estudado. Ou seja, taludes que apresentem estruturas com atitudes idênticas à sua face de inclinação. Em taludes com mergulho superior a  $70^\circ$ , outras estruturas também

**Tabela 3.** Taludes críticos identificados no estudo de caso (Zona UTM 24L).

Taludes críticos	UTM X	UTM Y	Atitude do talude	Risco associado	Referência de localização
<b>Sistema de Falhas de Salvador</b>					
<b>Ponto 1</b>	553259	8566226	N030/40NW	Escorregamento em cunha	Fundos da Igreja do Santíssimo Sacramento do Passo, no Centro Histórico do Salvador.
<b>Ponto 2</b>	552587	8565404	N040/40NW	Escorregamento em cunha	Av. Lafayette Coutinho, próximo à Capitania dos Portos da Bahia, no bairro Comércio.
<b>Ponto 3</b>	551814	8564438	N040/40NW	Escorregamento em cunha	Av. Lafayette Coutinho, ao sul do Museu de Arte Moderna da Bahia, no bairro Centro
<b>Sistema de Falhas do Iguatemi</b>					
<b>Ponto 4</b>	562095	8567156	N030/40NW	Escorregamento em cunha	Rua da Bolandeira, região do Parque Metropolitano do Pituauçu, no bairro Imbuí.
<b>Ponto 5</b>	559343	8565732	N040/40SE	Escorregamento em cunha	Rua 23 de Janeiro, próximo à estação de metrô Pernambuco, no bairro Pernambués.
<b>Ponto 6</b>	557653	8564827	N040/50SE	Escorregamento em cunha; Tombamento	Av. Antônio Carlos Magalhães, próximo ao Shopping da Bahia, no bairro Brotas.

influenciam no número de estruturas instáveis (Figura 5). No caso dos taludes com direção N030, as falhas N010/70, N030/70 e N040/70 são as estruturas que apresentam risco de ruptura. Já nos taludes de direção N040, o risco é representado pelas falhas N030/70 e N040/70.

O estudo concluiu que a variação do ângulo de atrito ( $\varphi$ ) no intervalo de 30° e 36° não teve efeito na estabilização dos taludes analisados. Ou seja, o número de estruturas em situação crítica permaneceu inalterado dentro desse intervalo (Figura 5). Portanto, ângulos de atrito acima de 36° podem reduzir a quantidade de famílias de estruturas em situação de instabilidade. No entanto, ângulos de atrito inferiores a 30°, como no caso de taludes com material mais afetado por intemperismo, não são capazes de aumentar o número de famílias de estruturas em situação de instabilidade.

