

ANÁLISE CINEMÁTICA EM TALUDES DE OBRA RODOVIÁRIA

Henrique Ayuso de ALMEIDA ¹; Wilson Shoji IYOMASA ²

Resumo – Ao se tratar de obras de infraestrutura, sobretudo de corte de encostas, seja para rodovias, ferrovias ou outro tipo de obras civis, o entendimento da geologia do maciço, principalmente a geologia estrutural, é fundamental para elaborar projetos de estabilização do talude. Sendo assim, um dos estudos aplicados neste contexto é o da análise cinemática das estruturas geológicas, que requer a coleta dos dados das estruturas presentes no maciço, os transforma em planos aplicados em um estereograma de Schmidt-Lambert e interpreta os riscos de diferentes tipos de rupturas que o talude pode sofrer, considerando os parâmetros geomecânicos. Para este trabalho, foram realizadas 20 medidas de estruturas presente em um maciço que sofrerá cortes para a construção de uma grande rodovia no Estado de São Paulo. Os dados foram tratados e projetados em estereograma utilizando-se o programa Stereonet para a realização da análise cinemática. Como resultado, concluiu-se a presença de estruturas geológicas identificadas e associada à superfície de corte que oferecem riscos de rupturas dos tipos planar e em cunha.

Abstract – When it comes to infrastructure projects, especially slope cuts for highways, railways, or other types of civil engineering projects, understanding the geology of the rock mass, particularly structural geology, is essential for designing slope stabilization projects. Thus, one of the studies applied in this context is the kinematic analysis of geological structures, which requires collecting structural data from the rock mass, transforming them into planes applied to a Schmidt-Lambert stereogram, and interpreting the risks of different types of failures that the slope may undergo, considering geomechanical parameters. For this study, 40 structural measurements were taken from a rock mass that will be excavated for the construction of a major highway in the state of São Paulo. The data were processed and projected onto a stereogram using the Stereonet software to conduct the kinematic analysis. As a result, the presence of identified geological structures associated with the cut surface was confirmed, posing risks of planar and wedge failures.

Palavras-Chave – Geologia Estrutural; geotecnia; análise cinemática; taludes.

¹ Geól. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). (19) 98138-1217. almeida.henrique98@gmail.com

² Geól. Dr. EESC-USP (11) 99688 7842. wsi@ipt.com.br

1. INTRODUÇÃO

Obras de rodovia são grandes empreendimentos lineares compostos por obras de corte de encostas, aterro, túneis e Obras de Arte Especiais (OAEs). Quando se trata de obras de corte, destacadamente, em maciço rochoso são ou alterado, e até em solo residual com estruturas geológicas preservadas, é de extrema importância o emprego de análises geológicas e geomecânica para garantia da estabilidade dos taludes originados a partir desses cortes.

Neste âmbito, encontra-se a análise cinemática: um tipo de estudo realizado para avaliar a susceptibilidade do talude a diferentes tipos de rupturas em cunhas, associadas às intersecções de planos das estruturas geológicas. De acordo com SANTOS et al. (2018), "a análise cinemática do maciço rochoso toma por base as atitudes dos planos de fraqueza em relação à atitude da vertente ou do talude, levando-se em conta os ângulos de atrito ou de fricção atuantes ao longo destes planos". Assim, para a representação gráfica dessas continuidades, é utilizado o estereograma de Schmidt-Lambert.

Geralmente, a análise cinemática é utilizada em taludes em rocha. Todavia, as estruturas da rocha mãe também são encontradas em solos de alteração autóctones, ou seja, que não sofreram nenhum transporte. Sendo assim, ressalta-se no presente trabalho a importância das descontinuidades na interface solo-rocha.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi necessária a coleta em campo das atitudes das estruturas do talude estudado. Para isso, foi utilizada a bússola do tipo "Clar", que facilita coletar dados de estruturas, como direção e ângulo de mergulho (ou inclinação).

Ao todo, foram coletadas 20 medidas de estruturas, separadas em 7 famílias diferentes. Para a interpretação e análise cinemática, foi utilizado o programa StereoNet. As análises realizadas consideram 3 tipos principais de ruptura: planares, em cunha e tombamento.

Para o ângulo de atrito adotado, foram considerados valores encontrados na bibliografia, bem como resultados de ensaios de cisalhamento direto realizados para o desenvolvimento do projeto da obra em questão.

