



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA MARINHA, COSTEIRA E SEDIMENTAR

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

MODELAGEM CINEMÁTICA DE SISTEMAS DE FALHAS E
APLICAÇÃO EM CASOS DE TALUDES NATURAIS N 030° E
N 040° DA CIDADE DO SALVADOR, BAHIA, BRASIL

LUCAS DE SANTANA MENEZES

SALVADOR

2021

**MODELAGEM CINEMÁTICA DOS SISTEMAS DE FALHAS
E APLICAÇÃO EM CASOS DE TALUDES NATURAIS N 030°
E N 040° DA CIDADE DO SALVADOR, BAHIA, BRASIL**

LUCAS DE SANTANA MENEZES

Orientador: Prof. Dr. Luiz César Corrêa Gomes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar.

SALVADOR

2021

M543 Menezes, Lucas de Santana

Modelagem cinemática dos sistemas de falhas e aplicação em casos de taludes naturais n 030° e n 040° da cidade do Salvador, Bahia, Brasil/ Lucas de Santana Menezes. – Salvador, 2021.

37 f.

Orientador: Prof. Dr. Luiz César Corrêa Gomes

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências, 2021.

1. Geologia. 2. Geologia Marinha. 3. Taludes. I. Gomes, Luiz César Corrêa. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

CDU 551

LUCAS DE SANTANA MENEZES

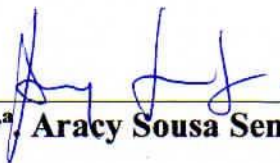
**MODELAGEM CINEMÁTICA DOS SISTEMAS DE FALHAS E
APLICAÇÃO EM CASOS DE TALUDES NATURAIS N 030° E N 040° DA
CIDADE DO SALVADOR, BAHIA, BRASIL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar, em 06/07/2021.

DISSERTAÇÃO APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:



Dr. Luiz César Corrêa Gomes (Orientador) - UFBA



Dr.ª Aracy Sousa Senra - UFS



Dr. Carlson de Matos Maia Leite - UFBA

SALVADOR

2021

*Dedico este trabalho aos brasileiros
vitimados pela pandemia de Covid-19.*

*“Acreditar na existência dourada do sol
Mesmo que em plena boca
Nos bata o açoite contínuo da noite.”
(O cavaleiro e os moinhos – Aldir Blanc
e João Bosco)*

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da CAPES - Código de financiamento 001.

Agradeço este trabalho ao Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia pela oportunidade obter o título de mestrado e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pelo financiamento do projeto por meio do Programa de Bolsas, sob o Termo de Outorga BOL0344/2019.

Agradeço também às pessoas que contribuíram comigo ao longo desse trabalho.

Aos meus pais, Valmir e Luiza, por desde cedo colocar a educação como prioridade para o meu crescimento como ser humano.

Aos meus irmãos, Vagner, Walter, Vanessa, Marcos, Samuel, Mateus e Emanuel, meu time, por derrubar diversas barreiras em meu caminho para que eu pudesse chegar ao meu melhor.

À minha noiva, Barbara, que me acolheu nos piores momentos e celebrou comigo nos melhores que eu já tive na vida.

Ao meu orientador, o professor Dr. Luiz César Corrêa Gomes e aos amigos do Laboratório de Modelagem Física (LAMOD) e o grupo de geotecnia do IGEO pelo aprendizado compartilhado e pelo companheirismo.

Por fim, agradeço aos professores Dr^a. Aracy S. Senra e Dr. Carlson M. M. Leite por aceitar o convite para participar desta banca examinadora e auxiliar na revisão deste trabalho.

RESUMO

O processo desordenado de ocupação urbana em uma região de variação topográfica acentuada transformou 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 N 030° e N 040°, respectivamente relacionados com o Sistema de Falhas de Salvador (SFS) e Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI), e as principais estruturas rúpteis presentes na região, de direções N 000°, N 010°, N 030°, N 040°, N 090°, N 120° e N 160°, segundo referencial bibliográfico. 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 flexural. A divulgação destes dados permite tanto ao poder público quanto aos responsáveis técnicos por empreendimentos locais estabelecerem um diagnóstico geotécnico mais acurado a respeito da estabilidade de taludes e 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 Salvador into the Brazilian city with the largest number of people inhabiting areas with high susceptibility for natural disasters. Simultaneously, there is a lack of geotechnical studies about the correlation between Salvador's substrate and its possible interference towards the deflagration of slope failures. This study was based on the kinematic modelling with equal area stereographic projection (Schmidt-Lambert). Natural slopes N 030° and N 040° related to the Sistema de Falhas de Salvador (SFS) e Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI) were considered as parameters, as well as the fault systems at directions N 000°, N 010°, N 030°, N 040°, N 090°, N 120° e N 160°, according to literature. in the majoritory of slope data from Salvador and fault systems from Reconcavo Basin. 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 cross sections across Salvador's contour map. The case study describes six locations in Salvador where wedge failure hazards are dectected and one location where the hazard is related to the flexural 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 with less risk of social and material damages.

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

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL.....	9
CAPÍTULO 2 – ARTIGO 1: MODELAGEM CINEMÁTICA DOS SISTEMAS DE FALHAS E APLICAÇÃO EM CASOS DE TALUDES NATURAIS N 030° E N 040° DA CIDADE DO SALVADOR, BAHIA, BRASIL.....	11
CAPÍTULO 3 – CONCLUSÕES.....	30
APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS AUTORES NO ARTIGO.....	31
ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA.....	32
ANEXO B – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO À REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DA USP.....	37

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

A cidade de Salvador, capital do estado da Bahia e metrópole brasileira densamente urbanizada, convive com os problemas associados à estabilidade de taludes ao longo de toda sua história. O crescimento populacional acelerado e a ocupação de áreas com declividade acentuada posicionam Salvador entre as cidades brasileiras com maior número de pessoas ocupando áreas de riscos de desastres naturais (IBGE, 2018). A topografia da cidade de Salvador (Figura 1) é subdividida em três principais domínios: (i) a região da Cidade Baixa, limitada a leste pela escarpa do Sistema de Falhas de Salvador (SFS), de direção N 030°, e a oeste pela Baía de Todos os Santos; (ii) a região da Cidade Alta ou Alto de Salvador (Barbosa et al., 2005), uma feição geológica do tipo *horst* com altitudes superiores a 60 metros, localizada a leste da escarpa do SFS; (iii) e a região costeira atlântica, localizada no limite leste do Alto de Salvador marcado pelo Sistema de Falhas do Iguatemi, de direção N 040°.

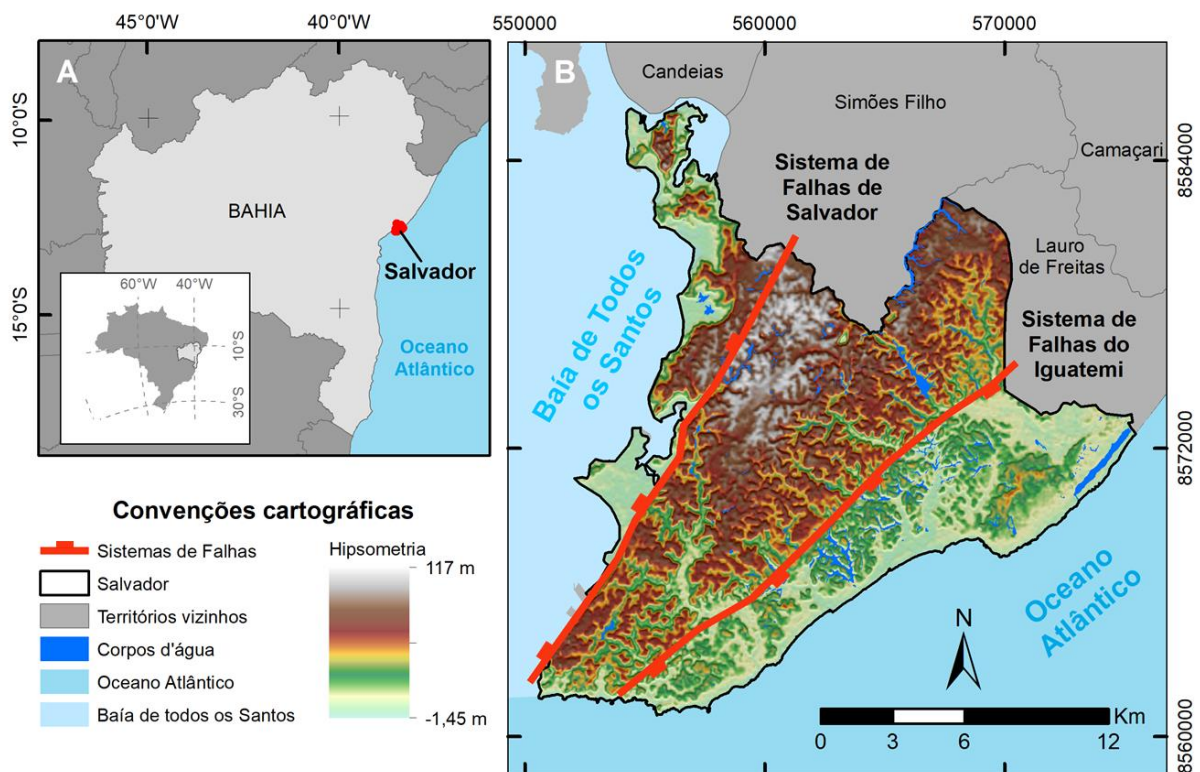


Figura 1: A) Mapa de localização da cidade de Salvador. B) Mapa hipsométrico da cidade de Salvador gerado a partir de dados geomorfométricos do Topodata, evidenciando a localização do Sistema de Falhas de Salvador e do Sistema de Falhas do Iguatemi que delimitam os três domínios topográficos da cidade de Salvador.

As estruturas geológicas são importantes parâmetros para avaliar o comportamento dos movimentos de massa, tanto em taludes naturais como em projetos de geotecnia. O mecanismo controlador do movimento de massa gerado a partir da instabilização pode ser definido tanto pela cinemática das estruturas, como pelos tensores envolvidos, processos geomorfológicos, e pela composição das rochas (Glastonbury e Fell, 2000). Desse modo, a orientação das estruturas presentes pode contribuir de modo determinante para o processo de instabilização (Stead e Wolter, 2015). O método de análise cinemática (Hoek e Bray, 1981; Wyllie e Mah, 2004)

permite a classificação do tipo de mecanismo de ruptura a partir da análise das estruturas geológicas em redes estereográficas. Dentre os diversos fatores que condicionam os movimentos de massa, pouco se sabe sobre a influência das estruturas geológicas locais nos mecanismos de ruptura dos taludes de Salvador. No entanto, um levantamento sistemático na Bacia do Recôncavo (Corrêa-Gomes e Destro, 2012; Silva, 2013), obteve que as principais estruturas rúpteis seguem um modelo de rifteamento em horst e grabén, com direções N 000°, N 010°, N 030°, N 040°, N 090°, N 120° e N 160° e mergulho de aproximadamente 70° para sentidos opostos.