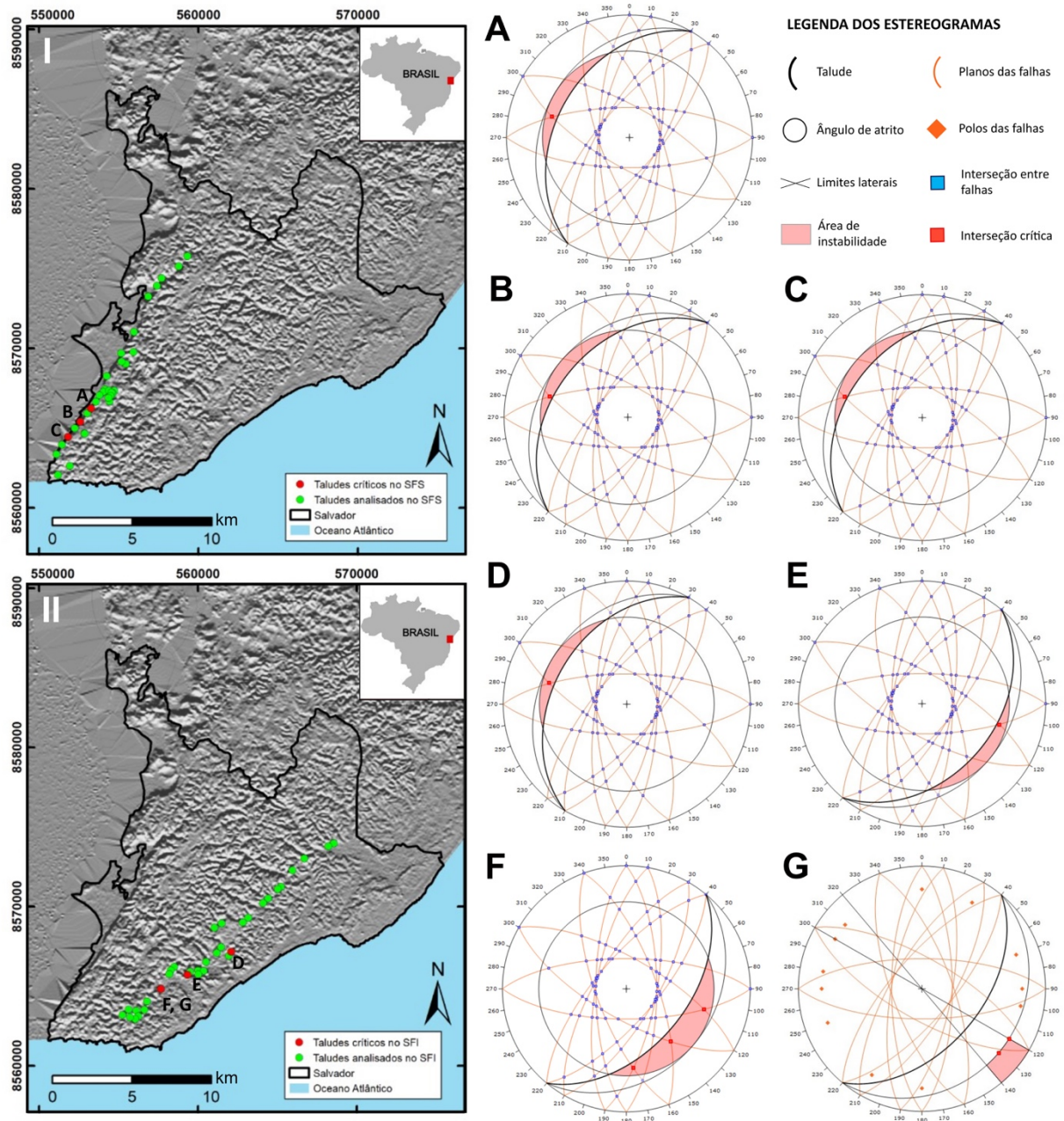
A modelagem cinemática para o mecanismo de tombamento concluiu que taludes com mergulho inferior a 50° são sempre estáveis para esse mecanismo. Já os taludes com mergulho superior a 50° apresentam o mesmo número de famílias de estruturas em situação de instabilidade, independentemente das orientações dos taludes e do ângulo de atrito do material rochoso. No entanto, se o material rochoso tiver ângulo de atrito superior a 30°, os taludes podem apresentar mergulhos de até 60° sem representar risco relacionado às estruturas analisadas (Figura 6).

Quanto ao mecanismo de escorregamento em cunha, identificou-se que taludes com ângulo de mergulho inferior a 40° são estáveis para esse tipo de mecanismo. Ao contrário dos mecanismos anteriores, o aumento no ângulo de mergulho do talude resultou em um aumento no número de interseções críticas entre as estruturas fraturadas em todas as configurações modeladas. Independentemente da direção do talude

analisado, quanto maior for o ângulo de mergulho da sua face, maior será o número de interseções críticas (Figura 7). Um destaque significativo ocorre na variação entre 60° e 70° de mergulho, onde taludes com ângulo de mergulho de 70° podem apresentar um número de interseções críticas de três a sete vezes maior do que o mesmo talude com mergulho de 60°. Além disso, taludes de direção N040 com mergulhos inferiores a 70° apresentam um maior número de interseções críticas quando comparados aos taludes de direção N030. No entanto, essa diferença é reduzida quando os taludes apresentam mergulhos mais íngremes, representando incrementos inferiores a 8% no número de interseções críticas.