3. CONCEITO SOBRE AS ANÁLISES CINEMÁTICAS

De acordo com FIORI (2015), a aplicação do estudo de análise cinemática serve para entender a movimentação dos corpos no maciço rochoso sem fazer referência às forças que causam o movimento em si. É uma análise tridimensional que leva em consideração as intersecções dos diferentes planos das estruturas geológicas, associadas à superfície do plano de corte. Tais intersecções formam prismas tridimensionais que podem sofrer deslocamentos (escorregamentos) e até queda de blocos (tombamento).

A técnica de representação utilizada durante esta análise é o diagrama de Schmidt-Lambert, na qual se transforma o dado de atitude da estrutura para planos que intersectam a projeção bidimensional de um hemisfério inferior (calota inferior da semi-esfera), conforme exemplificado (tridimensionalmente) na Figura 1. Sendo assim, as maneiras como as estruturas se interceptam no diagrama podem ser interpretadas, obtendo-se informações importantes sobre a probabilidade de ruptura do talude sob estudo. A Figura 2 apresenta os principais tipos de rupturas que podem ocorrer em taludes de maciços rochosos estruturados, com suas representações gráficas e respectivos estereogramas.

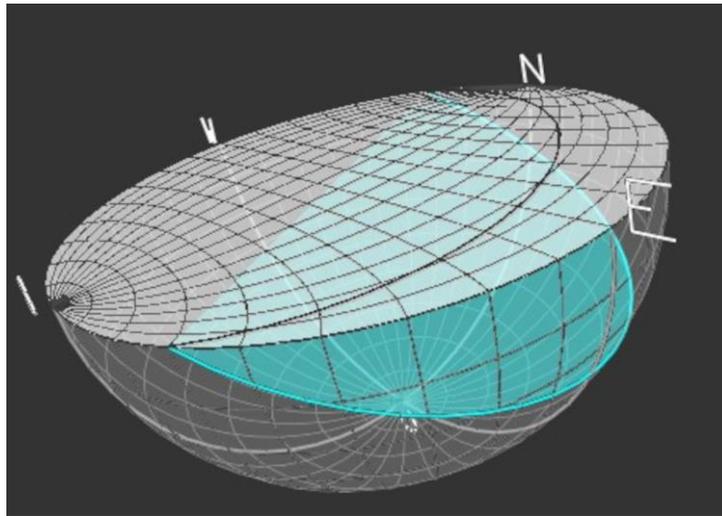


Figura 10: Exemplo de uma estrutura com atitude 60/30 (Direção do mergulho/ângulo do mergulho) representada em um estereograma. Visão 3D elaborada com o programa Stereonet. Fonte: Acervo pessoal.