Por conseguinte, o presente estudo tem por objetivo 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, busca-se identificar as características geométricas dos taludes relacionados com os sistemas de falhas longitudinais (N 030° e N 040°) presentes na área de estudo e analisar os possíveis mecanismos de ruptura de taludes associados às estruturas rúpteis presentes na região.

Este trabalho poderá servir como ferramenta para subsidiar a tomada de decisões da gestão municipal, desde a identificação de áreas prioritárias para execução de ações preventivas ou como para embasar projetos de infraestrutura urbana e de habitação na cidade de Salvador.

Os resultados deste estudo serão apresentados sob forma de artigo no Capítulo 2 deste volume, o qual será submetido ao processo de avaliação por pares na revista *Geologia USP Série Científica* (ISSN 2316-9095) para sua eventual publicação.

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 – Suplemento), 9–22.
- Côrrea-Gomes, L.C., Destro, N. (2012). Tectônica das bacias Paleozóicas e Mesozóicas. In: J.S.F. Barbosa, (Ed.), *Geologia da Bahia, pesquisa e atualização*, 255-325. Salvador: CBPM. (Série Publicações Especiais, 13).
- Glastonbury, J., Fell, R. (2000). *Report on the Analysis of “Rapid” Natural Rock Slope Failures*. Sydney: School of Civil and Environmental Engineering. (Uniciv Report, R-390).
- Hoek, E., Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering* (3rd Ed.). London: Institution of Mining & Metallurgy.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018). *População em áreas de risco no Brasil*. Rio de Janeiro: Coordenação de Geografia – IBGE.
- Silva, I. C. (2013). *Evolução Dinâmica do Sistema de Bacias Tipo Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá com Base em Dados de Campo*. Tese (Doutorado). Salvador: Instituto de Geociências – UFBA.
- 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.
- Wyllie, D.C., Mah, C.W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining* (4th ed.). New York: Spon Press.

CAPÍTULO 2

**ARTIGO 1: MODELAGEM CINEMÁTICA DOS SISTEMAS
DE FALHAS E APLICAÇÃO EM CASOS DE TALUDES
NATURAIS N 030° E N 040° DA CIDADE DO SALVADOR,
BAHIA, BRASIL**

Modelagem cinemática dos sistemas de falhas e aplicação em casos de taludes naturais N 030° e N 040° da cidade do Salvador, Bahia, Brasil

Kinematics modelling of the faults systems and application in cases of N 030° and N 040° natural slopes in Salvador, Bahia, Brazil.

Falhas e estabilidade de taludes em Salvador/BR

LUCAS DE SANTANA MENEZES¹; LUIZ CÉSAR CORRÊA-GOMES²

Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia – UFBA, Rua Barão de Jeremoabo, s/n, Ondina, CEP 40170-290, Salvador, BA, BR. (79 98819-7658; lsantana.geologo@gmail.com; lccgomes@gmail.com)

Número de palavras: 5626

Total de figuras: 10

Total de tabelas: 3

RESUMO - O processo desordenado de ocupação urbana em uma região de variação topográfica acentuada transformou 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 N 030° e N 040°, respectivamente relacionados com o Sistema de Falhas de Salvador (SFS) e Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI), e as principais estruturas rúpteis presentes na região, de direções N 000°, N 010°, N 030°, N 040°, N 090°, N 120° e N 160°, segundo referencial bibliográfico. 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 flexural. A divulgação destes dados permite tanto ao poder público quanto aos responsáveis técnicos por empreendimentos locais estabelecerem um diagnóstico geotécnico mais acurado a respeito da estabilidade de taludes e 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 Salvador into the Brazilian city with the largest number of people inhabiting areas with high susceptibility for natural disasters. Simultaneously, there is a lack of geotechnical studies about the correlation between Salvador's substrate and its possible interference towards the deflagration of slope failures. This study was based on the kinematic modelling with equal area stereographic projection (Schmidt-Lambert). Natural slopes N 030° and N 040° related to the Sistema de Falhas de Salvador (SFS) e Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI) were considered as parameters, as well as the fault systems at directions N 000°, N 010°, N 030°, N 040°, N 090°, N 120° e N 160°, according to literature. In the majority of slope data from Salvador and fault systems from Reconcavo Basin. 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 cross sections across Salvador's contour map. The case study describes six locations in Salvador where wedge failure hazards are detected and one location where the hazard is related to the flexural 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 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 de Salvador, metrópole brasileira densamente urbanizada, convive com os problemas associados à estabilidade de taludes ao longo de toda sua história. O crescimento populacional acelerado e a ocupação de áreas com declividade acentuada posicionam Salvador entre as cidades brasileiras com maior número de pessoas ocupando áreas de riscos de desastres naturais (IBGE, 2018). A topografia da cidade de Salvador é subdivida por três principais domínios: Cidade Baixa, Cidade Alta/Alto de Salvador e região costeira atlântica. Estes domínios são, por sua vez, limitados pelo Sistema de Falhas de Salvador (SFS), de direção N 030° e pelo Sistema de Falhas do Iguatemi, de direção N 040°.

As estruturas geológicas são importantes parâmetros para avaliar o comportamento dos movimentos de massa, tanto em taludes naturais como em projetos de geotecnia. O mecanismo controlador do movimento de massa gerado a partir da instabilização pode ser definido pela cinemática das estruturas, bem como pelos tensores envolvidos, processos geomorfológicos, e pela composição das rochas (Glastonbury e Fell, 2000). A orientação das estruturas presentes pode contribuir de modo determinante para o processo de instabilização (Stead e Wolter, 2015). O método de análise cinemática (Hoek e Bray, 1981; Wyllie e Mah, 2004) permite a classificação do tipo de mecanismo de ruptura a partir da análise das estruturas geológicas em redes estereográficas. Dentre os diversos fatores que condicionam os movimentos de massa, pouco se sabe sobre a influência das estruturas geológicas locais nos mecanismos de ruptura dos taludes de Salvador. Entretanto, diversos estudos na Bacia do Recôncavo chegaram à identificação de estruturas rúpteis seguindo um modelo de rifteamento em *horst* e *grabén*. É de se esperar que tanto a tectônica da Bacia do Recôncavo quanto as demais estruturas relacionadas com abertura do oceano Atlântico Sul afetem substancialmente o substrato rochoso da cidade de Salvador e os mecanismos de ruptura associados com movimentos gravitacionais.

O presente estudo tem por objetivo 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, busca-se identificar as características geométricas dos taludes relacionados com os sistemas de falhas longitudinais (N 030° e N 040°) presentes na área de estudo e analisar os possíveis mecanismos de ruptura de taludes associados às estruturas rúpteis presentes na região.

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

CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO

A cidade de Salvador está localizada na porção centro-leste da Bahia, limitada a norte e nordeste pelos municípios de Simões Filho e Lauro de Freitas, a oeste pela Baía de Todos os Santos e a leste e sul pelo oceano Atlântico. A cidade se encontra instalada sobre um substrato composto por três domínios geológicos (Figura 2.A): (i) Um domínio composto rochas neoarqueanas e paleoproterozoicas de fácies granulito representantes do Cinturão Salvador-Esplanada-Boquim (Barbosa e Dominguez, 1996; Oliveira, 2014); (ii) o domínio de rochas sedimentares mesozoicas da Bacia do Recôncavo, que compõe o sistema rifte intracontinental Recôncavo-Tucano-Jatobá, formado durante a abertura do oceano Atlântico Sul; e (iii) o domínio formado pelos depósitos sedimentares cenozoicos referentes à Formação Barreiras e de sedimentação costeira e aluvionar do Quaternário (Arai, 2005).

Ademais, a topografia da cidade de Salvador também é subdivida em três principais domínios (Figura 2.B). A região da Cidade Baixa (I), limitada a leste pela escarpa do Sistema

de Falhas de Salvador (SFS), de direção N 030°, e a oeste pela Baía de Todos os Santos, apresenta altitudes inferiores a 10 metros e onde afloram 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 uma estrutura do tipo *horst* com altitudes superiores a 60 metros é basicamente constituída por rochas metamórficas paraderivadas e ortoderivadas em fácies granulito e solos residuais. O Alto de Salvador é subdividido pela zona rúptil de direção N 040° denominada Sistema de Falhas do Iguatemi. A porção localizada a leste desta zona rúptil é denominada como região costeira atlântica (III). A topografia desta região é composta por altitudes inferiores a 30 metros e é marcada por uma maior exposição de coberturas sedimentares cenozoicas.

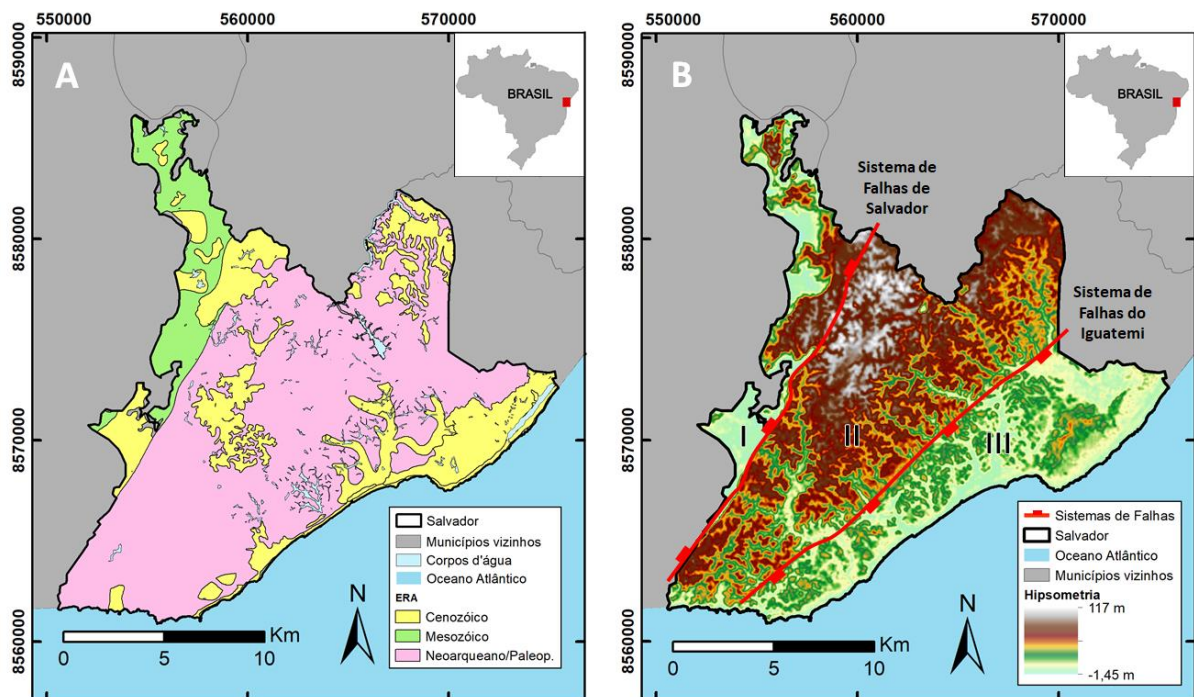


Figura 2: A) Mapa geológico simplificado da cidade de Salvador (adaptado de CPRM, 2015). B) Mapa hipsométrico com representação gráfica do traçado principal dos Sistemas de Falhas de Salvador (SFS) e do Iguatemi (SFI), com domínios geomorfológicos da Cidade Baixa, Cidade Alta e Região Costeira Atlântica assinalados com I, II e III, respectivamente.