Por fim, a modelagem cinemática para o mecanismo de escorregamento em cunha permitiu concluir que a variação do ângulo de atrito abaixo de 36° não causa variação no número de interseções críticas. Para materiais rochosos com ângulos de atrito inferiores a 36°, todos os taludes são estáveis quando o mergulho é inferior a 40° (Figura 7). As interseções N105/36 ou N285/36, formadas pelas falhas N090/70 e N120/70, são as primeiras a se tornarem críticas com o aumento do ângulo de mergulho desses taludes. Já para ângulos de atrito iguais ou superiores a 36°, as interseções N105/36 ou N285/36 não representam risco, e todos os taludes se tornam naturalmente estáveis com mergulhos inferiores a 50°. O aumento do mergulho dos taludes, com ângulo de atrito igual ou superior a 36°, coloca as interseções críticas N140/44 ou N320/44 como as primeiras a representarem risco de ruptura e movimento de massa por escorregamento em cunha. Essas interseções são formadas pela presença das falhas N120/70 SW e N160/70 NE, e pelas falhas N120/70 NE e N160/70 SW, respectivamente.





**Figura 10.** Mapas de localização dos pontos críticos dos taludes presentes no: I) Sistema de Falhas de Salvador; e II) do Sistema de Falhas do Iguatemi. As redes estereográficas A, B e C ilustram as estruturas que podem exercer risco de ruptura de talude na região do Sistema de Falhas de Salvador. Já as redes estereográficas D, E, F e G ilustram as estruturas que podem exercer risco de ruptura de talude na região do Sistema de Falhas do Iguatemi. A rede G representa a análise cinemática para tombamento de blocos, enquanto as redes A, B, C, D, E e F referem-se à análise cinemática de escorregamento em cunha.

### Estudo de caso

O estudo de caso realizado revelou que o principal mecanismo gerador de risco para a cidade do Salvador, tanto nos taludes próximos ao SFS quanto nos taludes próximos ao SFI, é o escorregamento em cunha, seguido pelo mecanismo de tombamento (Figura 10). Esses mecanismos estão

associados às interseções de falhas transversais em taludes controlados pelos sistemas de falhas longitudinais formados durante o Riftte Recôncavo-Tucano-Jatobá.

Nos taludes próximos ao SFS, dos 33 pontos analisados, foram identificados três pontos com risco de escorregamento em cunha, todos com mergulho voltado para o quadrante noroeste. Nessas áreas, a única interseção crítica identificada foi a N285/36,

formada pelas falhas N090/70 N e N120/70 SW (Figura 10). No entanto, o risco de escorregamento em cunha só é observado em materiais rochosos com ângulo de atrito inferiores a 36°, de acordo com a modelagem cinemática realizada (Figura 7).

Já nos taludes próximos ao SFI, dos 34 pontos analisados, três pontos apresentaram risco de escorregamento em cunha. Além disso, um dos pontos também mostrou suscetibilidade ao mecanismo de tombamento (Figura 10). No Ponto 4, o escorregamento em cunha é causado pela interseção N285/36, formada pelas falhas N090/70 N e N120/70 SW. No Ponto 5, as falhas N090/70 S e N120/70 NE formam a interseção crítica N105/36. No Ponto 6, que possui o maior mergulho de talude identificado (aproximadamente 50°), há um aumento no risco de escorregamento em cunha, com três interseções críticas, além da possibilidade de ocorrer tombamento. As interseções críticas para o escorregamento em cunha no Ponto 6 são: N105/36 (falhas N090/70 S e N120/70 NE), N140/43 (falhas N160/70 NE e N120/70 SW) e N175/36 (falhas N010/70 SE e N160/70 SW (Figura 10F). O risco de tombamento no Ponto 6 é causado pela presença da falha N040/70 NE (Figura 10G).

Em relação ao ângulo de atrito do material rochoso, taludes com ângulos de atrito iguais ou inferiores a 30° são suscetíveis ao risco de tombamento no Ponto 6, enquanto o risco de escorregamento em cunha permanece em todas as configurações (Figura 7) analisadas. Portanto, os taludes próximos ao SFI serão estáveis apenas quando a inclinação for inferior a 40° ou quando o ângulo de atrito do material rochoso estiver fora do intervalo analisado.

## CONCLUSÕES

O estudo permitiu a análise do efeito das estruturas rúpteis relacionadas com a formação da Bacia do Recôncavo na análise cinemática dos taludes da cidade do Salvador. Identificou-se relação geométrica entre os taludes presentes em Salvador e as estruturas rúpteis da Bacia do Recôncavo, o que pode resultar em movimentos de massa.

