

Modelagem geométrica e análise de risco geológico em taludes rochosos aplicada aos sistemas de falhas transversais (N090° e N120°) da cidade de Salvador, Bahia, Brasil

Geometric modeling and geological hazard analysis on rocky slopes applied to cross fault systems (N090° and N120°) in the city of Salvador, Bahia, Brazil

João Paulo Hora Carneiro¹ , Luiz César Correa Gomes¹ , Lucas de Santana Menezes¹ 

¹Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Rua Barão de Jeremoabo, s/n, CEP: 40170-290, Ondina, Salvador, BA, BR (jp_hora@hotmail.com; lccgomes@gmail.com; lsantana.geologo@gmail.com)

Recebido em 18 de julho de 2022; aceito em 16 de outubro de 2023.

Resumo

A cidade de Salvador tem uma grande parcela da população ocupando áreas de risco geológico. Geologicamente, Salvador apresenta duas direções principais de falhas originárias dos eventos tectônicos relacionados com a geração da bacia tipo rifte do Recôncavo, situada a W, e a abertura do Oceano Atlântico Sul, a E, ocorrida durante o Cretáceo. Um sistema longitudinal de falhas, orientado N030° – 040°, e outro sistema transversal de falhas (STF), orientado N90° – 120°. Esses sistemas controlam inúmeros vales, altos e taludes locais. Neste estudo, foram delimitados os principais lineamentos da cidade de Salvador e modelados o sistema de falhas da Barra (SFB) e o sistema de falhas de Brotas (SFBR), além das principais falhas de orientação N90° – 120°. A partir dos dados obtidos, foram gerados modelos em projeção estereográfica previewal de movimentos de massas com base nos dados de planos de descontinuidades da Bacia do Recôncavo, associados às estruturas encontradas na cidade de Salvador. Foi constatado, com base no estudo desses lineamentos, que as estruturas transversais com direção N120° são as de terceira maior em frequência (9,56%) e em comprimento (10,86%), e que é por meio da modelagem cinemática que o mecanismo de ruptura de deslizamento em cunha ocorre mais facilmente, sendo seguido do tombamento flexural e do deslizamento planar. A análise comparativa entre os ângulos de atrito indica que apenas os dois últimos mecanismos de ruptura têm potencialidade de ocorrer ampliada. Foram também identificados 16 taludes instáveis, três relacionados ao SFB e 13, ao SFBR, em que podem ocorrer os três mecanismos de ruptura, com direções predominantes do movimento de massa, respectivamente, para o sul e sudoeste, correspondendo às regiões muito povoadas da cidade de Salvador.

Palavras-chave: Risco geológico; Falha da barra; Falha de brotas; Deslizamentos planar e em Cunha; Tombamento.

Abstract

The city of Salvador has a large portion of the population residing in geological risk areas. Geologically, Salvador has two main fault systems, originating from the tectonic events that generated the rift-type Recôncavo basin, at W, and the opening of the South Atlantic, at E, of the city, occurred during the Cretaceous. A longitudinal system, oriented N030°-040°, and another transversal fault system (TFS), oriented N90°-120°. These systems control numerous valleys, highs, and local slopes. In this study, the main lineaments of the city of Salvador were delimited, and the Barra (BFS) and Brotas (BRFS) fault systems also were modeled, in addition to the main N90°-120° orientation faults. From there, we generated predictive stereographic net models of mass movements based on data from fault plans in the Recôncavo basin, associated structures found in the city of Salvador. It was found through the study of these lineaments that: transverse structures with direction N120° are the third largest in frequency (9.56%) and in length (10.86%), and, through kinematic modeling, the wedge slip failure mechanism occurs more easily, followed by flexural tipping and planar sliding. The comparative analysis between the friction angles indicates that only the flexural toppling and wedge sliding mechanisms have their possibility of occurring increased. Besides that, 16 unstable slopes were also identified, 3 related to the SFB and 13 related to the SFBR, where the three failure mechanisms can occur, with predominantly mass movement directions to the South and Southwest, corresponding to the heavily populated regions of the city of Salvador.

Keywords: Geological hazard; Barra fault; Brotas fault; Planar and wedge sliding; Toppling.

INTRODUÇÃO

A cidade de Salvador (Figura 1) é uma das mais importantes capitais do Brasil, tem extensão de 693,45 km² e população de 2.675.656 habitantes, resultando em uma densidade populacional de 3.859,44 hab./km² (IBGE, 2018b). Salvador apresentava o maior contingente de população em áreas de risco em 2010, tanto na Região Nordeste quanto no Brasil, contabilizando 1.217.527 habitantes (45,5% da população total do município) (IBGE, 2018a).

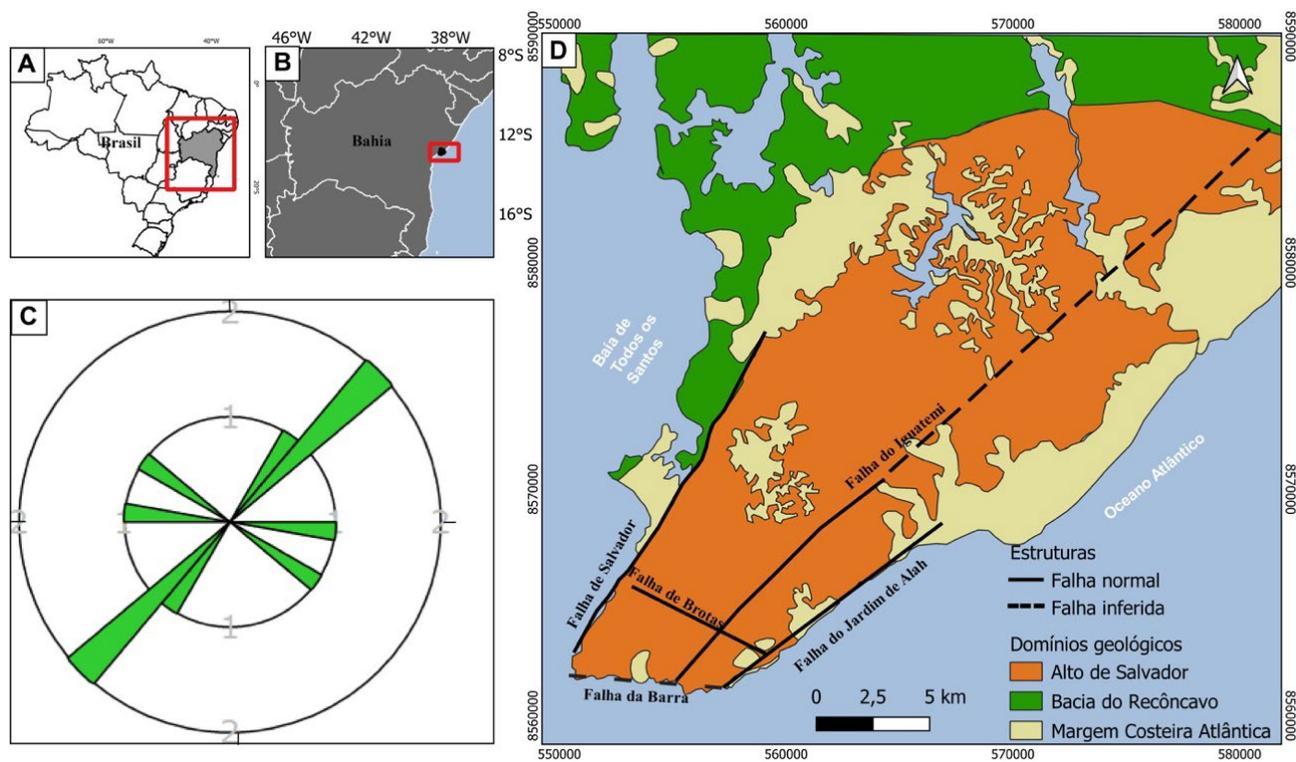
Essa grande densidade demográfica associada com a topografia acidentada da cidade propicia um ambiente de grande risco geológico dentro do perímetro urbano. Além disso, a cidade apresenta dois sistemas principais de falhas: um longitudinal N030° – 040° (sistema longitudinal de falhas — SLF) (Sistema de Falhas de Salvador e Iguatemi) e um transversal N090° – 120° (sistema transversal de falhas — STF) (Sistema de Falhas de Brotas e Barra).

O estudo da análise de risco geológico tem grande importância para a resolução de problemas, pois corresponde a uma estimativa prévia da probabilidade de ocorrência de um acidente e a avaliação das suas consequências sociais, econômicas e ambientais (Bitar e Ortega, 1998). Assim, compreender

como a influência das principais estruturas geológicas pode deflagrar instabilidade de taludes naturais é de fundamental importância para a segurança da sociedade. Considerando isso, o método da análise cinemática (Wyllie e Mah, 2004) torna-se adequado para a identificação de movimentos de massa em taludes naturais, utilizando-se de estereogramas para a determinação de possíveis áreas de risco a partir de estruturas rúpteis. Diante da análise e da interpretação dos modelos será possível alertar as comunidades que estão sob influência desses sistemas de falhas a respeito de eventuais riscos.

Entre as principais estruturas rúpteis instáveis, trabalhos como de Corrêa-Gomes e Destro (2012) e Silva (2013), a partir da coleta de 33.704 atitudes em cerca de 112 afloramentos, resultaram nas seguintes principais famílias: N000°, N010°, N030°, N090°, N120° e N160° com 70° de mergulho médio e ambos os sentidos de mergulho. Isso sugere que o mesmo conjunto de direções de estruturas instáveis que afetam a Bacia do Recôncavo (BR) provavelmente tenha também seu reflexo na geologia estrutural local.