A região de Salvador apresenta litotipos amplamente deformados de modo polifásico, tanto no estágio dúctil como 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 neoformadas, de modo a desenharem o arcabouço tectônico das bacias rifte da margem atlântica brasileira. (Magnavita, 1992; Corrêa-Gomes e Destro, 2012).

A Bacia do Recôncavo, a porção mais meridional do aulacógeno que deu origem ao Sistema de Bacias Recôncavo-Tucano-Jatobá, formou-se durante a ruptura do paleocontinente Gondwana Ocidental e abertura do Oceano Atlântico Sul no Eocretáceo da Era Mesozoica. A geometria do arcabouço estrutural da Bacia do Recôncavo definida como um meio-gráben limitado por um vasto conjunto de falhas normais, sintéticas e antitéticas e pelas falhas transversais com diversas orientações principais. As falhas transversais podem estar relacionadas a falhas de alívio, com cinemática predominantemente normal, além de falhas de

transferência, com marcadores indicando variação entre cinemática normal-transcorrente e transcorrente-normal (Destro et al., 2003; Magnavita et al., 2005).

A partir de levantamento sistemático feito pelos projetos Rifte Bahia I e II no Sistema de Bacias tipo Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá (Corrêa-Gomes e Destro, 2012; Silva, 2013), foram obtidas 33704 atitudes de falhas e fraturas em 112 afloramentos da Bacia do Recôncavo e do seu embasamento proximal (Figura 3). As principais estruturas rúpteis foram caracterizadas com direções (*strike*) N 000°, N 010°, N 030°, N 040°, N 090°, N 120° e N 160° e mergulho de aproximadamente 70° para sentidos opostos (segundo o modelo de rifteamento em *horst* e *grabén*).

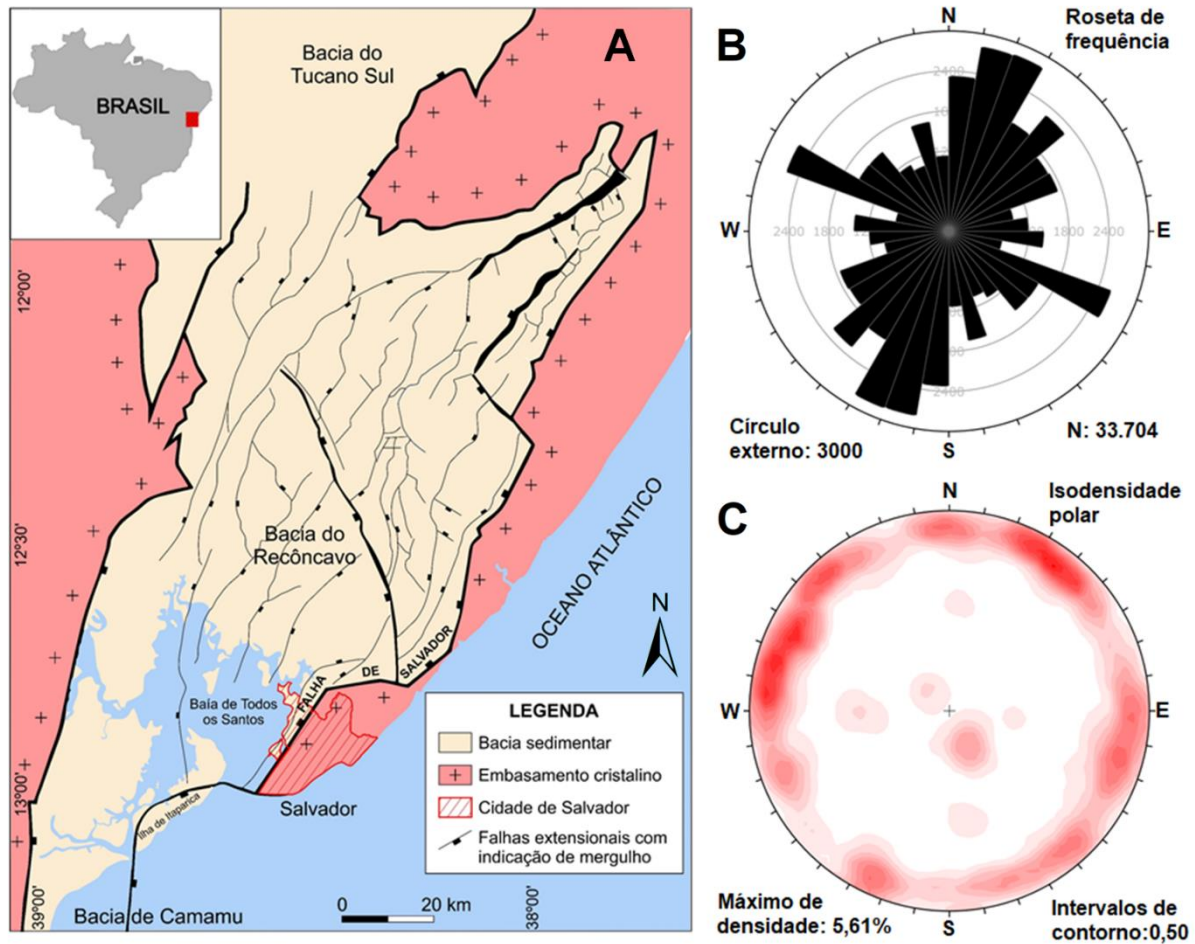


Figura 3: A) Mapa do arcabouço estrutural simplificado da Bacia do Recôncavo (Adaptado de Aragão e Peraro, 1994). B) Roseta de frequência das estruturas rúpteis da Bacia obtidas em mapeamento de 112 afloramentos ao longo da bacia e suas margens. C) Representação de isodensidade polar das estruturas rúpteis descritas na região da Bacia do Recôncavo. Adaptado de Corrêa-Gomes e Destro (2012) e Silva (2013).

PARÂMETROS GEOMECÂNICOS EM SALVADOR

As rochas metamórficas de fácies granulito do Cinturão Salvador-Esplanada-Boquim, devido a 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 de 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 $29,32^\circ$ 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 das mecânicas 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 deve ser tratado sob o ponto de vista da mecânica das rochas (Mello, 1972). As heterogeneidades dos solos residuais presentes na cidade de Salvador podem dificultar a obtenção de parâmetros realísticos que possam ser utilizados na prática (Figura 4). 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 obtidos os estudos sobre os solos residuais.

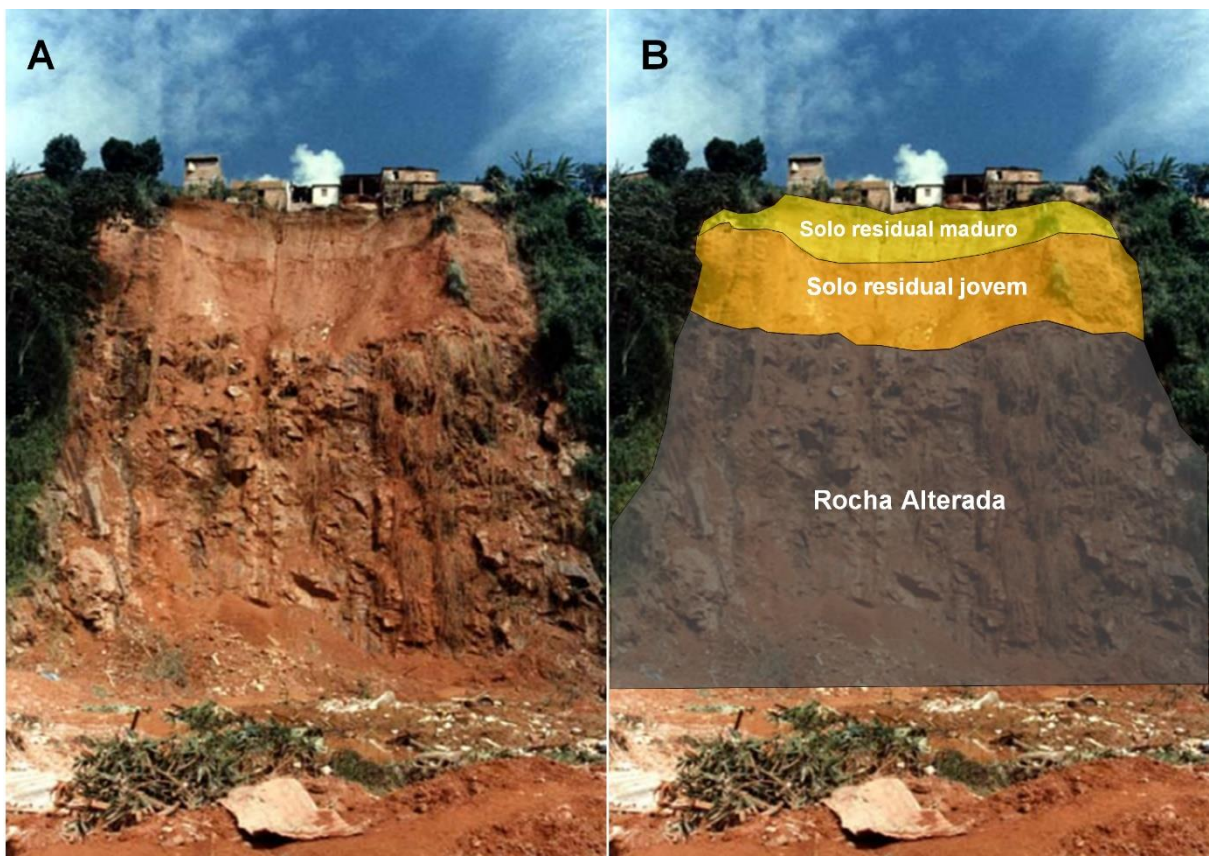


Figura 4: A) Exemplo de talude localizado no bairro São Gonçalo do Retiro, em Salvador. B) Interpretação de seção vertical evidenciando a expressiva heterogeneidade no perfil de alteração, a qual pode comprometer análises de estabilidade realizadas sob o ponto de vista da mecânica de solos. Adaptada de Silva (2005).

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 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 de movimentos de massa foram classificados segundo os mecanismos de ruptura de escorregamento planar, tombamento flexural e escorregamento em cunha (Figura 5). Nas análises dos mecanismos de escorregamento planar e tombamento flexural considerou-se os ângulos de 20° e 10°, 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).