O escorregamento em cunha foi identificado como o mecanismo com maior potencial de movimentação devido à sua ocorrência em taludes com menor declividade em comparação com outros mecanismos de movimento de massa. Em Salvador, taludes com mergulho superior a 50° tendem a ser afetados tanto pelo mecanismo de escorregamento em cunha quanto por tombamento.

Além disso, um aumento de 10° no mergulho dos taludes, como em operações de cortes artificiais, pode resultar em até sete vezes mais interseções que oferecem risco de escorregamento em cunha. Portanto, destaca-se a importância de um mapeamento detalhado das estruturas rúpteis locais, essencialmente antes e durante a execução de escavações de taludes.

A modelagem cinemática realizada permitiu concluir que a variação do ângulo de atrito, dentro do intervalo estudado, não causou aumento ou redução significativos nas estruturas

em situação de instabilidade. No entanto, ressalta-se a necessidade de obter parâmetros geotécnicos para uma análise mais completa. O estudo enfatiza a importância de concentrar esforços na identificação das estruturas geológicas locais, que podem representar riscos tanto em taludes rochosos quanto em taludes de solos residuais na forma de estruturas relicárias.

O estudo de caso apresentado neste trabalho indica localidades onde a presença das estruturas analisadas pode representar um risco de perdas de vidas humanas e de patrimônio material instalado ou planejado. Essas informações podem ser úteis na formulação de políticas públicas de uso e ocupação do solo e na gestão dos riscos de desastres geológicos, especificamente movimentos de massa. No entanto, é necessário realizar uma investigação geológico-geotécnica detalhada nessas localidades, incluindo a identificação de parâmetros e a caracterização das principais estruturas rúpteis da região, juntamente com uma análise tridimensional da topografia, para uma melhor definição do risco de movimentos de massa.

## AGRADECIMENTOS

O presente artigo contou com a colaboração do Grupo de Geotecnia e do Laboratório de Modelagem Física do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia (GEOTEC-IGEO-UFBA e LAMOD-IGEO-UFBA), ambos coordenados por Luiz César Corrêa-Gomes. Os autores gostariam de agradecer aos revisores anônimos da revista *Geologia USP. Série Científica*, cujas contribuições profissionais foram significativas para a melhoria do nosso manuscrito.

## REFERÊNCIAS

- Alejano, L. R., Muralha, J., Ulusay, R., Li, C. C., Pérez-Rey, I., Karakul, H., Chryssanthakis, P., Aydan, Ö. (2018). ISRM Suggested method for determining the basic friction angle of planar rock surfaces by means of tilt tests. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51, 3853-3859. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1627-6>
- Aragão, M. A. N. F., Peraro, A. A. (1994). Elementos estruturais do rifte Tucano/Jatobá. *II Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil*. Anais... Rio Claro: SBG. p. 161-164.
- Arai, M. (2005). A grande elevação eustática do Mioceno: a verdadeira origem do Grupo Barreiras. *X Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*. Anais... Guarapari: ABEQUA.
- Barbosa, J. S. F., Corrêa-Gomes, L. C., Dominguez, J. M. L., Cruz, S. A. S., Souza, J. S. (2005). Petrografia e Litogeoquímica das Rochas da Parte Oeste do alto de Salvador, Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, 35 (4-Supl.), 9-22. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.200535S40922>

