

Análise da solução de estabilidade de um talude localizado na Rodovia PR-418, Curitiba-PR

Ana Carolina Colombo

Engenheira Civil, Universidade Paulista - UNIP, Curitiba, Brasil, anacolombo@yahoo.com.br

Silvrano Adonias Dantas Neto

Doutor, Professor Associado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, silvrano@ufc.br

RESUMO: O presente artigo tem como finalidade apresentar e verificar a estabilidade de um talude localizado na Rodovia PR-418, região contorno Norte, Curitiba PR. A análise foi feita inicialmente por uma empresa contratada pelo governo do Paraná, o qual disponibilizou o estudo e projeto para desenvolvimento deste trabalho. Empregando-se os métodos determinísticos, a avaliação da estabilidade do talude foi realizada mostrando que sua segurança é satisfatória, apesar de algumas ressalvas. Além da análise de estabilidade pelo software *Slide*, da empresa *Rocscience*, utilizou-se o software *Phase²*, da mesma empresa, baseado no método de elementos finitos, onde foram simuladas as fases de construção de uma das soluções definidas previamente pela empresa em projeto, com intuito de analisar as deformações em cada etapa, verificando a funcionalidade da solução. Os resultados obtidos por esta análise numérica mostraram que as deformações previstas para o maciço estão dentro dos limites esperados para a obra, porém com o aparecimento de uma possível instabilidade quando analisada pelo método de elementos finitos. Concluindo então que uma análise por equilíbrio limite associada a uma simulação de deformações, apresenta dados mais completos, e embasa as soluções escolhidas, adicionando maior segurança, e confiabilidade aos projetos de estabilidade de taludes que normalmente vem de adoções ou variabilidade de parâmetros, em casos únicos e com condicionantes especiais.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade de taludes, análise tensão x deformação, equilíbrio limite.

ABSTRACT: The present article aims to present and verify the stability of a slope located on Highway PR-418, contour region North, Curitiba PR. The analysis was made initially by a company contracted by the government of Paraná, which made available the study and project for the development of this work. Using the deterministic methods the slope stability evaluation was performed showing that its safety is satisfactory, despite some caveats. In addition to the stability analysis by Rocscience software Slide, the Phase² software of the same company, based on the finite element method, was used to simulate the construction phases of one of the solutions previously defined by the to analyze the deformations in each step, verifying the functionality of the solution. The results obtained by this numerical analysis showed that the expected deformations for the mass are within the limits expected for the work, but with the appearance of a possible instability when analyzed by the finite element method. We conclude that a limit equilibrium analysis associated with a deformation simulation presents more complete data, and bases the chosen solutions, adding greater safety and reliability to the slope stability projects that usually come from adoptions or parameter variability in single cases and with special conditions.

KEYWORDS: slope stability, stress x strain analysis, equilibrium limit.

1 Introdução

A análise de estabilidade de taludes é um tema de extrema importância e está ligado a área da geotecnia, tendo em vista que urbanização intensa leva ao crescimento desordenado das cidades em áreas, muitas vezes, com condicionantes geológicos desfavoráveis à ocupação e que as intervenções antrópicas nestes terrenos, tais como, cortes, aterros, remoção de vegetação, alterações de drenagem efetuadas sem a implantação de infraestrutura adequada, aumentam as condições de instabilidade.

Em taludes rodoviários, sejam eles naturais ou compostos por corte e aterro, os problemas de instabilidade são cada vez mais frequentes, resultando em movimentações de massa que causam além de danos materiais, interrupções no tráfego, o que resulta em prejuízos de grande monta para os usuários e o poder público (CARVALHO, 1991).

Durante o início do século XX, paralelo ao aumento populacional, iniciaram-se inúmeros estudos com objetivo de desenvolver métodos de análise para mensurar a resistência dos taludes, com foco na estabilidade.

Dentre os tipos de abordagem para análises de estabilidade, do ponto de vista determinístico, existem dois tipos de abordagem, a Teoria de Equilíbrio Limite, baseados conceitualmente no equilíbrio de esforços gerados por diagramas de pressões aparentes que constituem a base de cálculo convencional para projetos de contenções e o Método de Elementos Finitos que modernamente é incorporado a programas computacionais, e vem sendo uma alternativa na prática corrente de projetos, possibilitando uma análise ampla do problema e a determinação de sollicitação, deslocamentos e esforços nos elementos estruturais.

Para uma maior compreensão das análises de estabilidade, e de cada caso em específico entende-se que a comparação das análises dos métodos determinísticos, Equilíbrio Limite e Elementos Finitos, são de suma importância. Pois apresenta um banco de dados mais completo, e embasam a solução escolhida para cada caso, adicionando maior segurança e confiabilidade aos projetos de estabilidade de taludes que normalmente já dependem de adoções e/ou variabilidade de parâmetros de resistência.