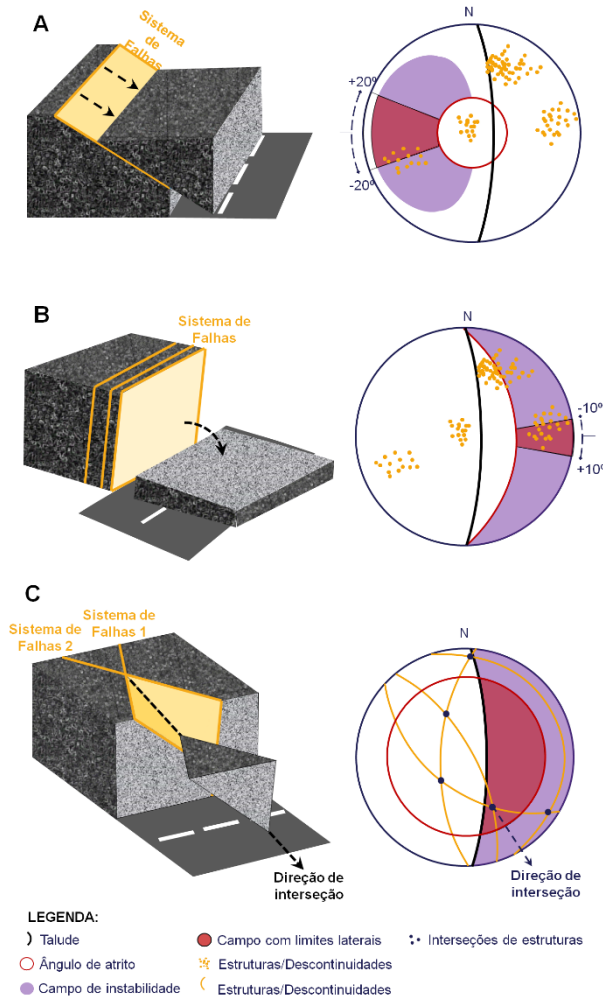


Figura 5: Tipos de mecanismos de ruptura de taludes rochosos e suas representações em rede estereográfica. A) Mecanismo de ruptura por escorregamento planar e campo de instabilidade formado na face côncava do grande círculo do talude, com limite lateral de 20° em relação à direção de mergulho do talude. B) Mecanismo de ruptura por tombamento flexural 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 lineação de interseção representar risco. Adaptado de Wyllie e Mah, 2004.

Os taludes submetidos a esta análise de estabilidade apresentam como parâmetros (Tabela 1) atitudes N 030° e N 040° com mergulhos variando de 0° a 90° , e estão relacionados com as atitudes dos principais sistemas longitudinais presentes em Salvador: Sistema de Falhas de Salvador (SFS) e Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI), respectivamente. As estruturas ou descontinuidades empregadas na modelagem cinemática correspondem às falhas de atitude N 000° , N 010° , N 030° , N 040° , N 090° , N 120° e N 160° com mergulho de 70° para sentidos opostos. Tais estruturas compõem às atitudes gerais dos sistemas de falhas da Bacia do Recôncavo presentes em Salvador, de acordo com levantamento feito pelos projetos Rife Bahia I e II (Corrêa-Gomes e Destro, 2012; Silva, 2013). Já os ângulos de atrito incorporados na modelagem cinemática, com valores de 30° , 32° , 34° e 36° , correspondem a variação de ângulo de atrito identificada em Salvador a partir dos estudos de Jesus et al. (2005) e Jesus (2008).

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

Parâmetros	Configuração	Referências
Mecanismos de ruptura	Escorregamento planar (limite lateral de 20°), Tombamento flexural (limite lateral de 10°) e Escorregamento em cunha	Hoek e Bray (1981); Wyllie e Mah (2004)
Direção de taludes	N 030° e N 040°	Barbosa et al. (2005)
Ângulo de mergulho dos taludes	0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80° e 90°	-
Estruturas ou descontinuidades	N 000°, N010°, N030°, N040°, N090°, N120°, N160°, N 180°, N 190°, N 210°, N 220°, N 270°, N 300° e N 340°	Corrêa-Gomes e Destro (2012); Silva (2013)
Ângulo de mergulho das estruturas	70°	Corrêa-Gomes e Destro (2012); Silva (2013)
Ângulos de atrito analisados	30°, 32°, 34° e 36°	Jesus et al. (2005); Jesus (2008)
Rede estereográfica	Igual-área ou Schmidt-Lambert	Hoek e Bray (1981); Wyllie e Mah (2004)

Estudo de caso

A segunda etapa do método empregado deu-se através da aplicação dos resultados da modelagem cinemática em 67 taludes, sendo 33 taludes próximos ao Sistema de Falhas de Salvador e 34 taludes próximos ao Sistema de Falha de Iguatemi. Para a identificação dos taludes foi realizada a delimitação dos principais lineamentos morfoestruturais da cidade de 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 altitude de 45° e fator de correção de altitude (fator Z) foi de 0,000912, recomendado para a faixa de latitude de Salvador, e 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. Consecutivamente, para a análise do Sistema de Falhas de Salvador (SFS) e do Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI), foi aplicada uma filtragem dos traçados de lineamentos morfoestruturais com distância de até um quilometro do traço principal desses Sistemas de Falhas que delimitam as regiões de Salvador. A filtragem de lineamentos permitiu a identificação das características geométricas, de direção e mergulho, dos 67 taludes ao longo dos Sistemas de Falhas de Salvador (SFS) e do Iguatemi (SFI). Estas características foram obtidas por meio de seções transversais aos taludes em curvas de nível com intervalo de um metro cedida pela Companhia de Desenvolvimento Urbana 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.

RESULTADOS

Modelagem cinemática: Escorregamento planar

A análise de ruptura por escorregamento planar (Figura 6) 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 aumenta-se de 70° para 80° de inclinação da face do talude, sendo este aumento maior nos taludes de direção N 030° frente

aos taludes de direção N 040°. No entanto, não observa-se influência do ângulo de atrito do material rochoso dentro do intervalo modelado na possibilidade de ocorrência de ruptura.

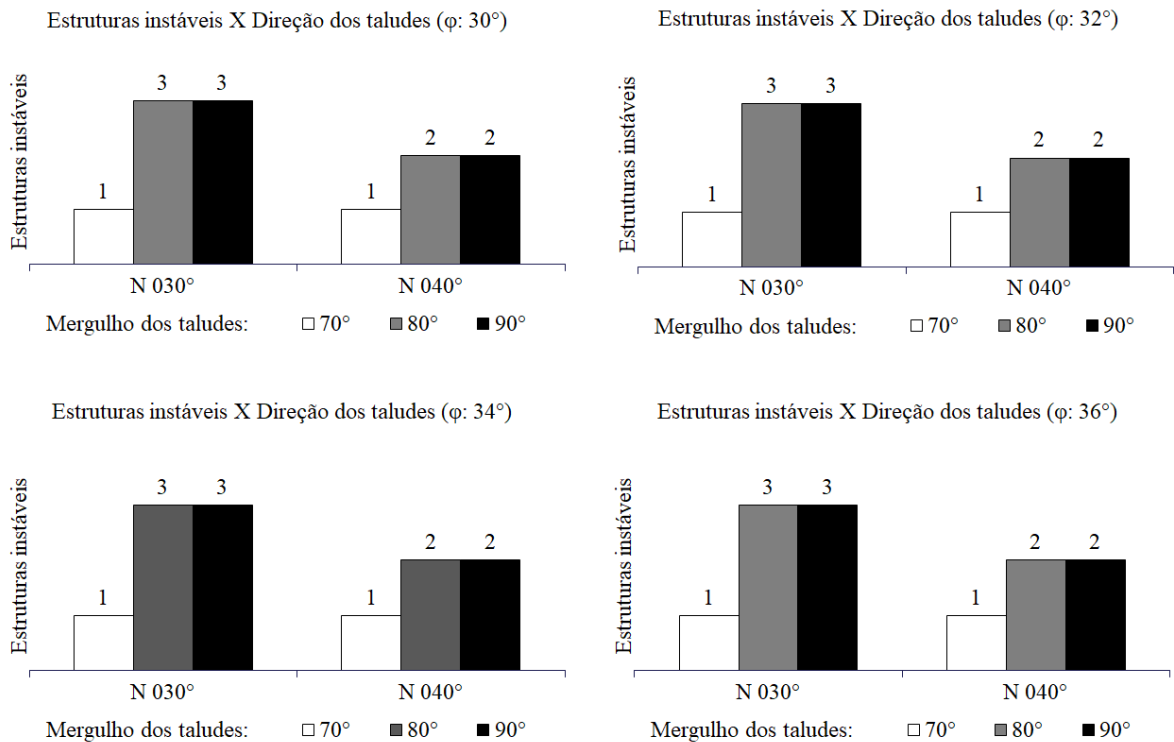


Figura 6: Histogramas de estruturas instáveis presentes nos diferentes taludes analisados de acordo com o ângulo de atrito modelado na análise cinemática. Os histogramas evidenciam a ausência de interferência do ângulo de atrito na elevação do risco de escorregamento planar nas situações analisadas.

Modelagem cinemática: Tombamento flexural

Na análise de ruptura por tombamento flexural (Figura 7), observou-se a possibilidade de movimento de massa em taludes com inclinação a partir de 50°, em material rochoso com 30° de ângulo de atrito. O aumento do ângulo de atrito possibilita taludes com 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 inalterado e o aumento do ângulo de atrito do material, dentro do intervalo observado, não influencia na redução do risco. Não foram observadas distinções na quantidade de estruturas instáveis entre os taludes de direção N 030° e N 040°.

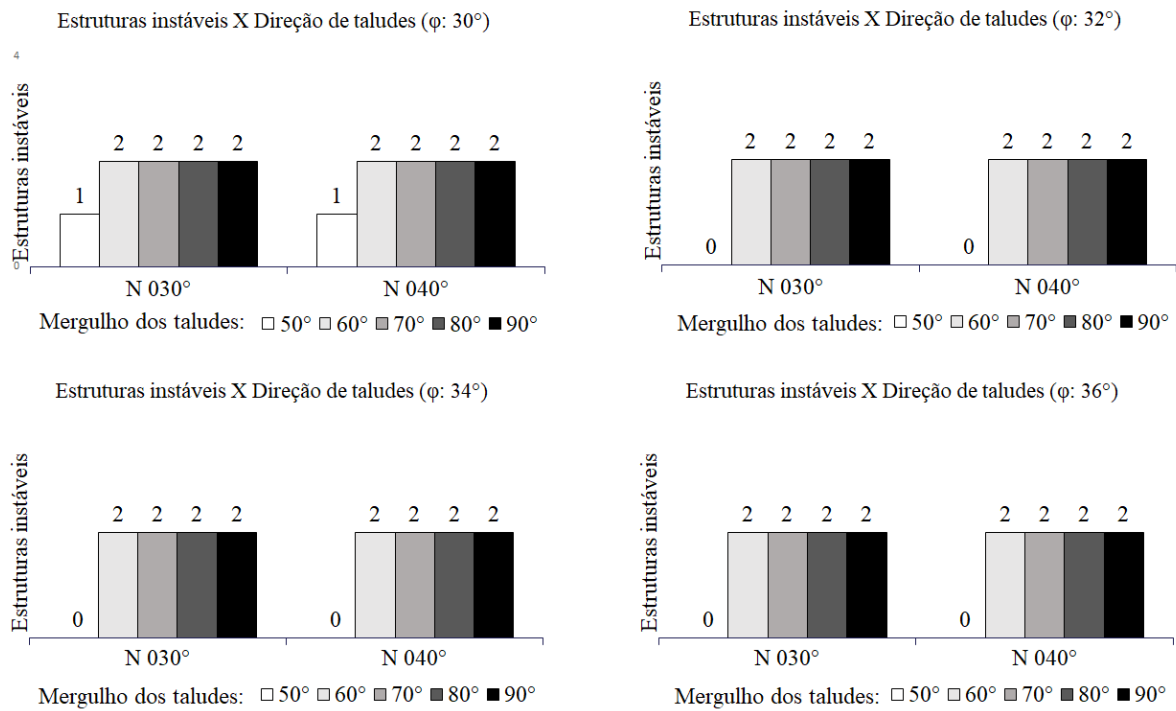


Figura 7: Histogramas de estruturas instáveis presentes nos diferentes taludes analisados de acordo com o ângulo de atrito modelado na análise cinemática. A partir dos histogramas é possível identificar a interferência do ângulo de atrito no risco de tombamento flexural de blocos em taludes de 50° de mergulho.