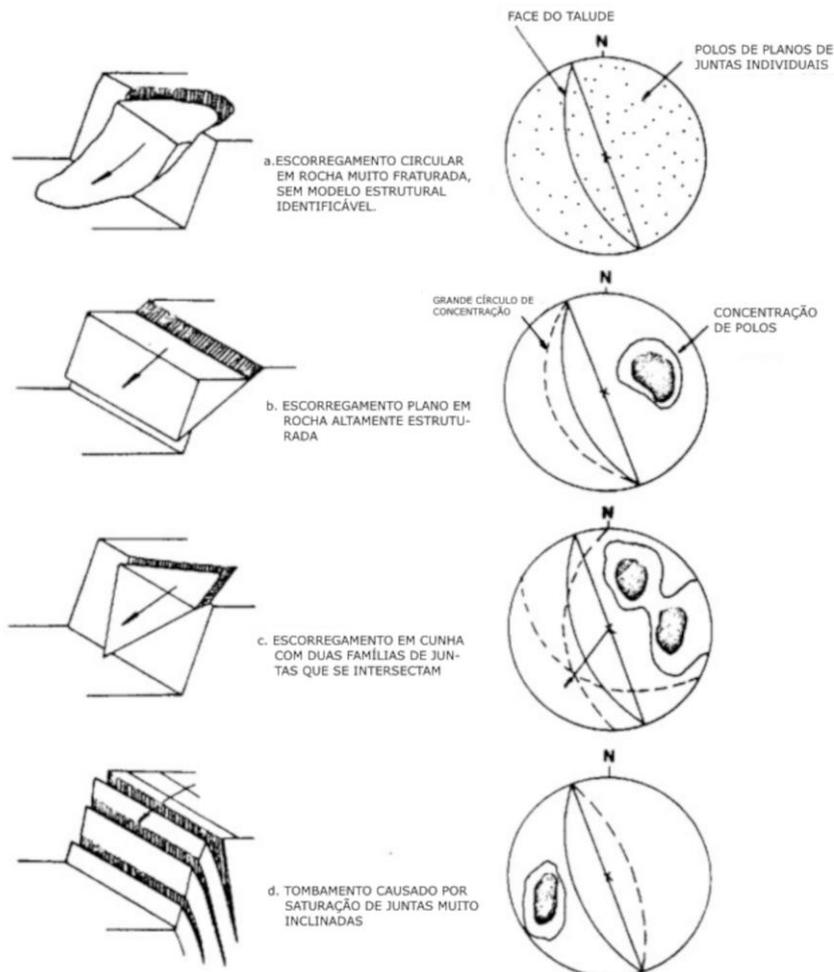


Figura 2: Principais tipos de rupturas de taludes em rocha e suas representações no estereograma. Fonte: Modificado de HOEK; BRAY, (1981).

4. DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

4.1. Geologia local

A região de estudo está situada em uma obra de rodovia, inserida dentro do contexto geológico regional da Faixa São Roque. De acordo com JULIANI; BELJAVSKIS (1995), esta faixa é composta pelos maciços rochosos pertencentes aos grupos São Roque e Serra do Itaberaba: o

primeiro é constituído predominantemente por filitos róseos, alaranjados, castanhos ou avermelhados, quando alterados e cinza-esverdeados claros a escuros quando são. As estruturas neles presentes são tanto bandamentos quanto laminações, resultado de alternâncias de leitos mais ou menos quartzosos ou micáceos; o segundo grupo é composto predominantemente por metapelitos e metabásicas, além de outros litotipos metamórficos, subordinadamente.

O talude estudado para a elaboração deste trabalho apresenta a interface solo-rocha dos filitos pertencentes ao grupo São Roque, com coloração rósea, avermelhada e alaranjada, além da presença de faixas mais e menos arenosas. A Figura 3 apresenta uma visão geral do talude, enquanto a Figura 4 mostra detalhes da rocha extremamente alterada do talude estudado, com a presença de estruturas geológicas que se repetem em toda sua extensão do corte.



Figura 3: Visão geral do talude estudado. Fonte: acervo pessoal.



Figura 4: Detalhe da rocha extremamente alterada (Filito) do Grupo São Roque e suas estruturas preservadas. Fonte: acervo pessoal.

4.2. Geologia estrutural

Sendo uma rocha metapelítica, o filito estudado apresenta, além da foliação resultante do acamamento, 7 famílias de fraturas compostas por diáclases lisas, fechadas e oxidadas. A

direção do talude segue para N75E, com mergulho de 45°. O quadro 1 compila todas as atitudes medidas em campo.

Quadro 1 — Medidas efetuadas das atitudes da Foliação e das Famílias de fraturas (F1 a F7).

Estruturas Geológicas	Atitudes
Foliação	161/55; 161/59; 157/55; 159/60; 148/54; 161/41; 166/47
F1	246/89; 245/90; 249/82
F2	250/41
F3	207/67
F4	40/84; 53/83
F5	170/87; 171/89
F6	281/50; 300/47
F7	175/76; 179/61

É importante levar em consideração como cada família de fraturas se comporta, tanto independentemente, quanto em conjunto com as outras famílias, quando se trata de obras de corte em terreno natural. A Figura 5 exemplifica uma ruptura em cunha, que já havia ocorrido em um trecho do talude estudado.

Essa constatação ensejou e justificou o desenvolvimento dos estudos aqui relatado para auxiliar no estabelecimento ou correção nos procedimentos de engenharia para execução de segmentos de taludes com características semelhantes ao descrito neste estudo de caso.