Este artigo tem a pretensão de analisar, por diferentes métodos, um talude localizado na Rodovia PR 418, que teve movimentação em junho de 2013, e foi estudado por uma empresa contratada pelo DER-Paraná, para elaborar o projeto de estabilização em 2014, de onde, foram obtidos os parâmetros utilizados nas análises deste trabalho. Ressalta-se que a intenção deste trabalho é a comparação de métodos de análises, portanto não serão apresentados condicionantes e descrições aprofundadas do estudo de caso utilizado, bem como o nome da empresa supracitada, logo que não o presente trabalho não tem intenção comercial.

A utilização dos Métodos de Equilíbrio Limite e de Elementos Finitos via *software*, possibilitará a comparação destes, chegando a conclusões sobre sua utilização, bem como, suas vantagens e desvantagens, para esse estudo de caso em específico. Sobre a solução adotada, há a intenção de comparar os estudos de estabilidade realizados pela empresa contratada em 2014, por métodos de Equilíbrio Limite, com a análise a ser realizada pelo método Elementos Finitos, da mesma solução, possibilitando assim a aferição desta.

2 Análise de estabilidade

Gerscovich (2016) define talude como “qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha.” Havendo a possibilidade de ser natural, também denominado encosta, ou construído, como cortes e aterros.

A propensão dos taludes naturais a instabilidade é alta, tendo em vista que as ações das forças da gravidade contribuem naturalmente para o movimento de massa. A instabilidade das encostas é consequência da própria dinâmica de evolução, com o avanço dos processos físicos químicos de alteração das rochas, há a diminuição de resistência do material, e dependendo das condições topográficas, gera-se uma situação de ruptura (GERSCOVICH, 2016).

A análise de estabilidade envolve um conjunto de procedimentos visando a determinação de um índice ou de uma grandeza que permita quantificar o quão próximo de ruptura um determinado talude ou

uma encosta se encontra, num determinado conjunto de condicionantes atuantes (pressões neutras, sobrecargas, geometria, natureza do terreno, etc.) (OLIVEIRA; BRITO, 1998).

De acordo com Oliveira e Brito (1998), os métodos de análise se dividem em:

- Métodos analíticos (determinísticos): são baseados na teoria do equilíbrio limite, e nos modelos Matemáticos de tensão e deformação;
- Métodos experimentais: empregando modelos físicos de diferentes escalas;
- Métodos observacionais: com base na experiência acumulada com a análise de rupturas anteriores (retroanálise, ábacos de projetos, opinião de especialistas).

2.1 Métodos Determinísticos

Para Gerscovich (2016) o objetivo dos métodos determinísticos é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa em um talude. Realizando a análise através da comparação entre a tensão cisalhante mobilizada com a resistência ao cisalhamento, definindo assim o fator de segurança apresentado na Equação (1).

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

A partir dos valores obtidos para o fator de segurança à ruptura de um talude, pode-se definir as seguintes situações:

- $FS > 1$ – obra estável
- $FS = 1$ – ocorre ruptura pois toda a resistência do solo é mobilizada
- $FS < 1$ – não tem significado físico, mas indica também um mecanismo de instabilidade da massa de solo.

2.2 Métodos Baseados em Análises Tensão x Deformação

“Os métodos baseados na análise tensão x deformação são realizados com o auxílio de programas computacionais, baseados nos métodos de elementos finitos ou das diferenças finitas.” (GERSCOVICH, p. 92, 2016).

Para Gerscovich (2016) a grande vantagem desse método está no fato de os programas disponíveis no mercado possibilitarem a interação de várias características dos materiais, como por exemplo:

- não linearidade da curva tensão x deformação;
- anisotropia;
- não homogeneidade;
- influência do estado inicial de tensões;
- etapas construtivas.

2.3 Métodos de Equilíbrio Limite

O método de análise por equilíbrio limite consiste na determinação do equilíbrio de uma massa ativa de solo, a qual pode ser delimitada por uma superfície de ruptura circular, poligonal ou de outra geometria qualquer. O método assume que a ruptura se dá ao longo de uma superfície e que todos os elementos ao longo desta superfície atingem a condição de FS, simultaneamente. Nesse método é necessário arbitrar-se uma determinada superfície potencial de ruptura, o solo acima dessa superfície é considerado um corpo livre e deve ser dividido em fatias. O equilíbrio é calculado para cada fatia pelas equações da estática. O

equilíbrio de momentos é feito comparando os momentos estabilizantes e instabilizantes, sendo a tensão cisalhante mobilizada uma das incógnitas (GERSCOVICH, 2016).

A vantagem do método do equilíbrio limite está na sua simplicidade e precisão dos resultados, porém é necessário adotar algumas premissas que conferem ao solo um comportamento não condizente com a realidade (GERSCOVICH, 2016).