Modelagem cinemática: Escorregamento em cunha

Na análise de ruptura por escorregamento em cunha (Figura 8), é observado que risco de movimento de massa pode ocorrer em taludes com inclinação igual ou maior que 40°. Para além disto, a elevação do ângulo de inclinação do talude produz acréscimo no número de estruturas instáveis em todas as situações modeladas. Comparativamente, a análise dos taludes de direção N 030° e N 040° revela que a direção destes taludes influencia no número de estruturas instáveis. No entanto, esta influência varia de acordo com o ângulo de inclinação dos taludes comparados.

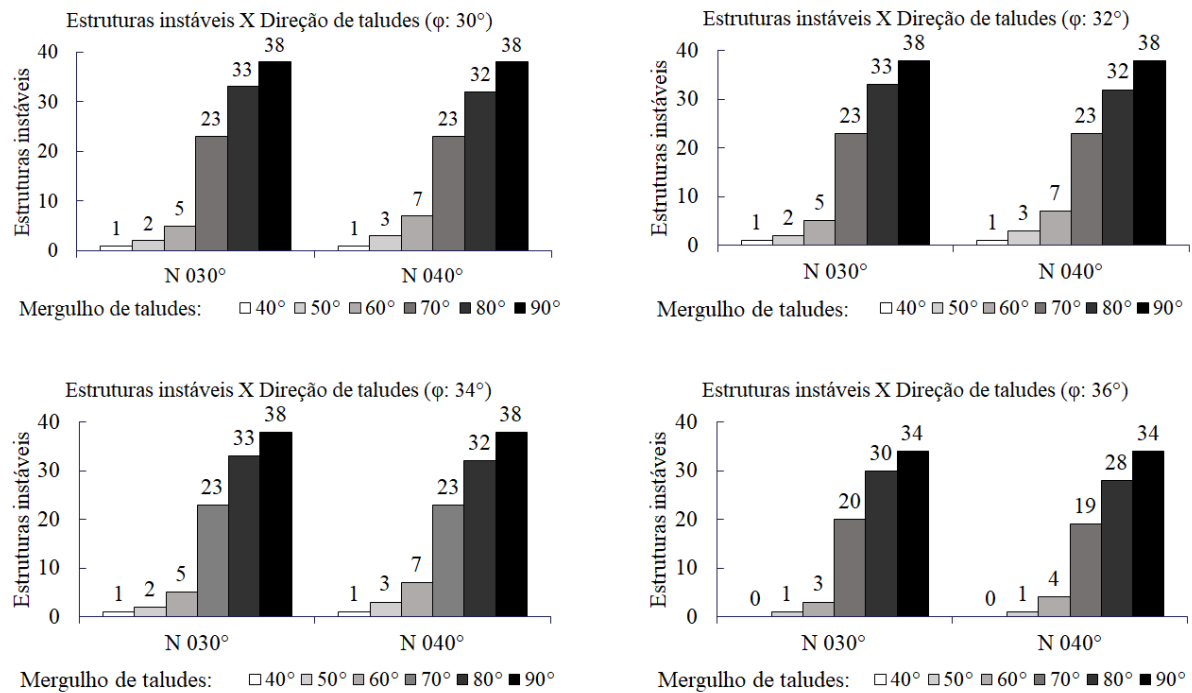


Figura 8: Histogramas de estruturas instáveis presentes nos diferentes taludes analisados de acordo com o ângulo de atrito modelado na análise cinemática. A partir dos histogramas é possível identificar a relevância do ângulo de mergulho dos taludes no quantitativo de interseções de estruturas em risco de escorregamento em cunha. O ângulo de atrito mostra-se influente no risco quando se compara taludes de 40° de mergulho.

Estudo de caso

A fotointerpretação dos lineamentos morfoestruturais a partir dos dados geomorfométricos do projeto TOPODATA nas direções de iluminação 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°, possibilitou a identificação de 197 lineamentos (Figura 9.A).

Apesar da análise da roseta de frequência dos lineamentos morfoestruturais (Figura 9.B) observe-se uma predominância de lineamentos transversais (direção NW-SE), a roseta de comprimento (Figura 9.C) evidencia a maior expressividade regional das feições morfoestruturais longitudinais (direção NE-SW). A representatividade destes é constatada em mapa de hipsometria da cidade do Salvador (Figura 2.B e Figura 10) e está relacionada com expressão geomorfológica dos Sistemas de Falhas de Salvador (SFS) e do Iguatemi (SFI).

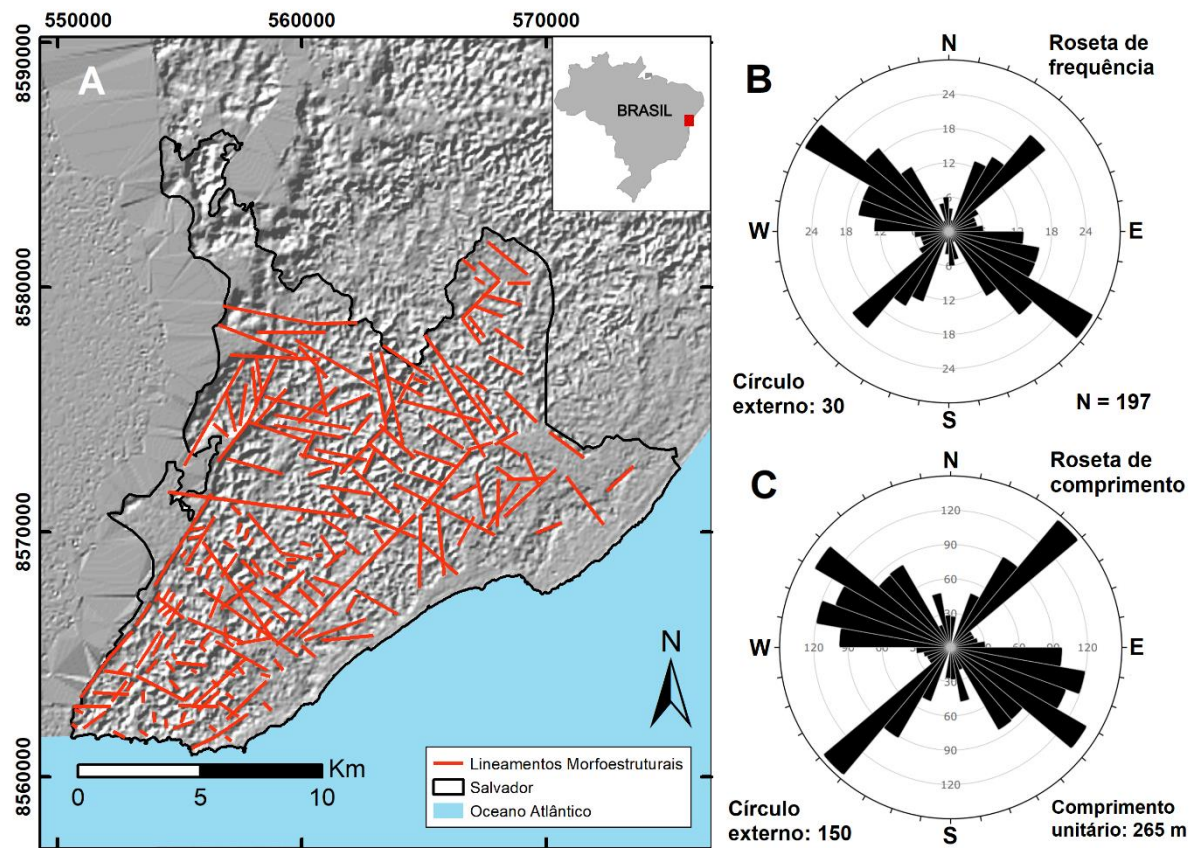


Figura 9: A) Mapa de lineamentos morfoestruturais de Salvador interpretados a partir dos dados geomorfométricos do projeto TOPODATA iluminado nas direções 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° e 315°. B) Roseta de frequência dos 197 lineamentos fotointerpretados na área. C) Roseta de comprimento dos lineamentos relativo ao menor lineamento fotointerpretado, ressaltando a maior expressão regional das feições morfoestruturais longitudinais (NE-SW).

A filtragem dos lineamentos localizados próximos aos SFS e SFI deu sequência à caracterização geométrica de 33 taludes representantes do SFS (Figura 10.A) e 34 taludes representantes do SFI (Figura 10.B). Os taludes do SFS apresentam mergulhos predominantemente orientados para noroeste, com máxima densidade polar em 128°/28° e apenas seis taludes com mergulhos orientados para sudeste, com polo médio 326°/30°. Já os taludes do SFI apresentam 22 taludes orientados para noroeste e máxima densidade polar na atitude 132°/22°, e 12 taludes orientados para sudeste e polo médio em 344°/25° (Tabela 2).

Tabela 2: Configuração geométrica dos taludes analisados no SFS e no SFI.