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise geotécnica/estrutural nos taludes rochosos nas Falhas Transversais N090° (paralelos ao Sistema de Falhas da Barra



Fonte: adaptado de Barbosa et al. (2005).

Figura 1. (A) Mapa do Brasil com destaque para o Estado da Bahia; (B) localização da área de estudo em relação ao Estado da Bahia; (C) Diagrama de rosetas de frequência dos principais sistemas de falhas da cidade de Salvador, pétalas de 10° em 10°; o número ao redor do estereograma mostra o empilhamento máximo de pétalas; (D) mapa dos domínios geológicos da cidade de Salvador.

— SFB) e N120° (paralelos ao Sistema de Falhas de Brotas — SFBR), pois esses sistemas encontram-se em uma área muito urbanizada, podendo assim preservar danos econômicos e à vida. Os objetivos específicos são:

- Modelar as principais famílias de estruturas causadoras de instabilidade de taludes;
- Analisar as características geométricas e cinemáticas dos sistemas de falhas estudados;
- Mapear possíveis taludes instáveis;
- Fazer o levantamento das direções preferenciais das principais estruturas rúpteis associadas às falhas transversais.

LOCALIZAÇÃO E CONTEXTO GEOLÓGICO-GEOMECÂNICO

A área de trabalho está localizada na Região Nordeste, no litoral do Estado da Bahia (Figura 1).

Entre suas características geológicas locais, a cidade de Salvador foi subdividida por Barbosa et al. (2005) em três domínios geológicos principais (Figura 1D):

- Margem Costeira Atlântica, formada por rochas do Neógeno e depósitos quaternários (Souza et al., 2010; Souza, 2013), composta de acumulações pouco espessas de sedimentos argilosos, arenosos e arenoargilosos (Barbosa et al., 2005), e rochas miocênicas da Formação Barreiras;
- Bacia Sedimentar do Recôncavo, com cerca de 12.000 km² e com orientação NE-SW (Milhomem et al., 2003). Está limitada a noroeste pela Bacia de Tucano e a sul pelo SFB, com *trend* N090° (Milani e Davison, 1988; Milani, 1989). Essa bacia, constituída fundamentalmente de rochas sedimentares mesozoicas, faz parte do Sistema Recôncavo-Tucano-Jatobá, limitado a leste pela falha de Salvador (Barbosa et al., 2005; Souza et al., 2010; Souza, 2013). No contexto da bacia na cidade de Salvador, geologicamente afloram as unidades da Formação Salvador e do Grupo Ilhas. A BR tem geometria formada por meio-grábens e é cercada por falhas transversais que podem apresentar cinemática normal, refletindo uma identidade de falhas de alívio, a transcorrente, com componentes que podem variar a obliquidade (Destro et al., 2003);
- O Alto de Salvador é um *horst* do sistema rifte formado em rochas de alto grau metamórfico do embasamento cristalino (Orógeno Salvador-Esplanada-Boquim) (Barbosa et al., 2005). Esse orógeno corresponde ao embasamento nordeste da BR e tem orientação N040° (Silva et al., 2005). Essas rochas são reequilibradas nas fácies anfibolito alto e granulito e cortadas por enxames de diques máficos na margem litorânea da cidade (Corrêa-Gomes et al., 1996). O Alto de Salvador está limitado a oeste pela Falha de Salvador e a leste pela Falha do Jardim de Alah, e está seccionado em duas partes pela Falha do Iguatemi.

Corrêa-Gomes (2018) conclui que os sistemas de falhas longitudinais delimitam a cidade de Salvador em três compartimentos geomorfológicos: Cidade Baixa, a oeste do Sistema de Falhas de Salvador; Cidade Alta, limitada pelo Sistema de Falhas de Salvador e pelo Sistema de Falhas do Iguatemi; e Cidade Média, limitada pelo Sistema de Falhas do Iguatemi e pelo Sistema de Falhas do Jardim de Alah (Figura 2).

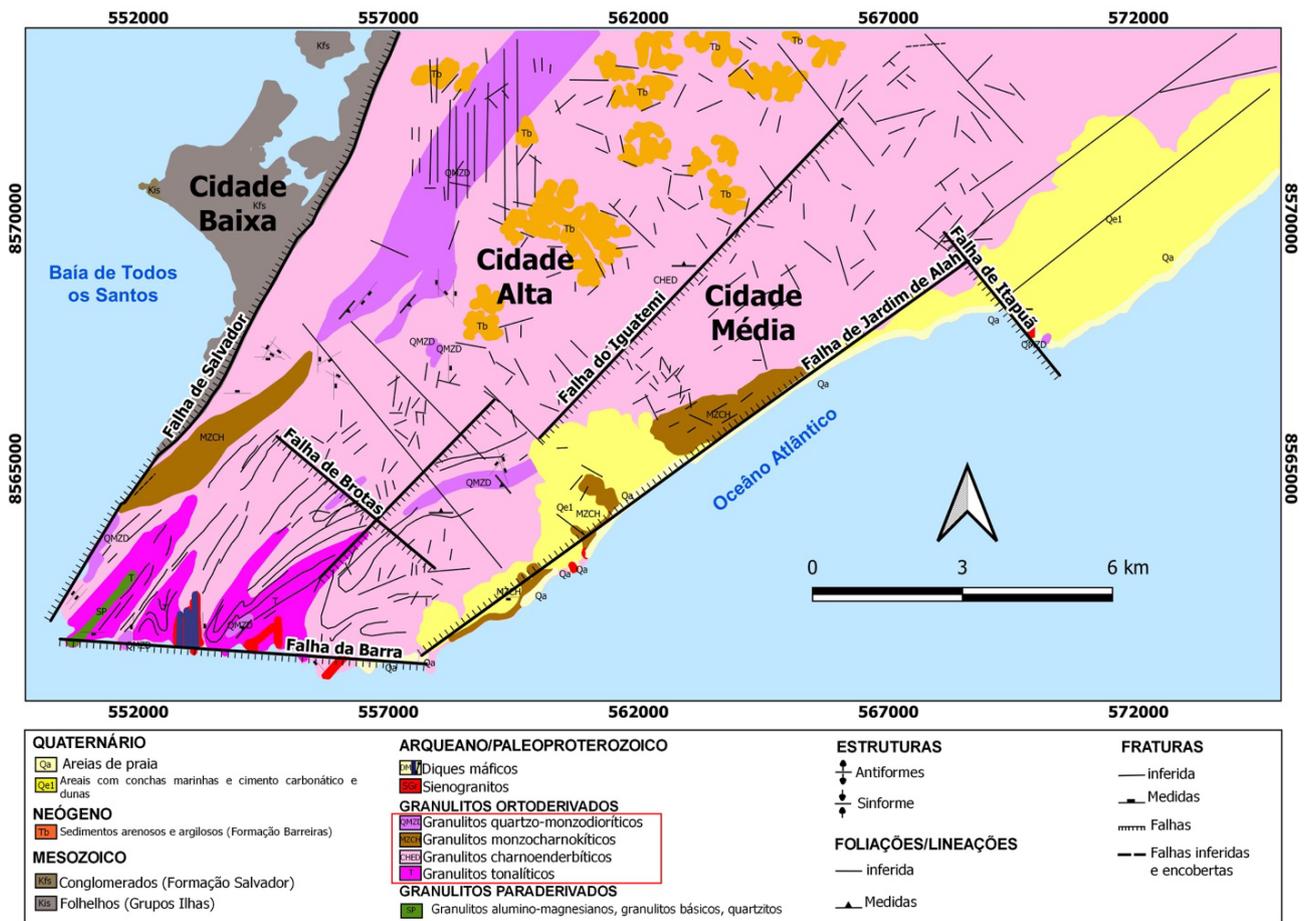
As regiões em que se localizam o STF (Figura 2) situam-se em locais aflorantes dos granulitos ortoderivados (Arqueano – Paleoproterozoico) da Formação Barreiras e dos sedimentos costeiros (Quaternários).

Ângulo de atrito das rochas da cidade de Salvador

Um parâmetro utilizado para o estudo da estabilidade de taludes é a análise das propriedades mecânicas das rochas e dos solos. Desse modo, é imprescindível entender que as principais rochas que afloram na cidade de Salvador são os granulitos ortoderivados (Figura 2), e que o topo dos taludes é formado principalmente por um latossolo residual, em razão da ação intempérica (Guimarães e Vale, 2012).

O estudo das tensões cisalhantes e a resistência a esse cisalhamento auxiliam na definição de qual é o ângulo máximo em que um talude pode apresentar estabilidade. Assim, a determinação do ângulo de atrito é essencial para o estudo geotécnico, e esse só é possível por meio de ensaios de amostras obtidos em campo. Jesus et al. (2005) e Jesus (2008) coletaram 369 amostras de solo na cidade de Salvador e encontraram valores de ângulo de atrito em ensaios com umidade natural que variavam de 18,2° a 30,1°, com variância de 6,09°. Já Souza et al. (2019) realizaram uma amostragem tanto com amostras com umidade natural quanto saturadas, obtendo valores de ângulo de atrito de 36° para as amostras saturadas e 39° para as amostras naturais.