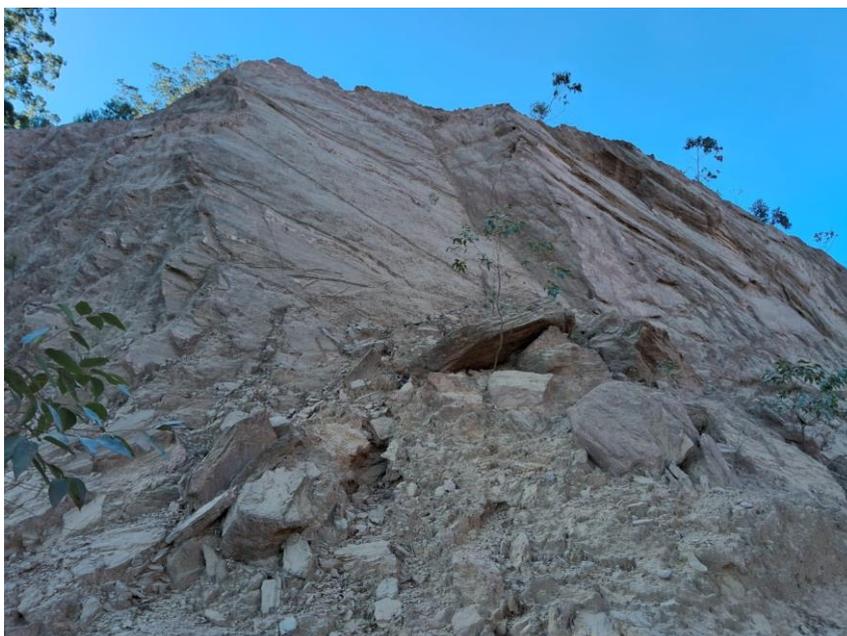


Figura 5: Ruptura encontrada no talude de estudo. Provável ocorrência de deslocamento em cunha. Fonte: acervo pessoal.

Desta forma, foi realizada análise cinemática considerando-se todas as famílias independentemente para rupturas planares e combinações das famílias para rupturas em cunha e tombamento. Para o ângulo de atrito, foi utilizado o valor médio de 28° , retirado de ensaios de cisalhamento direto realizados com o solo para o empreendimento. Ainda, o trabalho de FUTAI; JUNIOR; ABRAMENTO (2012), corrobora com o valor adotado, já que nele os ângulos de atrito de solos residuais de filitos variam entre 24° e 32° .

5. ANÁLISES E RESULTADOS

Para as análises apresentadas a seguir foi utilizado o software "Stereonet", que permite inserir todos os dados estruturais do maciço, bem como os cones de atrito, atitude do talude e limitadores laterais. Foram considerados limitadores laterais de 20° em relação à direção de mergulho do talude.

Iniciando-se pela análise de ruptura planar, os estudos realizados para cada família de estruturas indicaram a foliação preservada como estrutura geológica favorável a ocasionar ruptura do talude, conforme mostrado na Figura 6. Os polos³ das estruturas foram representados pelos pontos pretos.

³ Os polos são projeções ortogonais aos planos (linhas ortogonais) que representam as estruturas dentro de um estereograma