Orientação do talude	Quantidade de taludes	Polo médio	Direção média	Mergulho médio	Limite de confiança 95%
Taludes do Sistema de Falhas do Salvador					
Mergulho para NW	27	128/28	38	28	2,57
Mergulho para SE	6	326/30	34	30	5,96
Taludes do Sistema de Falhas de Iguatemi					
Mergulho para NW	22	132/22	42	22	3,04
Mergulho para SE	12	344/25	44	25	4,47

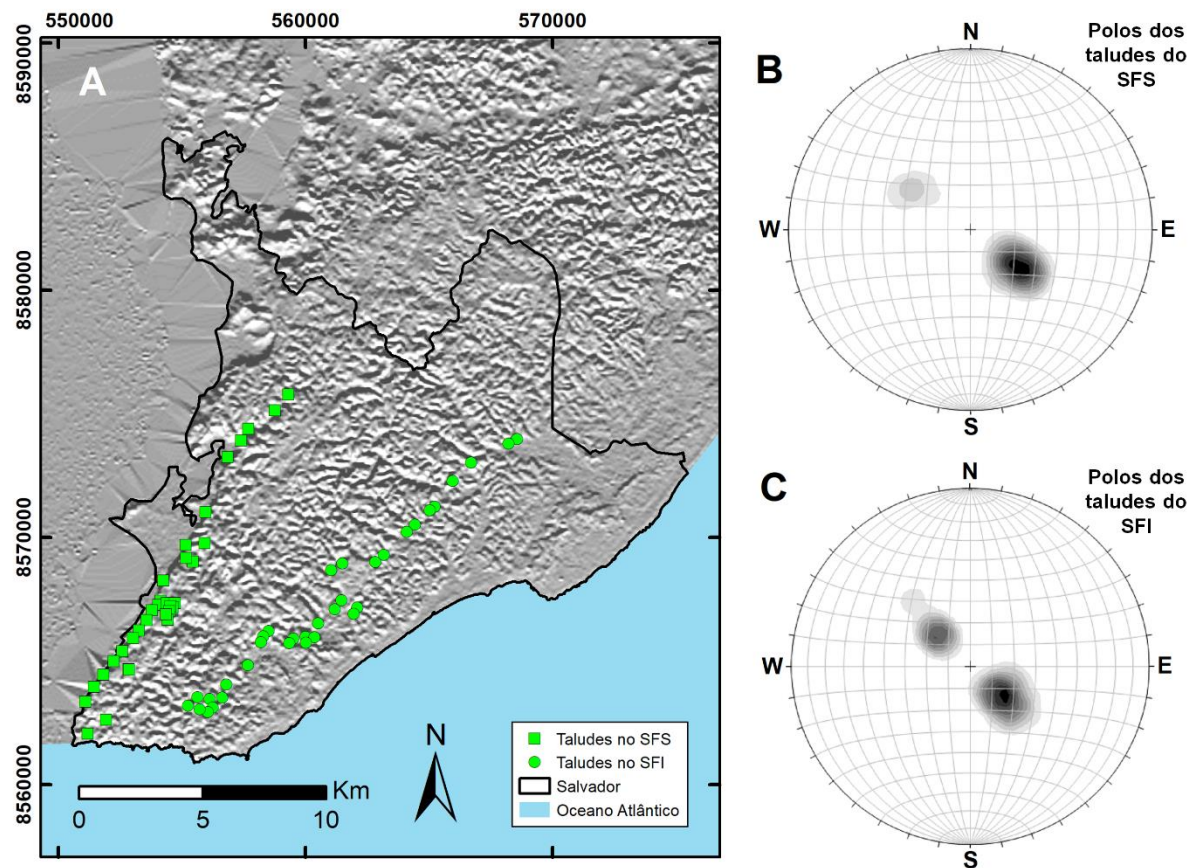


Figura 10: A) Mapa de relevo sombreado da cidade do Salvador com distribuição espacial dos taludes do Sistema de Falhas de Salvador (SFS) e do Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI). B) Representação da densidade polar dos taludes na região do Sistema de Falhas de Salvador (SFS). C) Representação da densidade polar dos taludes na região do Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI).

Os taludes identificados com risco de instabilidade pelos mecanismos de ruptura analisados, denominados como taludes críticos, foram observados em seis locais (Tabela 3), sendo três na região do SFS e outros três em locais próximos ao SFI. Em todos os seis taludes críticos foi identificado o risco de ruptura por escorregamento em cunha (Figura 11) e em apenas um deles constatou-se o risco de ruptura por tombamento flexural (Figura 11.G). Ainda, a risco de ruptura por escorregamento planar não esteve presente em nenhum dos 67 taludes analisados dentro das configurações propostas na modelagem cinemática.

Tabela 3: Taludes críticos identificados no estudo de caso.

Taludes críticos	UTM X	UTM Y	Atitude do talude	Risco associado	Referência de localização
Sistema de Falhas de Salvador					
Ponto 1	553259	8566226	N 030°/40° NW	Escorregamento em cunha	Fundos da Igreja do Santíssimo Sacramento do Passo, no Centro Histórico de Salvador.
Ponto 2	552587	8565404	N 040° /40° NW	Escorregamento em cunha	Av. Lafayette Coutinho, próximo à Capitania dos Portos da Bahia, no bairro Comércio.
Ponto 3	551814	8564438	N 040° /40° NW	Escorregamento em cunha	Av. Lafayette Coutinho, ao sul do Museu de Arte Moderna da Bahia, no bairro Centro

Sistema de Falhas do Iguatemi

Ponto 4	562095	8567156	N 030° /40° NW	Escorregamento em cunha	Rua da Bolandeira, região do Parque Metropolitano do Pituauçu, no bairro Imbuí.
Ponto 5	559343	8565732	N 040° /40° SE	Escorregamento em cunha	Rua 23 de janeiro, próximo à estação de metrô Pernambuês, no bairro Pernambuês.
Ponto 6	557653	8564827	N 040° /50° SE	Escorregamento em cunha; Tombamento flexural	Av. Antônio Carlos Magalhães, próximo ao Shopping da Bahia, no bairro Brotas.

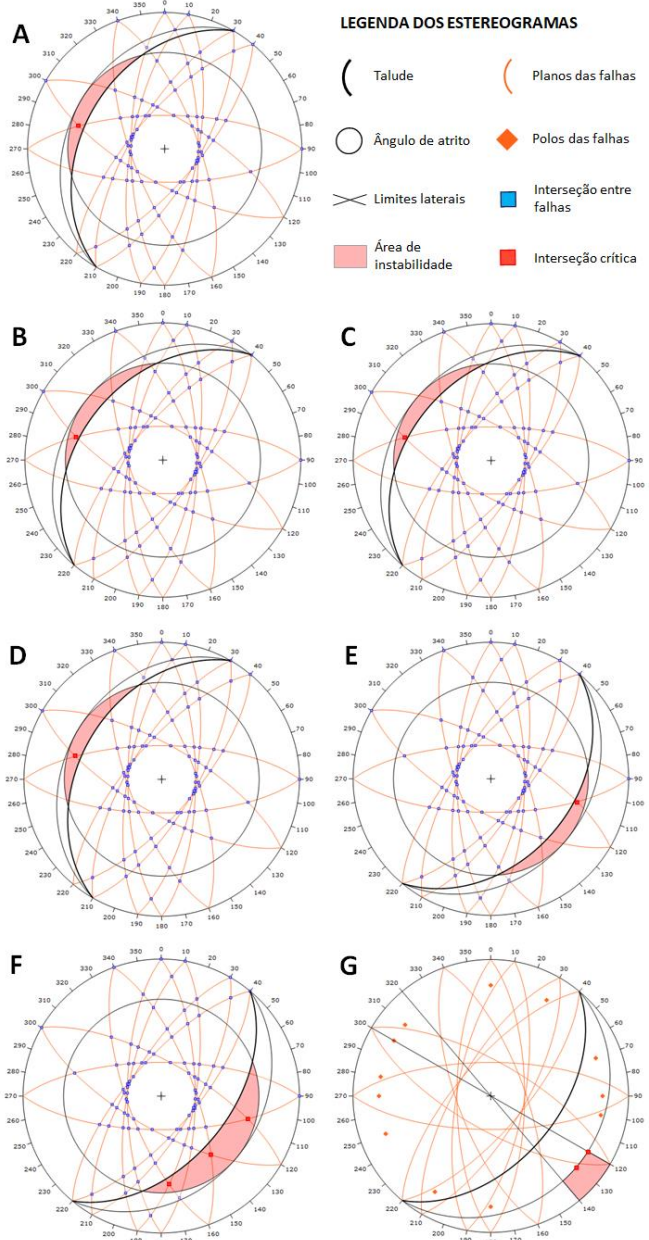
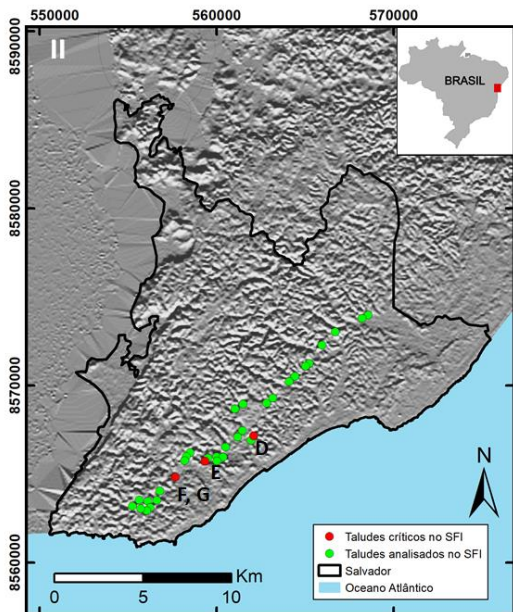
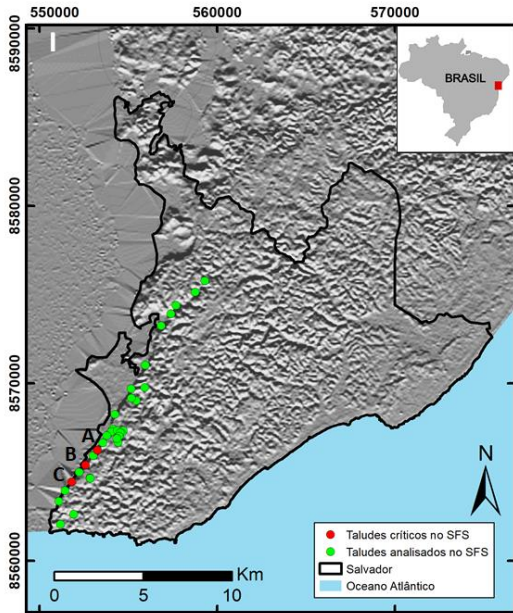


Figura 11: Mapas de localização dos pontos críticos dos taludes presentes no I) Sistema de Falhas de Salvador (SFS) e II) do Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI). As redes estereográficas A, B, C ilustram as estruturas que podem exercer risco de ruptura de talude na região do SFS. Já as redes estereográficas D, E, F, G ilustram as estruturas que podem exercer risco de ruptura de talude na região do SFI. A rede G representa a análise cinemática para tombamento flexural de blocos, enquanto as redes A, B, C, D, E e F referem-se à análise cinemática de escorregamento em cunha.

DISCUSSÕES

Modelagem Cinemática

A modelagem cinemática permitiu analisar a suscetibilidade dos taludes ao risco de acordo com 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 seu ângulo de mergulho é inferior a 70° (Figura 6). Quando o mergulho do talude for igual a 70° , o risco de instabilidade está associado apenas às estruturas com mesma direção de mergulho que o talude estudado, ou seja, taludes que apresentem estruturas com atitudes idênticas à sua face de inclinação. Já em taludes com mergulho superior a 70° , outras estruturas influenciam no número de estruturas instáveis (Figura 6). No caso dos taludes com direções N 030° , as falhas N $010^\circ/70^\circ$, N $030^\circ/70^\circ$ e N $040^\circ/70^\circ$ são as estruturas que apresentam risco de ruptura. Já os taludes de direção N 040° , o risco é representado pelas falhas de N $030^\circ/70^\circ$ e N $040^\circ/70^\circ$.

O estudo permitiu concluir que variação do ângulo de atrito (ϕ) no intervalo de 30° e 36° não produziu efeitos na estabilização dos taludes analisados, ou seja, o número de estruturas em situação crítica se manteve inalterado dentro do intervalo (Figura 6). Assim, ângulos de atrito acima de 36° poderão reduzir a quantidade de famílias de estruturas em situação de instabilidade. No entanto, ângulos de atrito inferiores a 30° , como é o caso de taludes com material mais afetado por intemperismo, não são capazes de elevar o número famílias de estruturas em situação de instabilidade.