Segundo Vaz (1996), a presença de estruturas externas como falhas, fraturas, contatos e condições hidrogeológicas são os fatores que governam as características dos maciços rochosos. Embora as amostras de Jesus et al. (2005), Jesus (2008) e Souza et al. (2019) sejam de solo residual, esse solo pode apresentar características homogêneas em relação a cor, granulometria, composição mineralógica e geometria das estruturas em razão da presença de estruturas reliquias do maciço rochoso, tendo características geomecânicas semelhantes à rocha sã. Como o comportamento geomecânico desses solos residuais é muito semelhante aos maciços rochosos, possibilita-se a utilização desses ângulos de atritos (Tabela 1) para a realização da modelagem cinemática, principalmente em se tratando de uma análise mais conservadora para aumentar o fator de segurança e prevenir danos econômicos e à vida.



Fonte: adaptado de Souza (2013).

Figura 2. Mapa com os litotipos e os principais lineamentos estruturais de Salvador. Em vermelho destacado na legenda, os principais tipos de granulitos ortoderivados identificados na cidade de Salvador.

MATÉRIAS E MÉTODOS

A realização deste trabalho seguiu três etapas, sendo a primeira a aquisição de dados relativos às famílias de estruturas instáveis e as variáveis que auxiliam na estabilidade do talude ou não, por meio de levantamento bibliográfico. A segunda etapa foi a modelagem cinemática com base nos dados médios adquiridos na primeira etapa, e a terceira etapa foi a aplicação desses modelos no STF, a partir do mapa de lineamentos, para geração dos mapas de taludes instáveis da cidade de Salvador paralelos ao STF e sentido de movimento de massa.

Modelagem cinemática

A modelagem cinemática foi realizada utilizando o Dips Rocscience v7.0 para os três principais tipos de mecanismos de ruptura em taludes naturais: deslizamento planar, deslizamento em cunha e tombamento flexural de rocha

(Figura 3). Os parâmetros geomecânicos e os dados geométricos (atitudes de descontinuidades) foram interpretados por meio da análise estereográfica no hemisfério inferior em um diagrama de Schimidt-Lambert em que os ângulos entre os meridianos e os paralelos são preservados (Gerscovich, 2012).

Para que seja possível modelar o tombamento flexural (Figura 3A), é necessário, segundo Goodman (1980), Wyllie e Mah (2004) e Chioffi (2013), que blocos rochosos individuais, ou conjunto de blocos, sofram uma rotação sobre o seu próprio eixo, criando uma ruptura por flexão, assim tombando na face livre da vertente. A ocorrência desse mecanismo de ruptura é possibilitada em razão da presença de planos estruturais bem definidos como falhas, juntas e xistosidades. Uma condição essencial para a ocorrência do fenômeno é que o limite lateral do deslocamento não exceda 10° (Glastonbury e Fell, 2000), pois haverá um acréscimo da espessura da rocha que proporcionará estabilidade nesse bloco.

Tabela 1. Dados de entrada referentes às especificações das redes estereográficas no *software* Dips Rocscience v7.0, para realização da modelagem cinemática.

Parâmetros	Dados e especificações das redes estereográficas	Referências
Tipos de movimento de massa	Tombamento flexural de rocha, deslizamento planar, deslizamento em cunha	Goodman (1980); Hoek e Bray (1981); Glastonbury e Fell (2000); Wyllie e Mah (2004); Chioffi (2013)
Direção dos taludes (<i>strike</i>)	N090° e N120°	
Ângulo dos mergulhos dos taludes	0° a 90° com intervalo de 10°	
Atitudes das descontinuidades	N00°/70°W; N10°/70°NW; N030°/70°NW; N160°/70°NE; N000°/70°SE; N10°/70°SE; N030°/70°SE; N160°/70°SW; N040°/70°NW; N90°/70°N; N120°/70°NE; N40°/70°SE; N90°/70°S; N120°/70°SW	Corrêa-Gomes e Destro (2012); Silva (2013)
Limite lateral	Tombamento de rocha 10°, deslizamento planar 20°, deslizamento em cunha N/A	Goodman (1980); Hoek e Bray (1981); Glastonbury e Fell (2000); Wyllie e Mah (2004); Chioffi (2013)
Ângulos de atrito	18°, 30°, 36° e 39°	Jesus et al. (2005); Jesus (2008); Souza et al. (2019)
Rede estereográfica	Igual-área ou Schmidt-Lambert	Wyllie e Mah (2004); Chioffi (2013)
Hemisfério	Hemisfério Inferior	Wyllie e Mah (2004); Chioffi (2013)

A modelagem de deslizamento planar (Figura 3B) só é possível se as estruturas forem aflorantes e inclinadas na direção da face livre da vertente, com ângulo superior ao ângulo de atrito interno da rocha e ângulo menor que o da inclinação da superfície livre da vertente (Chioffi, 2013). O deslizamento do plano não é possível se a direção do mergulho da descontinuidade difere da direção do mergulho da face em muito mais do que cerca de 20° (Wyllie e Mah, 2004). Isso ocorre porque sob essas condições haverá um acréscimo de espessura da rocha em uma extremidade do bloco que terá força para resistir ao falhamento.

A modelagem do deslizamento em cunha (Figura 3C) é um pouco mais complexa, pois depende da análise da interseção de dois ou mais planos de descontinuidade. Uma cunha com duas faces em contato com a rocha apresenta três modos de deslizamento fundamentais: dois modos de deslizamento em qualquer plano sozinho ou um modo de deslizamento ao longo da linha de interseção (Goodman, 1980).

A modelagem compreendeu taludes de direção N090° e N120° com uma variação de mergulho de 0° a 90° com intervalos de 10°. Esses taludes estão associados ao SFB e ao SFBR, respectivamente. Utilizou-se o valor médio de 30° para o ângulo de atrito entre os obtidos por Jesus et al. (2005), Jesus (2008) e Souza et al. (2019). Posteriormente foi realizada a comparação entre os ângulos de 18° e 30°, descritos por Jesus et al. (2005) e Jesus (2008), e 36° e 39°, descritos por Souza et al. (2019) — obtidos por meio de amostras naturais e úmidas. Utilizaram-se as principais famílias de descontinuidades descritas por Corrêa-Gomes e Destro (2012) e Silva (2013). Essas principais orientações

planares podem ser vistas na Tabela 1. O limite lateral foi definido em 10° para tombamento e 20° para deslizamento planar, valores esses médios para ocorrência do fenômeno segundo Goodman (1980), Hoek e Bray (1981), Glastonbury e Fell (2000), Wyllie e Mah (2004) e Chioffi (2013). Os parâmetros utilizados no Dips Rocscience v7.0 estão dispostos na Tabela 1.

Na modelagem cinemática, foi utilizado o ângulo de atrito de 30° por se tratar de um valor médio entre os ângulos de atrito obtidos por Jesus et al. (2005), Jesus (2008) e Souza et al. (2019) na representação gráfica. Portanto, os modelos criados apresentarão formação de área de risco (instabilidade) a partir do ângulo de mergulho do talude de 40°, haja visto que a variação da inclinação de cada modelo é de 10° em 10°. Sendo assim, os modelos apresentados terão sua representação gráfica com variação de inclinação de 40° a 90°.

Estudo de caso: mapeamento de taludes instáveis

O traçado dos lineamentos estruturais foi realizado de forma manual, por meio da ferramenta de vetorização, utilizando o *software* SIG QGIS 3.10. Para isso, foram utilizadas imagens Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e transformadas no aspecto sombreado utilizando a ferramenta de “Análise de Terreno” do Qgis v.3.10, para os azimutes de insolação (ângulo em que a iluminação é realizada na imagem de satélite) de 45°, 135°, 225° e 315°, e altitude de insolação (ângulo em que o Sol está da superfície) de 45°. Com esses lineamentos estruturais traçados foi possível gerar os diagramas de frequência e comprimento.

Para a realização desse mapeamento foi necessária a utilização do *software* QGIS para geolocalização dos taludes instáveis, e o uso de imagem SRTM e dos dados de cotas topográficas com precisão de 1 m fornecidos pela Companhia de Desenvolvimento Urbana do Estado da Bahia (CONDER).

A identificação de taludes se deu a partir da análise remota por meio do *software* Google Earth Pro e correlacionando com os lineamentos estruturais obtidos neste artigo. Com a identificação dos taludes calculou-se o ângulo referente ao mergulho do talude, utilizando uma relação trigonométrica entre a altura do talude e a distância do topo à base. Esses valores foram obtidos por meio da ferramenta de medida de distância, da utilização de curvas de nível e

dados altimétricos. Com os mergulhos dos taludes e suas localizações, o próximo passo foi modelar com os dados de entrada para se estabelecer se a localidade tinha ou não um ou mais mecanismos de ruptura. Com essas informações tabeladas, a próxima etapa foi utilizar o *software* QGIS v.3.10 para geração dos mapas em coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), Datum SIRGAS 2000. Esse mapeamento seguiu o mesmo modelo proposto por Menezes (2021) para identificar os taludes.