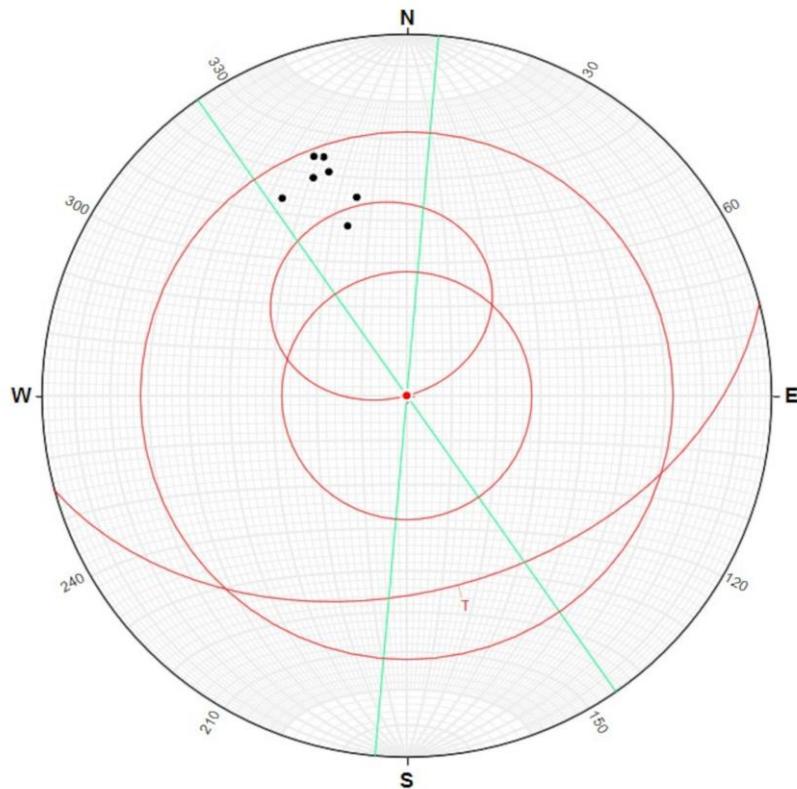


Figura 6: Análise cinemática para ruptura planar originada pela foliação. Fonte: *Setereonet*

É importante observar que apenas um dos planos apresentou polo dentro da zona de "daylight" (termo utilizado para indicar a região no estereograma na qual qualquer polo que estiver dentro dela representa um plano que aflora na face do talude com inclinação maior que o ângulo de atrito), mas é o suficiente para entender que, ao longo de todo o talude, existe a probabilidade de a foliação ser responsável por uma ruptura planar.

Seguindo a análise para as rupturas do tipo em cunha, desenhou-se as intersecções das estruturas no estereograma, representadas pelos pontos pretos. Foram encontradas duas intersecções que oferecem risco: a intersecção entre a foliação e a família 1 (F1) e entre as famílias 3 e 4 (F3 e F4), conforme representado nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

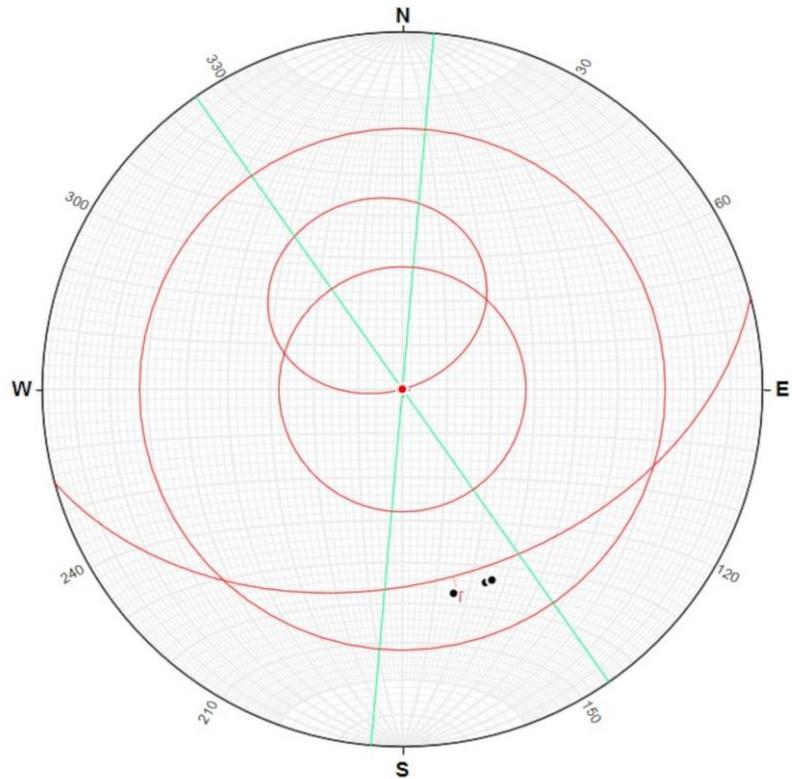


Figura 7: Análise cinemática para ruptura em cunha entre a foliação e a família 1 (F1). Fonte: *Setereonet*