A modelagem cinemática realizada para o mecanismo de tombamento flexural concluiu que taludes com mergulhos inferiores 50° são sempre estáveis para este mecanismo. Já os taludes com mergulhos superiores a 50° apresentam o mesmo número de famílias de estruturas em situação de instabilidade, independente das orientações dos taludes e do ângulo de atrito do material rochoso. Entretanto, caso o material rochoso apresente ângulo de atrito superior a 30° , os taludes podem apresentar mergulhos de até 60° sem que isso represente risco relacionado com as estruturas analisadas (Figura 7).

Por conseguinte, quanto ao mecanismo de escorregamento em cunha, identificou-se que taludes com ângulo de mergulho inferiores a 40° são estáveis para este tipo de mecanismo. Em contrapartida aos mecanismos anteriores, a elevação no ângulo de mergulho do talude representou um incremento no número de interseções críticas entre as estruturas rúpteis em todas as configurações modeladas. Independente da direção do talude analisado, quanto maior é o ângulo de mergulho da sua face, maior será o número de interseções críticas (Figura 8). Um ponto de maior destaque deve ser dado a 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 que o mesmo talude com mergulho de 60° . Além disso, taludes de direção N 040° com mergulhos inferiores a 70° apresentam um maior número de interseções críticas quando comparados com os taludes de direção N 030° . Contudo, essa diferenciação 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 do valor de 36° não produz variação no número de interseções críticas. Para materiais rochosos de ângulos de atrito inferiores a 36° , todos os taludes são estáveis quando o mergulho é inferior a 40° (Figura 8). As interseções $105^\circ/36^\circ$ ou N $285^\circ/36^\circ$, formadas pelas falhas N $090^\circ/70^\circ$ e N $120^\circ/70^\circ$, são as primeiras a tornar-se críticas com a elevação do ângulo de mergulho destes taludes. Já em ângulos de atrito iguais ou superiores a 36° as interseções $105^\circ/36^\circ$ ou N $285^\circ/36^\circ$ não representam risco e todos os taludes tornam-se naturalmente estáveis com mergulhos inferiores a 50° . A elevação do mergulho dos taludes, com ângulo de atrito igual ou superior a 36° , coloca as interseções críticas N $140^\circ/44^\circ$ ou N $320^\circ/44^\circ$ como as primeiras a representarem risco de ruptura e movimento de massa por escorregamento em cunha. Estas interseções são formadas pela presença das falhas N $120^\circ/70^\circ$ SW e N $160^\circ/70^\circ$ NE, e pelas falhas N $120^\circ/70^\circ$ NE e N $160^\circ/70^\circ$ SW, respectivamente.

Estudo de Caso

O resultado obtido com o estudo de caso leva à interpretação de que, sejam nos taludes próximos ao Sistema de Falhas de Salvador (SFS) ou naqueles próximos ao Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI), o escorregamento em cunha é o principal mecanismo gerador de risco para a cidade de Salvador, seguido do mecanismo de tombamento flexural (Figura 11). Assim, deve-se atribuir o risco a interseção de falhas transversais em taludes naturalmente controlados pelos sistemas de falhas longitudinais formados durante o rifte do Recôncavo-Tucano-Jatobá.

Nos taludes próximos ao SFS, em 33 pontos com taludes analisados, foram identificados três pontos com risco de escorregamento em cunha, sendo que todos apresentam mergulho voltado para o quadrante noroeste. Nestes taludes, a única interseção crítica, $285^\circ/36^\circ$, é formada entre as estruturas rúpteis N $090^\circ/70^\circ$ N e N $120^\circ/70^\circ$ SW (Figura 11). Todavia, devido aos taludes apresentarem mergulho de 40° , o risco para escorregamento em cunha só é observado em materiais rochosos com ângulo de atrito inferiores a 36° , segundo a modelagem cinemática realizada (Figura 8).

Já nos taludes próximos ao Sistema de Falhas do Iguatemi (SFI) foram analisados 34 pontos com taludes, destes, três pontos com taludes em risco de escorregamento em cunha. No entanto, diferente dos taludes próximos ao SFS, os taludes próximos ao SFI apresentam um ponto com suscetibilidade ao mecanismo de tombamento flexural (Figura 11). No Ponto 4, o mecanismo de ruptura por escorregamento em cunha pode ser produzido pela interseção N $285^\circ/36^\circ$, formada pelas falhas N $090^\circ/70^\circ$ N e N $120^\circ/70^\circ$ SW. Por outro lado, no Ponto 5 esse mecanismo é formado pelas falhas com mergulhos opostos aos pontos anteriores, N $090^\circ/70^\circ$ S e N $120^\circ/70^\circ$ NE, cuja a interseção formada tem atitude $105^\circ/36^\circ$. Contudo, o Ponto 6 do SFI apresenta o maior mergulho de talude identificado, de aproximadamente 50° de mergulho. Esta diferença ocasiona um aumento no risco de escorregamento em cunha, com três interseções críticas e gera também a possibilidade de ruptura por tombamento flexural. O escorregamento em cunha neste ponto, deve-se às interseções críticas N $105^\circ/36^\circ$ formadas entre as falhas N $090^\circ/70^\circ$ S e N $120^\circ/70^\circ$ NE, às interseções N $140^\circ/43^\circ$ formadas entre as falhas N $160^\circ/70^\circ$ NE e N $120^\circ/70^\circ$ SW e às interseções N $175^\circ/36^\circ$ formadas entre as falhas N $010^\circ/70^\circ$ SE e N $160^\circ/70^\circ$ SW (Figura 11.F).

O risco de ocorrência de tombamento flexural no Ponto 6 é produzido por falhas de atitude N $040^\circ/70^\circ$ NE (Figura 11.G). Este mecanismo de ruptura só é observado em taludes cujo ângulo de atrito do material rochoso é igual ou inferior que 30° . Entretanto, o risco de escorregamento em cunha permanece em todas as configurações de parâmetros testadas (Figura 8). Logo, os taludes observados nos pontos do SFI apenas serão estáveis quando a inclinação do talude for inferior a 40° ou o ângulo de atrito for superior ao 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 de Salvador. Foram identificadas configurações geométricas entre os taludes presentes em Salvador e as estruturas rúpteis da Bacia do Recôncavo, que possibilitam a ocorrência de movimentos de massa.

O mecanismo com maior potencial de movimentação é o escorregamento em cunha, devido à possibilidade de ocorrência desse mecanismo em taludes com menor declividade frente aos outros mecanismos de movimento de massa. A partir de 50° de mergulho, os taludes de Salvador tendem a ser afetados tanto pelo mecanismo de escorregamento em cunha como por tombamento flexural.

Além disso, um aumento de 10° no mergulho dos taludes, como em operações de cortes artificiais, pode representar um incremento de até sete vezes no número de interseções que oferecem risco de escorregamento em cunha. Devido a isto, pontua-se a necessidade de mapeamento de detalhe 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 atribuiu significativo aumento ou redução de estruturas em situação de instabilidade. Todavia, não se exclui a necessidade de obtenção de parâmetros geotécnicos. No entanto, o estudo endossa a necessidade de concentrar esforços na identificação das estruturas geológicas locais, as quais podem representar risco tanto em taludes rochosos como em taludes de solos residuais sob a forma de estruturas reliquias.

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. Estas informações podem ser úteis na formulação de políticas públicas de uso e ocupação do solo e de gestão dos riscos de desastres geológicos, especificamente de movimentos de massa. Contudo, essas localidades necessitam de investigação geológico-geotécnica detalhada, com identificação de parâmetros e caracterização das principais estruturas rúpteis da região, além de análise tridimensional da topografia, para uma melhor definição do risco de movimento de massa.

BIBLIOGRAFIA

- Aragão, M. A. N. F., Peraro, A. A. (1994). Elementos estruturais do rifte Tucano/Jatobá. *3º Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil*, 3, 161-164. Rio Claro: SBG.
- Arai, M. (2005). A grande elevação eustática do Mioceno: a verdadeira origem do Grupo Barreiras. *10º Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*, 10. 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 – Suplemento), 9–22.
- Barbosa, J. S. F., Dominguez, J. M. L. (1996). *Texto Explicativo para o Mapa Geológico ao Milionésimo*. Salvador: SICM/SGM (Edição Especial).
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. (2015). *Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Salvador - BA*. Escala 1:50.000. Rio de Janeiro: CPRM.

- Côrrea-Gomes, L.C., Destro, N. (2012). Tectônica das bacias Paleozóicas e Mesozóicas. In: J.S.F. Barbosa, (Ed.), *Geologia da Bahia, pesquisa e atualização*, 255-325. Salvador: CBPM. (Série Publicações Especiais, 13).
- Glastonbury, J., Fell, R. (2000). *Report on the Analysis of "Rapid" Natural Rock Slope Failures*. Sydney: School of Civil and Environmental Engineering. (Uniciv Report, R-390).
- Hoek, E., Bray, J. W. (1981). *Rock Slope Engineering* (3rd Ed.). London: Institution of Mining & Metallurgy.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2018). *População em áreas de risco no Brasil*. Rio de Janeiro: Coordenação de Geografia – IBGE.
- 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 de Salvador visando a aplicação em mapeamento de risco. *IV Conferência brasileira sobre estabilidade de encostas*, 1, 17-25. Salvador: ABMS.
- Jesus, A. C. (2008). *Retroanálise de escorregamentos em solos residuais não saturados*. Dissertação (Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- 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. Da, 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. de. (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.
- 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.
- 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.
- Silva, I. C. (2013). *Evolução Dinâmica do Sistema de Bacias Tipo Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá com Base em Dados de Campo*. Tese (Doutorado). Salvador: Instituto de Geociências – UFBA.
- 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.
- Wyllie, D.C., Mah, C.W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining* (4th ed.). New York: Spon Press.

CAPÍTULO 3

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 de Salvador. Foram identificadas configurações geométricas entre os taludes presentes em Salvador e as estruturas rúpteis da Bacia do Recôncavo, que possibilitam a ocorrência de movimentos de massa.

O mecanismo com maior potencial de movimentação é o escorregamento em cunha, devido à possibilidade de ocorrência desse mecanismo em taludes com menor declividade frente aos outros mecanismos de movimento de massa. A partir de 50° de mergulho, os taludes de Salvador tendem a ser afetados tanto pelo mecanismo de escorregamento em cunha como por tombamento flexural.

Além disso, um aumento de 10° no mergulho dos taludes, como em operações de cortes artificiais, pode representar um incremento de até sete vezes no número de interseções que oferecem risco de escorregamento em cunha. Devido a este fato, pontua-se a necessidade de mapeamento de detalhe 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 atribuiu significativo aumento ou redução de estruturas em situação de instabilidade. Essa informação não permite excluir a necessidade de obtenção de parâmetros geotécnicos. No entanto, o estudo endossa a necessidade de concentrar esforços na identificação das estruturas geológicas locais, as quais podem representar risco tanto em taludes rochosos como em taludes de solos residuais sob a forma de estruturas reliquiares.