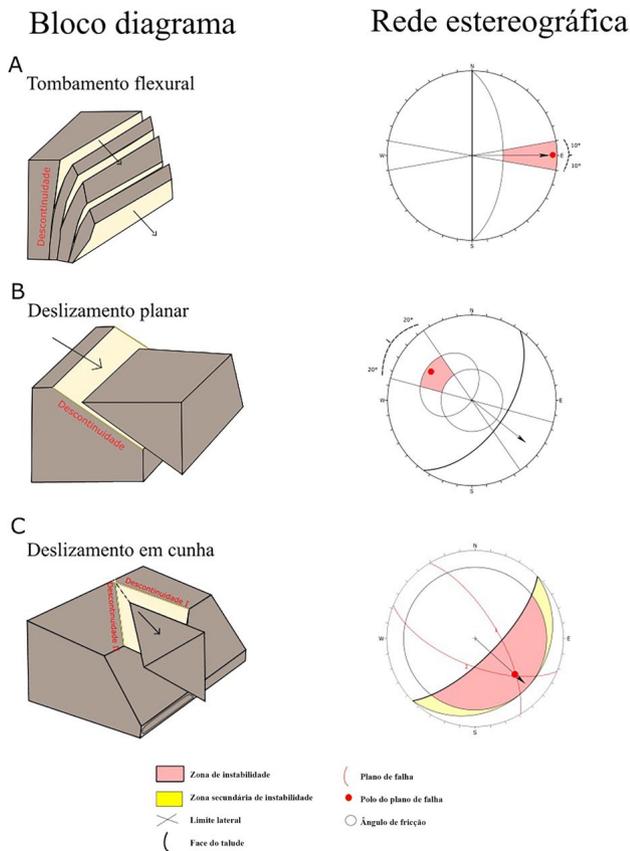
RESULTADOS

Modelagem cinemática

Tombamento flexural de rocha

Na modelagem de tombamento de bloco em um talude de direção N090° (Figura 4), o talude apresenta instabilidade a partir de 40°. A partir de 50° até 90° foram identificados dois polos da falha onde pode ocorrer o tombamento de bloco; esses polos são referentes aos planos N090°/70°N e N090°/70°S. Esses polos se mantêm como os únicos causadores de risco geológico.

Na modelagem de tombamento de bloco em um talude de direção N120° (Figura 5), o talude apresenta instabilidade a partir de 40°. A partir de 50° até 90° foram identificados



Fonte: adaptado de Wyllie e Mah (2004).

Figura 3. Principais mecanismos de tombamento e deslizamento de blocos, representação em bloco diagramas e rede estereográfica. (A) Tombamento flexural de rocha contendo descontinuidades mergulhando abruptamente na face; (B) deslizamento planar de rocha contendo descontinuidades mergulhando para fora da face da encosta; (C) deslizamento em cunha contendo duas interseções de descontinuidades. Em rosa, a área na qual pode ocorrer o risco geológico, e em amarelo, a área secundária de risco para deslizamento em cunha, utilizado para interpretações conservadoras.

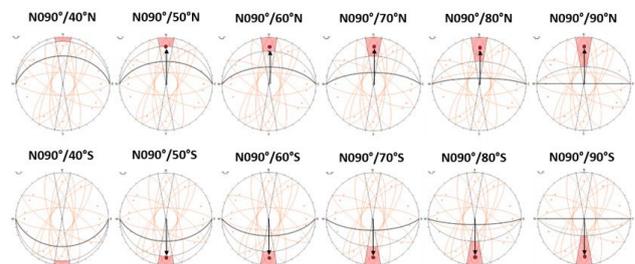


Figura 4. Modelagem de tombamento flexural para taludes de direção N090° com ambas as direções de mergulho; em rosa, a zona de instabilidade para tombamento de blocos.

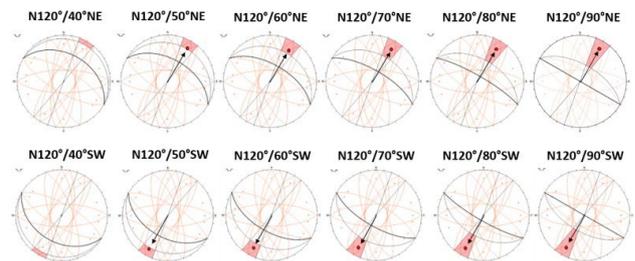


Figura 5. Modelagem de tombamento flexural para taludes de direção N120° com ambas as direções de mergulho; em rosa, a zona de instabilidade para tombamento de blocos.

dois polos da falha onde pode ocorrer o tombamento de bloco; esses polos são referentes aos planos N120°/70NE e N120°/70SW, respectivamente. Esses polos se mantêm como os únicos causadores de risco geológico.

Deslizamento planar

Na modelagem em um talude de direção N090° (Figura 6), o talude apresenta instabilidade a partir de 40°, e a partir de 70° foram encontrados dois polos de falha onde pode ocorrer o deslizamento planar. Esses planos relativos a esses polos são os N090°/70°N e N090°/70°S. Quando o talude atinge o mergulho máximo de 90°, o plano em risco se mantém, mas caso o limite lateral exceda 20°, os polos dos planos N030°/70°NW, N030°/70°SE, N040°/70°NW, N040°/70°SE, N120°/70°NE e N120°/70°SW também estarão situados na zona de risco rosada.

Na modelagem em um talude de direção N120° (Figura 7), o talude apresenta instabilidade a partir de 40°, e a partir de 70° foram encontrados dois polos da falha onde pode ocorrer o deslizamento planar; esses são os polos dos planos N120°/70°NE e N120°/70°SW. Quando o talude atinge o mergulho máximo de 90°, o plano em risco se mantém, mas caso o limite lateral exceda 20°, os polos dos planos N000°/70°E, N000°/70°W, N090°/70°N, N090°/70°S, N160°/70°NE e N160°/70°SW também estarão situados na zona de instabilidade em rosa.

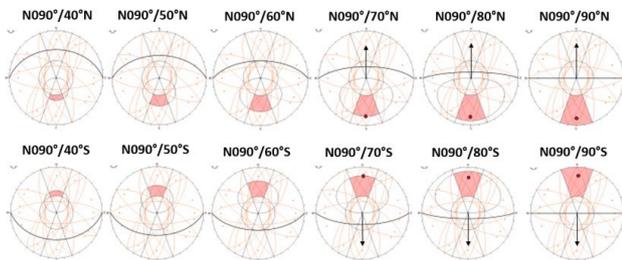


Figura 6. Modelagem de deslizamento planar para taludes de direção N090° com ambas as direções de mergulho; em rosa, a zona de instabilidade para deslizamento planar.

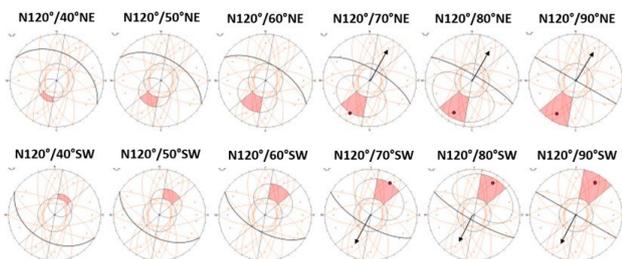


Figura 7. Modelagem de deslizamento planar para taludes de direção N120° com ambas as direções de mergulho; em rosa, a zona de instabilidade para deslizamento planar.

Deslizamento em cunha

Na modelagem de deslizamento em cunha em um talude de direção N090° (Figura 8), o risco geológico teve seu início a partir do mergulho de 40°, onde foram encontradas três interseções de plano, ponto este instável propício para o evento do deslizamento em cunha. À medida que o mergulho foi aumentando de 50°, 60°, 70°, 80° e 90° temos, respectivamente, 5 (5,5%), 8 (8,8%), 22 (24,2%), 28 (30,8%) e 39 (42,9%) interseções dentro da zona de instabilidade; esse número de interseções é igual para ambas as direções de mergulhos modeladas. O *trend* do movimento de massa é concordante com a direção do mergulho do talude em inclinações de 40° e 50°. A partir de 60° tem duas tendências principais, e amplia-se para quatro em situações subverticalizadas (80° e 90°) para ambos os sentidos de mergulho.

Na modelagem de deslizamento em cunha em um talude de direção N120° (Figura 9), o risco geológico teve seu início a partir do mergulho de 40°, onde foram encontradas duas interseções de plano, ponto este instável e propício para o evento do deslizamento em cunha. À medida que o mergulho foi aumentando de 50°, 60°, 70°, 80° e 90°

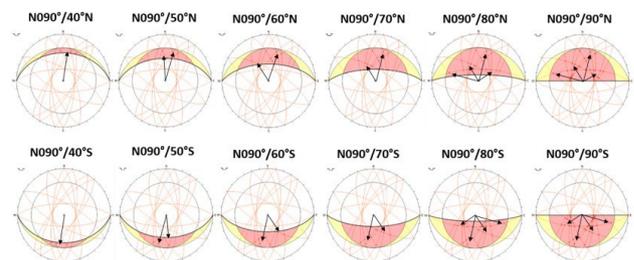


Figura 8. Modelagem de deslizamento em cunha para taludes de direção N090° com ambas as direções de mergulho; em rosa, a zona de instabilidade para deslizamento em cunha, e em amarelo, uma zona secundária de instabilidade. A direção da seta indica a tendência de direção do movimento de massa.