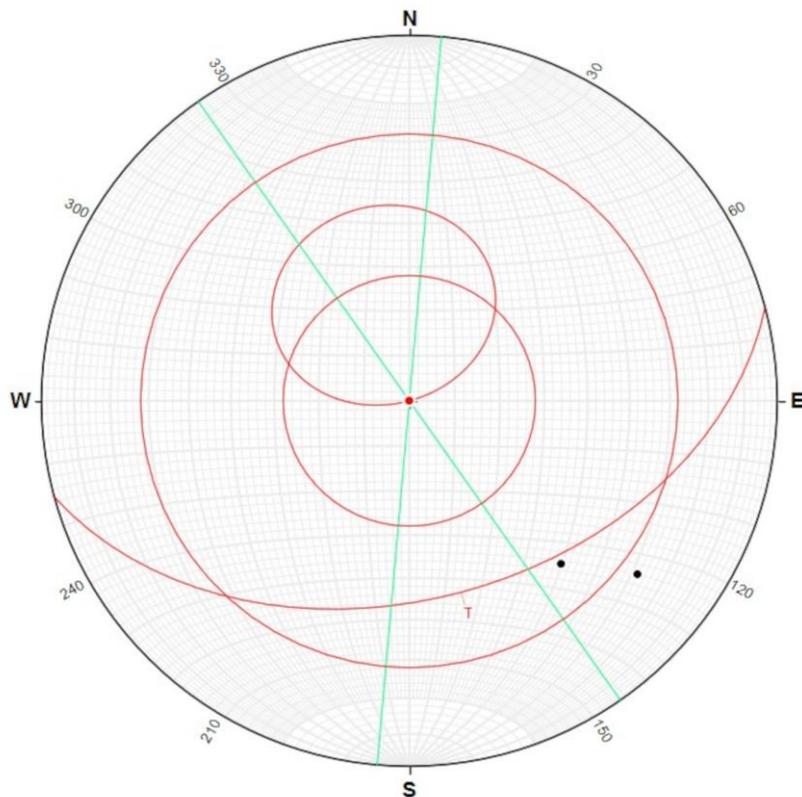


Figura 8: Análise cinemática para ruptura em cunha entre as famílias 3 e 4 (F3 e F4). Fonte: *Setereonet*.

Por fim, de acordo com HOEK; BRAY (1981), para uma estrutura fornecer riscos de tombamento (diferente de ruptura em cunha), deve satisfazer a seguinte condição: $90^\circ - \text{ângulo de mergulho do talude} + \text{ângulo de atrito} < \text{ângulo de mergulho da descontinuidade}$, desde que esta última apresente paralelismo com o talude (até 10°). Sendo assim, nenhuma estrutura avaliada se enquadrava nessas condições.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Obras de corte durante a execução de rodovias são etapas cruciais e inevitáveis. Sendo assim, para garantir a segurança destas obras, uma das medidas que pode ser adotada é a análise cinemática: um estudo que emprega o estereograma de Schmidt-Lambert para visualizar e interpretar como as descontinuidades do maciço podem culminar em rupturas, podendo ser do tipo planar, em cunha ou tombamento.

No talude aqui apresentado, foi possível levantar dois pontos diretamente relacionados: (i) as estruturas reliquias de taludes na interface solo/rocha (solo residual com rocha alterada mole e dura) ou em maciço constituído por rocha extremamente alterada e com estruturas geológicas preservadas, apresentam riscos de ruptura do talude e, desta forma, (ii) deve-se aplicar a análise cinemática, normalmente empregada em taludes rochosos são, para avaliar especialmente esse risco.

Finalmente, é importante, frisar que os resultados alcançados no presente estudo permitiram compreender as rupturas já encontradas nos taludes escavados, decorrente da ruptura instalada na foliação e associada ao plano da superfície de corte, levantando a atenção dos executores da obra quanto à segurança do talude.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) ao suporte durante a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

SANTOS, D. D. et al. *Análise cinemática em talude de pedreira desativada em Pacatuba, região metropolitana de Fortaleza*. 2018.

FIORI, A. P. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 276 p. ISBN 978-85-7975-184-4.

HOEK, E.; BRAY, J. D. *Rock slope engineering*. [S.l.]: CRC Press, 1981.

JULIANI, C.; BELJAVSKIS, P. Revisão da litoestratigrafia da faixa são roque/serra do itaberaba (sp). *Revista do Instituto Geológico*, v. 16, n. 1-2, p. 33–58, 1995. Tradução. Disponível em:<<https://doi.org/10.5935/0100-929x.19950003>>.

FUTAI, M. M.; JUNIOR, M. O. C.; ABRAMENTO, M. Resistência ao cisalhamento e deformabilidade de solos residuais da região metropolitana de são paulo. In: NEGRO, A. e. a. (Ed.). *Twin cities: solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba*. São Paulo: ABMS, 2012. p. 155–187.