- Barbosa, J. S. F., Dominguez, J. M. L. (1996). *Texto Explicativo para o Mapa Geológico ao Milionésimo*. Salvador: SICM/SGM (Edição Especial).
- Barton, N., Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics*, 10, 1-54. <https://doi.org/10.1007/BF01261801>
- Corrêa-Gomes, L. C., Destro, N. (2012). Tectônica das bacias Paleozoicas e Mesozoicas. In: Barbosa, J. S. F. (Coord.). *Geologia da Bahia, pesquisa e atualização*. Salvador: CBPM. (Série Publicações Especiais, 13). v. 2. p. 255-325. Disponível em: <http://www.cbpm.ba.gov.br/book/geologia-da-bahia-pesquisa-e-atualizacao/>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- Da Silva, I. C. (2013). *Evolução Dinâmica do Sistema de Bacias Tipo Rife Recôncavo-Tucano-Jatobá com Base em Dados de Campo*. Tese (Doutorado). Salvador: Instituto de Geociências – UFBA. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/21520>. Acesso em: 4 nov. 2022.
- Destro, N., Szatmari, P., Alkmim, F. F., Magnavita, L. P. (2003). Release faults associated structures, and their control on petroleum trends in the Reconcavo rift, northeast Brazil. *AAPG Bulletin*, 87(7), 1123-1144. <https://doi.org/10.1306/02200300156>
- Glastonbury, J., Fell, R. (2000). *Report on the Analysis of "Rapid" Natural Rock Slope Failures*. Sydney: School of Civil and Environmental Engineering. (Uniciv Report, V.390).
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics*. 2<sup>nd</sup> Ed. Nova York: Willey, 562 p.
- Hoek, E., Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering*. 3<sup>rd</sup> Ed. Londres: Institution of Mining & Metallurgy.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018). *População em áreas de risco no Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE / Coordenação de Geografia.
- Jesus, A. C. (2008). *Retroanálise de escorregamentos em solos residuais não saturados*. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – USP. <https://doi.org/10.11606/D.18.2008.tde-10102008-090913>
- Jesus, A. C., Miranda, S. B., Dias, L. S. O., Brito Junior, J. A., Burgos, P. C., Campos, L. E. P. (2005). Contribuição para o zoneamento das áreas com características geotécnicas semelhantes da cidade do Salvador visando a aplicação em mapeamento de risco. *IV Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas*. Anais... Salvador: ABMS, p. 17-25.
- Magnavita, L. P. (1992). *Geometry and kinematics of the Recôncavo-Tucano-Jatobá Rift, NE Brazil*. Tese (Doutorado). Oxford: Wolfson College – University of Oxford.
- Magnavita, L. P., Silva, R. R., Sanches, C. P. (2005). Guia de campo da Bacia do Recôncavo, NE do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 13(2), 301-334.
- Mello, V. F. B. (1972). Thoughts on Soil Mechanics Applicable to Residual Soils. *Southeast Asian Conference on Soil Engineering*, 3., 5-34. Hong-Kong: SEAGS.
- Oliveira, E. M. (2014). *Petrografia, Litogeoquímica e Geocronologia das Rochas Granulíticas da Parte Norte do Cinturão Salvador-Esplanada-Boquim, Bahia-Sergipe*. Tese (Doutorado). Salvador: Instituto de Geociências – UFBA. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/21519>. Acesso em: 20 abr. 2023.
- Queiroz, G. L., Salamuni, E., Nascimento, E. R. (2014). AzimuthFinder: ferramenta para a extração de dados e apoio na análise estrutural. *Geologia USP. Série Científica*, 14(1), 6-80. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201400010005>
- SGB-CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2015). *Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município do Salvador-BA. Escala 1:50.000*. Rio de Janeiro: CPRM.
- Silva, C. N. (2005). *Diagnóstico ambiental associado às áreas de pedreiras abandonadas na cidade do Salvador-BA com ênfase na estabilidade de taludes*. Dissertação (Mestrado). Salvador: Escola Politécnica – UFBA. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/186>. Acesso em: 4 nov. 2022.
- Silva, M. D. (2013). *Avaliação Geológico-Geotécnica de uma Pedreira no Município de Simões Filho, Bahia*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia). Salvador: Instituto de Geociências – UFBA, 131 p.
- Stead, D., Wolter, A. (2015). A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology. *Journal of Structural Geology*, 74, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.02.002>
- Wyllie, D. C., Mah, C. W. (2004). *Rock slope engineering: civil and mining*. 4<sup>th</sup> ed. Nova York: Spon Press. Disponível em: [https://www.academia.edu/6973775/Rock\\_Slope\\_Engineering\\_Civil\\_and\\_mining\\_4th\\_edition\\_Duncan\\_C\\_Wyllie\\_and\\_Christopher\\_W\\_Mah](https://www.academia.edu/6973775/Rock_Slope_Engineering_Civil_and_mining_4th_edition_Duncan_C_Wyllie_and_Christopher_W_Mah). Acesso em: 4 nov. 2022.