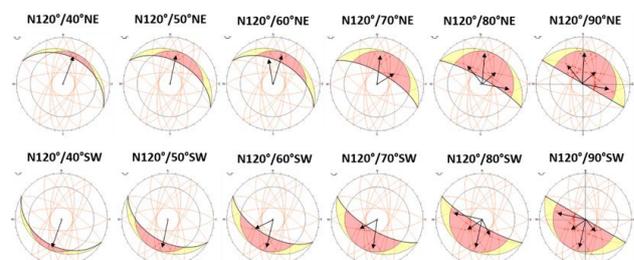


Figura 9. Modelagem de deslizamento em cunha para taludes de direção N120° com ambas as direções de mergulho; em rosa, a zona de instabilidade para deslizamento em cunha, e em amarelo, a zona secundária de instabilidade. A direção da seta indica a tendência de direção do movimento de massa.

temos, respectivamente, 4 (4,4%), 8 (8,8%), 21 (23%), 29 (31,2%) e 40 (43,9%) pontos críticos dentro da zona de instabilidade; esse número de interseções é igual para ambas as direções de mergulhos modeladas. O *trend* principal do movimento de massa é concordante com o sentido do mergulho para taludes de inclinação de 40°; já a partir de 50° até 70° tem duas tendências principais, uma com sentido igual do talude e outra para nordeste e sudeste, respectivamente. Quando subverticalizados tem quatro sentidos principais em razão do grande número de interseções de planos de descontinuidades.

Comparação entre os ângulos de atrito

Como Salvador apresenta uma heterogeneidade em relação à geologia e à pedologia em diferentes pontos da cidade, além de um regime de chuva que pode propiciar solos mais ou menos saturados em água a depender da época do ano, foi realizada uma comparação entre os ângulos de atrito de 18°, 30°, 36° e 39° propostos por Jesus et al. (2005), Jesus (2008) e Souza et al. (2019) utilizando o modelo apresentado no tópico anterior, para tombamento flexural, deslizamentos planar e em cunha.

Tombamento flexural de rocha

Foi identificado um comportamento diferente para os taludes com diferentes ângulos de atrito em relação à inclinação do talude. Há duas estruturas instáveis em todos os cenários de ângulos de atrito (Figura 10). No ângulo crítico de 18° foi encontrado o cenário de maior instabilidade com taludes de inclinação de 40° produzindo movimentos de massa. Nos ângulos críticos de 36° e 39° foi identificado o cenário mais estável, com taludes produzindo movimentos de massa em taludes a partir de 60° de mergulho.

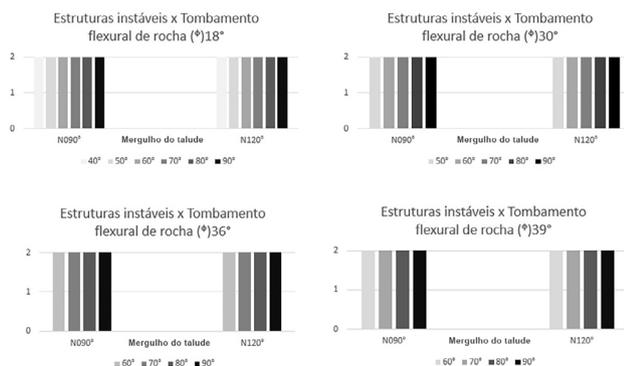


Figura 10. Gráficos de barras de estruturas instáveis x tombamento flexural em relação aos ângulos críticos de 18°, 30°, 36° e 39°, considerando os dois sentidos de mergulho do talude. O tombamento flexural de rocha pode ocorrer a partir do ângulo de 40° no cenário mais instável.

Deslizamento planar

Durante a análise comparativa, a mudança do ângulo de atrito nesse tipo de movimento de massa não teve impacto no resultado de estruturas instáveis identificadas (Figura 11). Foram identificadas duas estruturas instáveis em todos os cenários de ângulos de atrito. A partir de 70° o talude encontra-se instável, mas o número de estruturas manteve-se igual entre os ângulos de 70° e 90°.

Deslizamento em cunha

Durante a análise dos diferentes comportamentos em relação ao ângulo de atrito identificou-se que há uma relação diretamente proporcional entre o número de estruturas instáveis e o ângulo de mergulho do talude: quanto maior a inclinação do talude, maior o número de estruturas instáveis (Figura 12).

Comparativamente em taludes de direção N90° no ângulo de atrito 36° há um maior número de estruturas instáveis em relação aos taludes N120°, porém em um ângulo de atrito

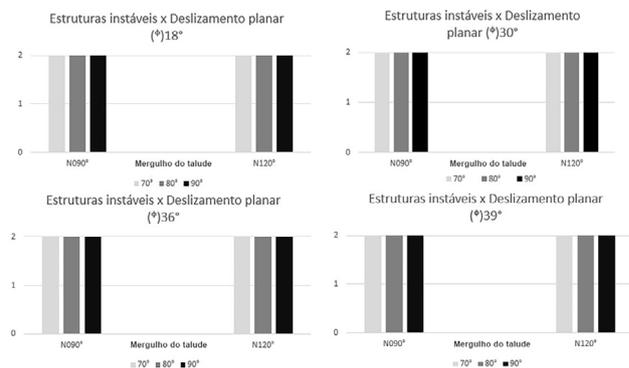


Figura 11. Gráficos de barras de estruturas instáveis x deslizamento planar em relação aos ângulos críticos de 18°, 30°, 36° e 39°, considerando os dois sentidos de mergulho do talude. O deslizamento planar pode ocorrer a partir do ângulo de 70° no cenário mais instável.

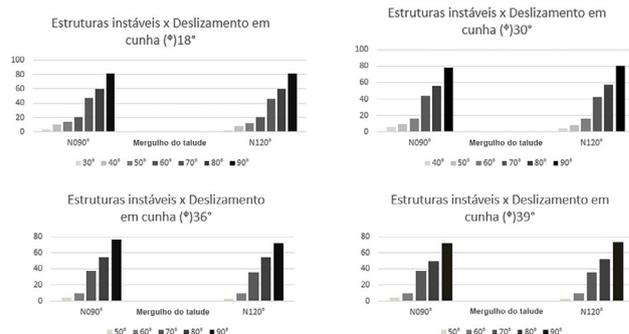


Figura 12. Gráficos de barras de estruturas instáveis x deslizamento em cunha em relação aos ângulos críticos de 18°, 30°, 36° e 39°, considerando os dois sentidos de mergulho do talude. O deslizamento em cunha pode ocorrer a partir do ângulo de 30° no cenário mais instável.

de 30° há maior predominância nos taludes N120° em relação aos N090°. Em ambas as direções de taludes o maior número de intersecção de estruturas identificadas foi de 82 sob uma situação de ângulo de atrito de 18°.

O número das estruturas instáveis dos taludes de direção N090° e N120° é muito semelhante em relação ao aumento do ângulo de atrito (Figura 13). Porém, é observado que em ângulos de atrito de 39° nos taludes com mergulho de 70° a 80° há mais estruturas instáveis do que no ângulo de atrito de 36° para taludes de direção N120°.

Mapeamento dos taludes instáveis no sistema transversal de falhas: estudo de caso

Os lineamentos estruturais foram extraídos a partir de linhas traçadas manualmente em contraste de relevo de imagens SRTM. Foram traçados um total de 230 lineamentos com comprimento acumulado de 334.600 m (Figura 14A). Na Figura 14B pode-se destacar que os lineamentos com maior frequência são: N130° – N140°, com 31 medidas (13,47%); N120° – N130°, com 22 medidas (9,56%); N140° – N150°, com 21 medidas (9,13%); e N40° – N50°, com 18 medidas (7,82%). Na Figura 14C, os lineamentos com maiores comprimentos são: N30° – N40°, com 44.070 m (13,17%); N40° – N50°, com 41.697 m (12,46%); N120° – N130°, com 36.273 m (10,84%); e N130° – N140°, com 33.222 m (9,92%).

Diante da interpretação dos lineamentos foi possível traçar dois lineamentos estruturais fundamentais para o STF (Figura 14A), que serão abordados no estudo de caso: o primeiro no extremo sul da cidade de Salvador, de direção N090°, que representa o SFB, e o segundo de direção N120°, o SFBR. Mesmo não sendo as principais direções em termos de comprimento, têm grande influência por estarem em uma área de grande densidade populacional.

A partir da análise do mapa de lineamento e do uso das ferramentas de geoprocessamento foi possível identificar 19 taludes no SFB e 24 no SFBR (Figura 15A). Os taludes do SFB predominantemente têm mergulho para S (16 taludes)

com máxima densidade polar em 088°/27° (Figura 15B), direção média de 92° e mergulho médio de 27°. Os taludes que mergulham para N (três taludes) têm polo médio de 270°/25° com máxima densidade polar em 270°/25° (Figura 15B), direção média de 90° e mergulho médio de 25°. No SFBR há maior orientação de taludes para SW (13 taludes), com polo médio de 033°/37° (Figura 15C), direção média de 123° e mergulho médio de 37°. Os taludes com orientação para NE (11 taludes) têm máxima densidade polar de 191°/34° (Figura 15C), direção média de 121° e mergulho médio de 34°, conforme a Tabela 2.