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. Estas informações podem ser úteis na formulação de políticas públicas de uso e ocupação do solo e de gestão dos riscos de desastres geológicos, especificamente de movimentos de massa. No entanto, essas localidades necessitam de investigação geológico-geotécnica detalhada, com identificação de parâmetros e caracterização das principais estruturas rúpteis da região, além de análise tridimensional da topografia, para uma melhor definição do risco de movimento de massa.

APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS AUTORES NO ARTIGO

O primeiro autor do artigo submetido corresponde ao discente de mestrado Lucas de Santana Menezes que realizou a pesquisa e, a partir dela, elaborou o texto desta dissertação de mestrado junto ao Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia.

Já o segundo autor do artigo submetido foi o Dr. Luiz César Corrêa-Gomes, professor do Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, o qual exerceu papel fundamental na idealização da pesquisa e orientação do primeiro autor durante a elaboração dessa dissertação de mestrado.

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DA USP

DIRETRIZES PARA AUTORES

1. PÁGINA DE ROSTO – deverá conter: três títulos, em português, em inglês e título curto no idioma principal do manuscrito com no máximo 50 caracteres, contando os espaços; nome completo e instituição de origem dos autores; endereço completo **somente do autor principal** (logradouro, CEP, cidade, estado, país, caixa postal e **telefone para contato** - pode ser o endereço da Universidade), **e-mail de todos os autores**; número de palavras; total de figuras e de tabelas.

2. RESUMO E ABSTRACT – em um único parágrafo, **devem ser concisos, com no máximo 270 palavras.** Textos mais longos devem vir acompanhados de justificativa circunstanciada.

3. PALAVRAS-CHAVE E KEYWORDS – **máximo seis**, separadas por ponto e vírgula, com a primeira letra em maiúscula. Ex.: Bacia do Araripe; Quaternário; Fácies; Depósitos magmáticos.

Os descritores em inglês devem acompanhar os termos em português.

4. TEXTO PRINCIPAL – poderá ser redigido em português ou inglês. Elaborar em Word, fonte Times New Roman, tamanho 12, espaço simples. **O tamanho máximo aceito para publicação é de 25 páginas, incluindo: texto, resumo, abstract, tabelas, figuras e referências bibliográficas.** (Trabalhos mais longos podem ser aceitos desde que argumentos científicos que os justifiquem sejam apresentados e aceitos).

a) Na fase de submissão, inserir numeração de páginas, bem como as figuras, tabelas, legendas e referências.

b) Quando o artigo estiver devidamente aprovado para publicação, as figuras, tabelas e legendas devem ser retiradas do texto. Enviá-las separadamente e numeradas, cada uma num arquivo. As legendas devem vir em um único arquivo, separadas das figuras e tabelas.

5. TÍTULOS

a) Título do artigo:

Título principal – **Negrito, caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais.**

Título em inglês – Itálico, caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais (sem negrito).

Título curto - Caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais (sem negrito /sem itálico).

b) Títulos e subtítulos no interior do artigo:

NÍVEL 1 – **NEGRITO, CAIXA ALTA.**

Nível 2 – **Negrito, caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais.**

Nível 3 – *Itálico, caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais (sem negrito).*

Nível 4 – Caixa alta na primeira letra da primeira palavra e caixa baixa nas demais (sem negrito).

6. TABELAS E QUADROS – considerar quadro como tabela. Elaborar em Word, no modo “tabela”, com formato aberto, fonte Arial, tamanho 8. Obedecer as medidas: 8,2 cm (uma coluna) ou 17 cm (duas colunas), comprimento máximo de 22 cm, incluindo a legenda. Tabelas muito extensas deverão ser divididas.

a) Na fase de submissão, inserir as tabelas no texto, juntamente com a legenda, com a devida numeração sequencial.

b) Quando o artigo estiver devidamente aprovado para publicação, as tabelas devem ser retiradas do texto. Enviá-las separadamente e numeradas, cada uma num arquivo. As legendas devem vir em um único arquivo, separadas das tabelas.

c) Legendas: fonte Times New Roman, tamanho 12. (sem itálico)

7. ILUSTRAÇÕES – mapas, fotos, figuras, gráficos, pranchas, fotomicrografias etc., considerar como figuras. Utilizar fonte Arial, tamanho 9. Obedecer as medidas: 8,2 cm (uma coluna) ou 17 cm (duas colunas), comprimento máximo de 22 cm, incluindo a legenda.

a) Na fase de submissão, inserir as figuras no texto, juntamente com a legenda, com a devida numeração sequencial.

b) Quando o artigo estiver devidamente aprovado para publicação, as figuras devem ser retiradas do texto. Enviá-las separadamente e numeradas, cada uma num arquivo. **Deverão estar em formato JPEG, TIFF ou EPS, com resolução mínima de 300 dpi.** As legendas devem vir em um único arquivo, separadas das figuras.

c) Legendas: fonte Times New Roman, tamanho 12. (sem itálico)

8. CITAÇÕES NO TEXTO – exemplos de citação direta / citação indireta:

a) Um autor

Santos (1980) / (Santos, 1980)

b) Dois autores

Norton e Long (1995) / (Norton e Long, 1980)

c) Mais de dois autores

Moorbath et al. (1992) / (Moorbath et al., 1992)

d) Congressos, conferências, seminários etc.

... no Congresso Brasileiro de Geologia (1984) / (Congresso Brasileiro de Geologia, 1984)

e) Vários trabalhos de diferentes autores

Smith (1985), Rose e Turner (1986) e Johnson et al. (1990) / (Smith, 1985; Rose e Turner, 1986; Johnson et al., 1990)

f) Citação de vários trabalhos de um mesmo autor

Smith (1979a, 1979b, 1981) / (Smith, 1979a, 1979b, 1981)

9. REFERÊNCIAS – listar no final do texto, em ordem alfabética de autores e, dentro dessa sequência, em ordem cronológica.

DOI: inseri-lo em todas as referências que já o tiverem.

A exatidão das referências bibliográficas é de inteira responsabilidade dos autores.

EXEMPLOS DE REFERÊNCIAS:

a) Livro com um autor

Middlemost, E. A. K. (1997). *Magma, rocks and planetary development: A Survey of Magma/Igneous Rock Systems*. Harlow: Longman.

b) Livro com dois autores

Anderson, M. P., Woessner, W. W. (1992). *Applied groundwater modeling. Simulation of low and advective transport*. San Diego: Academic Press.

c) Livro com três ou mais autores

Harland, W. B., Armstrong, R. L., Cox, A. L. V., Craig, L. E., Smith, A., Smith, D. (1989). *A geologic time scale (2nd ed.)*. Cambridge: Cambridge University Press.

d) Capítulo de livro

Almeida, F. F. M., Amaral, G., Cordani, U. G., Kawashita, K. (1973). The Precambrian evolution of the South American cratonic margin south of Amazonas River. In: A. E. Nairn, F. G. Stille (Eds.), *The ocean basin and margins*, 1, 411-446. New York: Plenum.

(Exemplo de Publicação seriada)

L. Harris, N. , Pearce, J. , Tindle, A. (1986). Geochemical collision-zone magmatism. In: Coward M. P., Ries A. C. (ed.) *Collision tectonics*. 67-81. London: Geological Society. (Geological Society Special Publication, 19).

e) Artigo de periódico

Caffe, P. J., Soler, M. M., Coira, B. L., Cordani, U. G., Onoe, A. T. (2008). The granada ignimbrite: a compound pyroclastic unit and its relationship with upper miocene caldera volcanism in the northern Puna. *Journal of South American Earth Science*, 25(4), 464-484.

f) Trabalho apresentado em evento

Danni, J. C. M., Ribeiro, C. C. (1978). Caracterização estratigráfica da sequência vulcano-sedimentar de Pilar de Goiás e de Guarinos, Goiás. *XXX Congresso Brasileiro de Geologia*, 2, 582-596. Recife: SBG.

g) Mapa

Inda, H. A. W., Barbosa, J. F. (1978). *Mapa Geológico do Estado da Bahia*. Escala 1:1.000.000. Salvador: Secretaria de Minas e Energia do Estado da Bahia/ CBPM.

h) Teses e Dissertações

Petta, A. R. (1995). Estudo geoquímico e relações petrogenéticas do batólito múltiplo composto São Vicente/ Caicó (RN-Brasil). Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP.

Pressi, L. F. (2012). Evolução magmática do Plúton Piracaia (SP): parâmetros físico-químicos e evidências de mistura entre magmas monzodioríticos e sieníticos. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP.

i) Documentos em meio eletrônico

Livro

Sharkov, E. (2012). Tectonics: Recent Advances. Croatia: InTech, <<http://www.intechopen.com/books/tectonics-recent-advances>>.

Artigo de periódico

Soares, E. A., Tatum, S. H. (2010). OSL age determinations of pleistocene fluvial deposits in Central Amazonia. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 82(3), 691-699. Acesso em 14 de fevereiro de 2011, <<http://www.scielo.br/pdf/aabc/v82n3/17.pdf>>.

Trabalho apresentado em evento

Souza-Lima, W., Farias, R. M. (2007). A flora quaternária dos travertinos de Itabaiana, Sergipe. *PALEO 2007* (p. 7). Itabaiana: SBP. Acesso em 18 de dezembro de 2008, <http://www.phoenix.org.br/Paleo2007_Boletim.pdf>.

j) Com numeração DOI

Livro

Zavattini, J. A. (2009). As chuvas e as massas de ar no estado de Mato Grosso do Sul: estudo geográfico com vista à regionalização climática.

<https://doi.org/10.7476/9788579830020>.

Artigo de periódico

Evandro, L., Kleina, E. L., Rodrigues, J. B., Lopesa, E. C. S., Gilvana, L. Soledade, G. L. (2012). Diversity of Rhyacian granitoids in the basement of the Neoproterozoic-Early Cambrian Gurupi Belt, northern Brazil: Geochemistry, U–Pb zircon geochronology, and Nd isotope constraints on the Paleoproterozoic magmatic and crustal evolution. *Precambrian Research*, 220-221, 192-216.

<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.08.007>.

ANEXO B – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO À REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DA USP

[GEOUSP] Agradecimento pela submissão Caixa de entrada x  

 **Daniel Machado via Portal de Revistas da USP** <portaldervistas@usp.br> seg., 20 de set. 14:51   
para mim ▾

Lucas de Santana Menezes:

Obrigado por submeter o manuscrito, "Modelagem cinemática dos sistemas de falhas e aplicação em casos de taludes naturais N 030° e N 040° da cidade do Salvador, Bahia, Brasil" ao periódico Geologia USP. Série Científica. Com o sistema de gerenciamento de periódicos on-line que estamos usando, você poderá acompanhar seu progresso através do processo editorial efetuando login no site do periódico:

URL da Submissão: <https://www.revistas.usp.br/guspsc/authorDashboard/submission/190779>
Usuário: lsantana

Se você tiver alguma dúvida, entre em contato conosco. Agradecemos por considerar este periódico para publicar o seu trabalho.

Daniel Machado

 Responder  Encaminhar