Foram identificados 43 taludes no STF; desses, 16 são instáveis, sendo três do SFB e 13 do SFBR (Figura 16A). Durante a identificação desses pontos instáveis (Figura 16B) encontrou-se a possibilidade da ocorrência dos mecanismos de ruptura, como tombamento flexural de rocha em sete pontos, deslizamento planar em dois pontos e deslizamento em

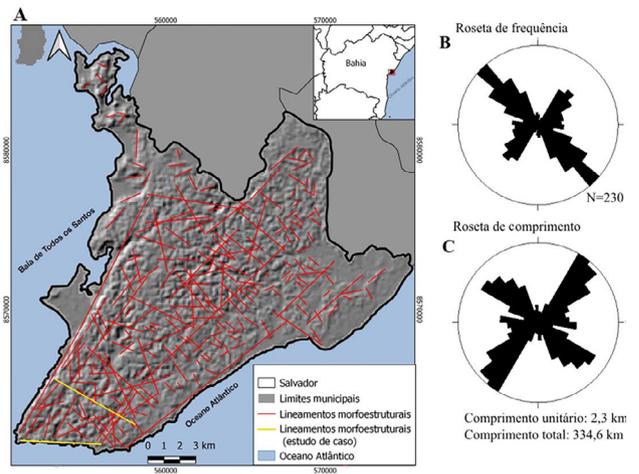


Figura 14. (A) Mapa de lineamentos estruturais interpretados da cidade de Salvador; (B) Diagrama de rosetas das direções com maior frequência, encontradas na área de estudo; (C) Diagrama de rosetas referente ao comprimento total acumulado dos lineamentos traçados. Pétalas de 10° em 10°.

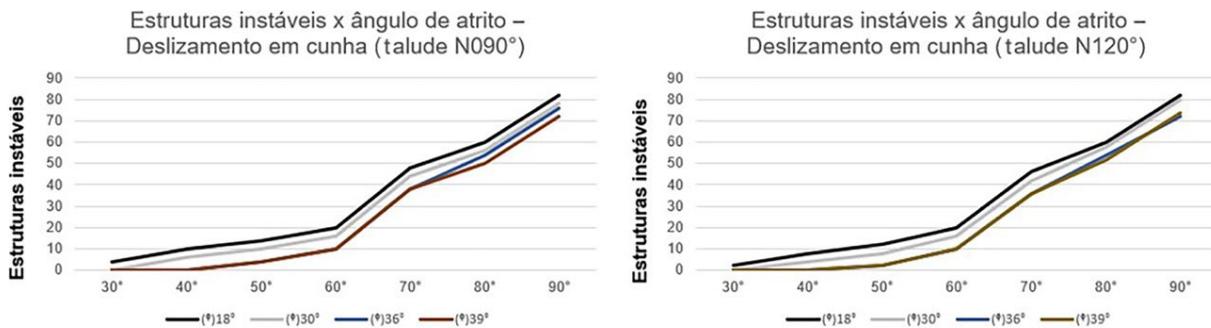


Figura 13. Relação comparativa das estruturas instáveis x ângulo de atrito para taludes de direção N090° e N120°. Número crescente de estruturas instáveis a partir de taludes com ângulo de inclinação superior a 30°.

cunha (Figura 16C) tanto no SFB (Tabela 3) quanto no SFBR (Tabela 4), estando presente em todos os 16 pontos instáveis.

Sentido do movimento de massa no sistema transversal de falhas

A partir da modelagem cinemática foi possível produzir o mapa do sentido de movimento de massa (Figura 17). As modelagens do deslizamento planar e do tombamento flexural de rocha produziram um *trend* principal e podem ser mapeados, porém para o deslizamento em cunha, por ter muitas descontinuidades, não foi possível determinar um único *trend* principal.

Dentro do SFB, nos pontos 2 e 3 foi identificado um sentido de movimento de tombamento flexural de rocha para sul, e somente no ponto 3, um deslizamento planar para sul, para uma área com grande população. No SFBR, identificaram-se nos pontos 4, 5, 10, 13 e 14 tombamento flexural, sendo nos pontos 4, 5 e 14 para sudoeste e nos pontos 10 e 13 para nordeste. É necessária muita atenção para esses dois últimos pontos, pois o sentido de movimento de massa aponta para uma das áreas mais populosas da cidade de Salvador. O deslizamento planar foi identificado apenas no ponto 10, com o sentido do movimento de massa para nordeste.

DISCUSSÃO

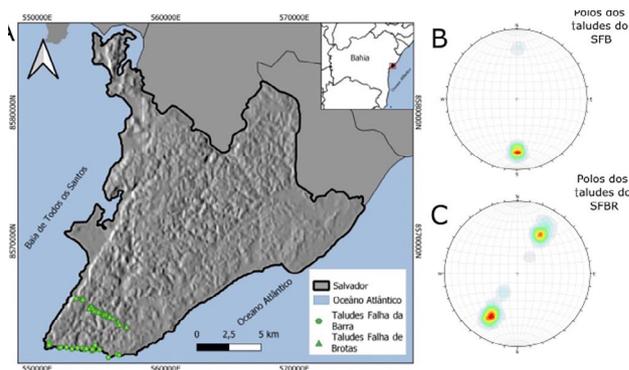
A representação gráfica da modelagem cinemática com ângulo de atrito médio caracterizou, a partir dos valores médios geométricos, que há situações em que os taludes com direções N090° e N120° para ambos os sentidos de mergulho podem apresentar risco geológico.

A modelagem cinemática para tombamento flexural demonstrou que o risco geológico em taludes de direção N090° e N120° inicia a sua instabilidade a partir de 40°. Porém, apenas a partir de 50° que as famílias N090°/70°N, N090°/70°S, N120°/70°NE e N120°/70°SW produzem risco geológico. O *trend* do movimento de massa não se deslocou ao longo do aumento do mergulho do talude, e durante a movimentação de massa o *trend* tem mesmo sentido do

mergulho do talude. Taludes formados por rochas mais alteradas ou saturadas em água, como demonstrado para situações em que apresentam ângulo de atrito de 18°, podem estar em instabilidade a partir da inclinação de 40°, propiciando um ambiente de alto risco.

A análise de deslizamento planar demonstrou que a partir de um ângulo de mergulho de 70° para ambas as direções e sentidos de mergulhos, os taludes apresentam instabilidade causada pelas principais famílias de planos de fraturas presentes na BR, sendo estes: N090°/70°N, N090°/70°S, N120°/70°NE e N120°/70°SW. O *trend* do movimento de massa não se deslocou ao longo do aumento do mergulho do talude. Taludes com a presença dessas famílias necessitam de uma intervenção geotécnica para a prevenção de um acidente geológico. É necessário se considerar que mesmo em situações em que o talude, formado por rochas com menos resistência ao cisalhamento, com ângulo de atrito de 18°, não acarretou risco geológico nos taludes com inclinação de 70°. Também não foram identificadas outras famílias de estruturas que possam causar instabilidade.

O cenário mais instável foi encontrado na modelagem cinemática do deslizamento em cunha, em que taludes de direção N090° e N120° com inclinação de apenas



SFB: Sistema de Falhas da Barra; SFBR: Sistema de Falhas de Brotas.

Figura 15. (A) Mapa dos taludes no Sistema de Falhas da Barra e no Sistema de Falhas de Brotas; (B) diagrama da densidade de polos dos taludes do Sistema de Falhas da Barra; (C) diagrama da densidade de polos dos taludes do Sistema de Falhas de Brotas.

Tabela 2. Dados compilados dos valores médios da geometria dos taludes no sistema transversal de falhas.

Orientação do talude	Quantidade de taludes	Polo médio	Direção média	Mergulho médio dos taludes
(SFB)				
Mergulho para N	3	270°/25°	090°	25°
Mergulho para S	16	088°/27°	092°	27°
(SFBR)				
Mergulho para NE	11	191°/34°	121°	34°
Mergulho para SW	13	033°/37°	123°	37°

SFB: Sistema de Falhas da Barra; SFBR: Sistema de Falhas de Brotas.

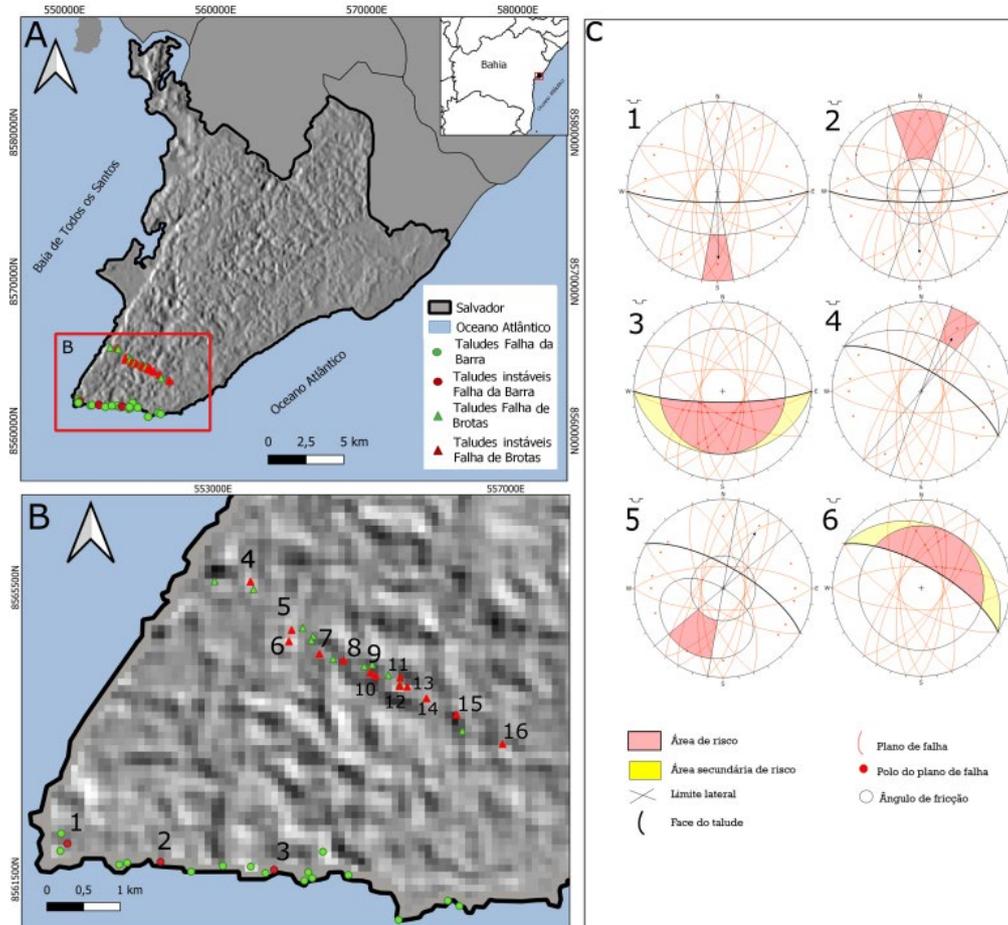


Figura 16. (A) Mapa dos taludes estáveis e instáveis do Sistema de Falhas da Barra e do Sistema de Falhas de Brotas; em verde, os taludes estáveis, e em vermelho, os taludes instáveis; (B) mapa em destaque dos taludes instáveis e estáveis paralelos ao Sistema de Falhas da Barra e ao Sistema de Falhas de Brotas; (C) diagramas correspondentes aos taludes instáveis; 1, 2 e 3 representam, respectivamente, a ocorrência dos mecanismos por ruptura de tombamento flexural de rocha, deslizamento planar e deslizamento em cunha do ponto 3 do Sistema de Falhas da Barra; 4, 5 e 6 representam, respectivamente, a ocorrência dos mecanismos por ruptura de tombamento flexural de rocha, deslizamento planar e deslizamento em cunha do ponto 10 do Sistema de Falhas de Brotas.

Tabela 3. Localização e ocorrência dos movimentos de massa no Sistema de Falhas da Barra.

Sistema de Falhas da Barra					
Ponto	UTM S	UTM E	Atitude do talude	Movimento de massa	Localização
1	85661991	552283	N090°/40°S	Deslizamento em cunha	Rua Eng. Milton Oliveira, nos fundos do Ed. Barra the Place Residence
2	8561740	552283	N090°/60°S	Tombamento flexural de rocha, deslizamento em cunha	Av. Oceânica, nos fundos do Condomínio Costa Espanha
3	8561631	553824	N090°/80°S	Tombamento flexural de rocha, deslizamento planar e deslizamento em cunha	Av. Oceânica, nos fundos de um ponto de ônibus ao lado da loja Artesão Vime

40° apresentaram três e duas famílias de estruturas instáveis para ambos os sentidos de mergulho, respectivamente. Constatou-se que o número de estruturas instáveis pode aumentar em até 10 vezes em taludes subverticalizados.

Estando o talude em uma situação geomecânica mais suscetível aos riscos geológicos (menores ângulos de atrito), esse número de estruturas instáveis cresce ainda mais em razão da grande interseção dos planos instáveis.

Tabela 4. Localização e ocorrência dos movimentos de massa no Sistema de Falhas de Brotas.

Sistema de Falhas de Brotas					
Ponto	UTM S	UTM E	Atitude do talude	Movimento de massa	Localização
4	8565579	553512	N120°/60°SW	Tombamento flexural de rocha, deslizamento em cunha	Rua da Poeira, nos fundos da distribuidora de livros da Bahia
5	8564916	554075	N120°/50°SW	Tombamento flexural de rocha, deslizamento em cunha	Rua Jurema, em frente ao Ed. Morada Santa Branca
6	8564761	554038	N120°/40°NE	Deslizamento em cunha	Rua João Jardim XXIII, nos fundos do Ed. Hélio Matos
7	8564589	554456	N120°/40°NE	Deslizamento em cunha	Av. Laurindo Régos, ao lado do Condomínio Reitor Edgar Santos
8	8564502	554785	N120°/40°NE	Deslizamento em cunha	Av. Dom João VI, nos fundos do Condomínio Parque das Chácaras
9	8564333	555153	N120°/40°NE	Deslizamento em cunha	Rua Tranquilino Flores
10	8564287	555225	N120°/70°NE	Tombamento flexural de rocha, deslizamento planar e deslizamento em cunha	Rua Padre Daniel Lisboa, nos fundos do Ed. Pôr do Sol
11	8564263	555559	N120°/40°SW	Deslizamento em cunha	Rua Rio Branco
12	8564147	555550	N120°/40°NE	Deslizamento em cunha	Rua Rio Branco, nos fundos do Centro Espírita O Consolador
13	8564138	555655	N120°/50°NE	Tombamento flexural de rocha, deslizamento em cunha	Rua Rio Branco, nos fundos do Centro Espírita O Consolador
14	8563980	555918	N120°/50°SW	Tombamento flexural de rocha, deslizamento em cunha	Rua Miguel Gustavo, nos fundos do Ed. Sagarana
15	8563759	556327	N120°/40°SW	Deslizamento em cunha	Rua Monsenhor Antônio Rosa, em frente ao Ed. Terrazo Colina
16	8563355	556956	N120°/40°SW	Deslizamento em cunha	Av. Antônio Carlos Magalhães, nos fundos do Condomínio Ed. Mansão Maurício Ravel

Durante a análise dos lineamentos, o diagrama de rosetas demonstrou uma predominância maior de taludes com orientação NNE-SSW e E-W, corroborando com os dados referentes aos trabalhos de Corrêa-Gomes e Destro (2012) e Silva (2013). Observa-se que as estruturas longitudinais têm maior expressão em termos de frequência (Figura 17B), como descrito por Menezes (2021) em seu trabalho que aborda as falhas de Salvador e Iguatemi, porém em termos de comprimento os lineamentos transversais se sobressaem e mesmo tendo uma influência secundária contribuem diretamente dentro do sistema de falhas.

Tanto no SFB quanto no SFBR há influências das famílias longitudinais e transversais de falhas da BR. No SFB, em 15,7% dos taludes foram identificadas instabilidades, destacando-se o ponto 3 de atitude N090°/80°S, em que há a possibilidade de ocorrências de tombamento flexural de rocha, deslizamento planar e deslizamento em cunha. Respectivamente, as famílias de estruturas instáveis dos dois primeiros mecanismos de ruptura que podem causar tal instabilidade são representadas pelos polos 000°/70° e 180°/70°. Para o mecanismo de deslizamento em cunha foram identificadas 28 estruturas instáveis, assim o talude (ponto 3) tem direção do fluxo gravitacional (dos três mecanismos de ruptura) com possibilidade de atingir a população que reside ao sul (Figura 17).

No SFBR, 54,2% dos taludes foram identificados como instáveis. O ponto mais crítico dentro desse sistema foi o ponto 10, com atitude N120°/70°NE. Além disso, também foi identificada a possibilidade da ocorrência dos três tipos de mecanismos de ruptura. As famílias de estruturas instáveis são representadas pelos polos 120°/70° no tombamento flexural de rocha, e para o deslizamento planar é o 340°/70°; já no deslizamento em cunha foram identificadas 29 estruturas instáveis. Nos taludes em que ocorrem esse mecanismo de ruptura o sentido do movimento de massa tem a mesma orientação do mergulho do talude em uma área densamente habitada (Figura 17).

Segundo a Lei de Ordenamento do Uso e Ocupação do Solo (LOUOS) de Salvador, Lei nº 9.148 de 2016, habitações quando em encostas com inclinação superior a 27° devem ser regularizadas perante a prefeitura e necessitam de intervenção geotécnica adequada a cada situação. Dentro desse panorama, todos os 43 taludes contidos no SFB e no SFBR, para poder ter habitação regular, necessitam de alguma intervenção geotécnica. Chama-se ainda a atenção que mais da metade dos taludes no SFBR apresenta um possível risco geológico.

Destaca-se que havendo a interação antrópica aumentando a inclinação (de 10° a 20°) nos taludes não identificados como em risco, pode aumentar o número de taludes instáveis no SFBR em até 84% e no SFB em até 120%.

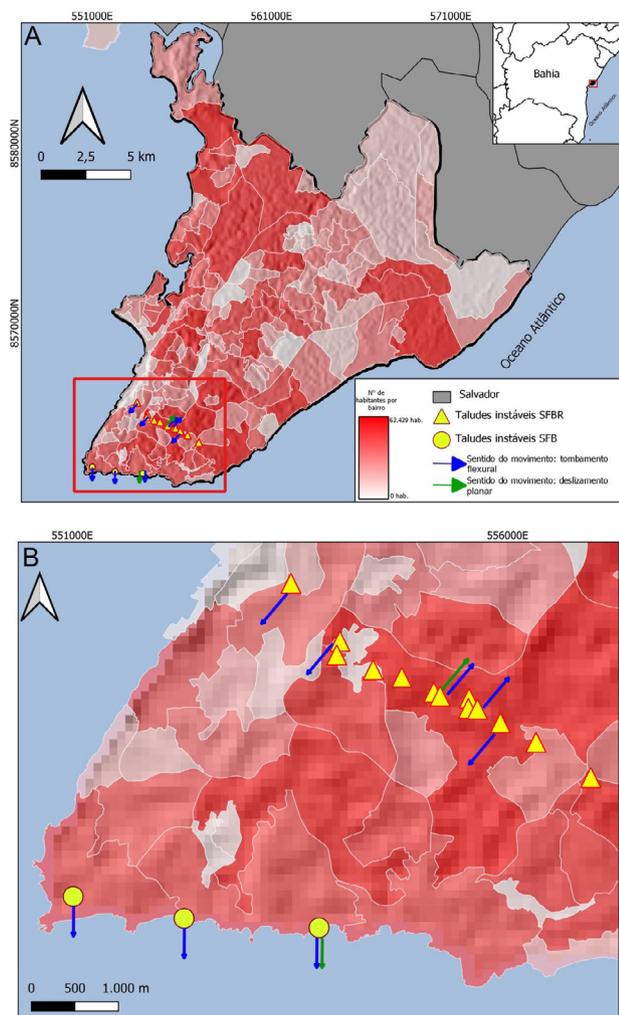


Figura 17. (A) Mapa de sentido de movimento de deslizamento planar e tombamento flexural de rocha; em destaque, o número de habitantes por bairro, evidenciando em proporcionalidade o número de pessoas que podem sofrer os efeitos desses mecanismos de ruptura na cidade de Salvador em relação aos demais bairros; (B) destaque do quadro vermelho da Figura 17A.

CONCLUSÕES

Os resultados da modelagem permitiram identificar o efeito das famílias de descontinuidades pertencentes à formação da BR na modelagem cinemática aplicada ao STF, sugerindo a possibilidade de deflagrar movimentos de massas em taludes rochosos na cidade de Salvador. O resultado dessa modelagem mostra a importância de estudos nas regiões de encostas no perímetro urbano de Salvador com direções e mergulhos correlatos, pois sugerem a possibilidade de ocorrência de movimentos de massa, mesmo em situações mais estáveis com ângulos de atrito maiores.

Os modelos mostram ainda que ocorre mais facilmente o mecanismo de ruptura por deslizamento em cunha dos

taludes, sendo suficiente apenas uma inclinação de 40° , sendo este seguido pelo mecanismo do tombamento flexural com inclinação de 50° e, por último, o de deslizamento planar em taludes com inclinação de 70° .

A modelagem cinemática com diferentes ângulos de atrito demonstrou que o tombamento flexural de rocha é suscetível a mudanças, possibilitando eventos de risco em taludes com inclinação de 40° e em situações de ângulos de atrito de 18° e 60° , e a partir de 30° . No mecanismo de deslizamento planar não houve diferença, porém no de deslizamento em cunha, além de a instabilidade dos taludes aumentar para situações com apenas 30° de inclinação, houve um grande aumento de estruturas instáveis, mesmo para inclinações menores.

As famílias de descontinuidades mais suscetíveis aos processos de ruptura mecânica têm as seguintes orientações: $N090^\circ/70^\circ N$, $N090^\circ/70^\circ S$, $N120^\circ/70^\circ NE$ e $N120^\circ/70^\circ SW$. Na comparação entre os dois sistemas de falhas ficou evidente que o SFBR apresentou o maior número de taludes instáveis (13), quase todos eles com sentido de movimento de massa para sudoeste.

Por fim, este trabalho visa subsidiar a Prefeitura da cidade de Salvador e os órgãos governamentais e municipais que se ocupam das áreas risco, como a defesa civil, entre outros, bem como servir de base para orientar mapeamentos geológico e geotécnico de mais detalhe, os quais permitam classificar as áreas de risco em várias categorias (baixo, médio, alto e muito alto risco), a exemplo do que tem sido feito em outras áreas urbanas do país, podendo assim fazer o monitoramento das áreas mais críticas e recomendar ações que possam mitigar os potenciais riscos para a população.

AGRADECIMENTOS

O presente artigo foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de financiamento 001. Contou também 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 os revisores anônimos da revista *Geologia USP. Série Científica* que, com muito profissionalismo, contribuíram significativamente para a melhoria do nosso manuscrito.

REFERÊNCIAS

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>
- Bitar, O. Y., Ortega, R. D. (1998). Gestão Ambiental. In: Oliveira, A. M. S., Brito, S. N. A. (org.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, p. 499-508.
- Chiossi, N. (2013). Uso das rochas e dos solos como material de construção e material industrial. In: Chiossi, N. *Geologia de Engenharia*. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, p. 71-80.
- Corrêa-Gomes, L. C. (2018). Sistemas de Falhas de Salvador. *Seminário de Geologia de Salvador*. Salvador: IGEO-UFBA, p. 69.
- Côrrea-Gomes, L. C., Destro, N. (2012). Tectônica das bacias Paleozoicas e Mesozoicas. In: Barbosa, J. S. F. (org.). *Geologia da Bahia, pesquisa e atualização*. Salvador: CBPM, p. 255-325. (Série Publicações Especiais, 13).
- Corrêa-Gomes, L. C., Oliveira, M. A. F., Motta, A. C., Cruz, M. J. M. (1996). *Províncias dos diques máficos do Estado da Bahia*. Mapa, evolução temporal e estágio atual do conhecimento. Salvador: Governo do Estado da Bahia, Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração, Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, 144 p.
- Destro, N., Alckimin, F. F., Magnativa, L. P., Peter, S. (2003). The Jeremoabo transpressional transfer fault, Recôncavo-Tucano Rift, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, 25(8), 1263-1279. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00164-5](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00164-5)
- Gerscovich, D. M. S. (2012). *Estabilidade de taludes*. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Glastonbury, J., Fell, R. (2000). *Report on the Analysis of "Rapid" Natural Rock Slope Failures*. Sydney: University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering.
- Goodman, R. E. (1980). *Introduction to Rock Mechanics*. Toronto: John Wiley.
- Guimarães, T., Vale, R. M. C. (2012). Suscetibilidade a erosão do solo na cidade do Salvador – Bahia. *IX Simpósio Nacional de Geomorfologia*. Rio de Janeiro: SINAGEO.
- Hoek, E., Bray, J. (1981). *Rock Slope Engineering*. 3. ed. Londres: Institution of Mining and Metallurgie & Elsevier Applied Science.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018a). Diretoria de Pesquisas. Coordenação de População e Indicadores Sociais. *Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2018*. IBGE. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2018/estimativa_dou_2018_20181019.pdf. Acesso em: 12 out. 2020.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018b). *População em áreas de risco no Brasil*. IBGE. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101589.pdf>. Acesso em: 12 out. 2020.
- 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*. Salvador: ABMS, 1, p. 17-25.
- Menezes, L. S. (2021). *Modelagem cinemática dos sistemas de Falhas e aplicação em casos de taludes naturais N030° e N040° da cidade do Salvador, Bahia, Brasil*. Dissertação (Mestrado). Salvador: Universidade Federal da Bahia.
- Milani, E. J. (1989). Falhamentos transversais em bacias distensionais. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 3(1-2), 29-41.
- Milani, E. J., Davison, I. (1988). Basement control and transfer tectonics in the Recôncavo-Tucano-Jatobá rift, Northeast Brazil. *Tectonophysics*, 154(1-2), 41-70. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(88\)90227-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90227-2)
- Milhomem, P. S., Milani, E. J., Oliveira, F. M., Carvalho, M. S. S., Souza-Lima, W. (2003). *Bacia do Recôncavo*. Fundação Paleontológica Phoenix. (Bacias Sedimentares Brasileiras, 49.)
- Salvador (1996). *Lei nº 9.148/2016*. Lei de Ordenamento do Uso e Ocupação do Solo (LOUOS). Dispõe sobre o Ordenamento do Uso e da Ocupação do Solo do Município de Salvador e dá outras providências. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/ba/s/salvador/lei-ordinaria/2016/915/9148/lei-ordinaria-n-9148-2016-dispoe-sobre-o-ordenamento-do-uso-e-da-ocupacao-do-solo-do-municipio-de-salvador-e-da-outras-providencias>. Acesso em: 21 nov. 2022.
- 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.

- Silva, L. C., Delgado, I. M., Souza, J. D., Rodriguez, J. B. (2005). Da cratonização riaciana a metacratonização ediacariana nos paleocontinentes São Francisco-Congo. Parte II: Bahia. *III Simpósio Sobre o Cráton do São Francisco. Short Papers...* Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 255-258.
- Souza, J. S. (2013). *Geologia, metamorfismo e geocronologia de litotipos de Salvador-Bahia*. Tese (Doutorado). Salvador: Universidade Federal da Bahia.
- Souza, J. S., Barbosa, J. S. F., Corrêa-Gomes, L. C. (2010). Litogeoquímica dos granulitos ortoderivados da cidade do Salvador, Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, 40(3), 339-353. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2010403339354>
- Souza, K. H. L., Aguiar, M. F. P., Rodrigues, L. F. V., Mendes, G. C. M. (2019). Proposta de Contenção de Talude em Solo Grampeado Localizado na Falha de Salvador – BA. *IX Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia*. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/59181>. Acesso em: 21 nov. 2022.
- Wyllie, D. C., Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. 4. ed. Nova York: Spon Press.
- Vaz, L. F. (1996). Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. *Solos e Rochas*, 19(2), 177-136. Disponível em: http://www.fec.unicamp.br/~persio/ic570/Vaz_1996.pdf. Acesso em: 21 nov. 2022.