Para Massad (2016), o método de equilíbrio limite parte dos seguintes pressupostos:

- o solo se comporta como um material rígido-plástico, ou seja, rompe bruscamente sem deformar;
- as equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência da ruptura, quando na realidade, o processo é dinâmico;
- o FS é constante ao longo da linha de ruptura, ou seja, ignora eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

3 Estudo de Caso

O talude localizado na Rodovia PR 418, Contorno Norte de Curitiba-PR, no km 2 + 200, foi alvo de instabilizações em 2013, necessitando de intervenção. Para tal, contratou-se uma empresa que realizou estudos resultantes em um projeto de contenção para o local. O presente artigo utilizou-se dos dados levantados neste estudo/projeto pela empresa contratada, com objetivo de comparar métodos de estabilidade, e verificar a funcionalidade da solução geotécnica adotada como contenção.

O trabalho objetiva apenas a análise de estabilidade do talude, e comparações referente aos métodos, portanto apenas foram extraídos do estudo a geometria utilizada na análise, parâmetros de resistência oriundos de ensaios e comparações, e os dados geológicos.

A Figura 1 indica os pontos de investigação do subsolo, e através de marcação circular a localização do talude analisado.



Figura 1: Localização Talude Km 2+200 PR 418

3.1 Parâmetros geotécnicos utilizados

Os parâmetros utilizados no presente artigo foram obtidos a partir de correlações com resultados de ensaios SPT e DPL fornecidos pela empresa responsável pelos estudos de estabilização, e são apresentados na Tabela 1. A Figura 2 ilustra o perfil geotécnico do talude, resultante de investigações e dos ensaios realizados, bem como sua geometria, e os parâmetros a serem utilizados nas análises, respectivamente.

Tabela 1: Parâmetros geotécnicos

Camada	Peso Específico (KN/m ³)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (KN/m ²)	Peso saturado (KN/m ³)
Capa	16	28	6	18
Silte	16	28	12	18

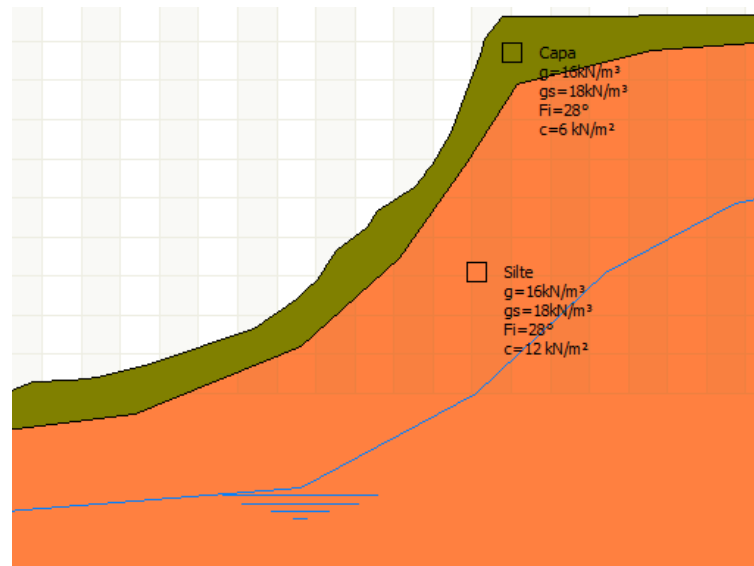


Figura 2: Perfil geotécnico do talude analisado

3.2 Análise de estabilidade

As análises por equilíbrio limite foram feitas utilizando o software *Slide* da empresa *Rocscience* pelo método de *Spencer*. Foram analisados as seguintes seções:

- talude natural sem intervenções (Natural);
- talude após as obras de intervenção executadas (Final).

Extraíu-se as geometrias das seções utilizadas de levantamentos topográficos executados pela empresa supracitada, utilizando coordenadas disponíveis em tabelas, apresentadas em relatórios entregues ao Governo do Paraná. Executou-se a inserção de pontos manualmente, por seção individual, utilizando-se dos parâmetros apresentados em tópico anterior do presente artigo, resultando em Fatores de Segurança, que estão apresentados na Tabela 2. As Figuras 3 e 4 mostram as superfícies potenciais de ruptura obtidas para as seções analisadas e os respectivos fatores de segurança.

Tabela 2: Fatores de Segurança Equilíbrio Limite

Seção	FS
Natural	0,9
Final	1,7

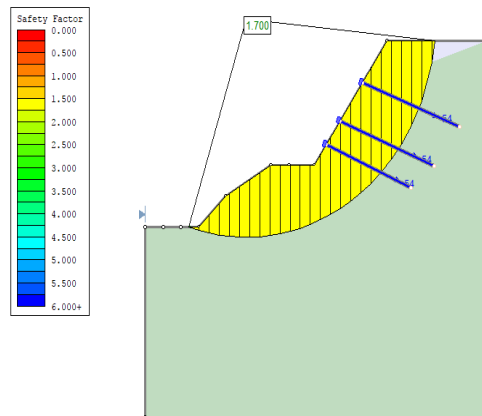


Figura 3: Seção Final - Análise Equilíbrio Limite

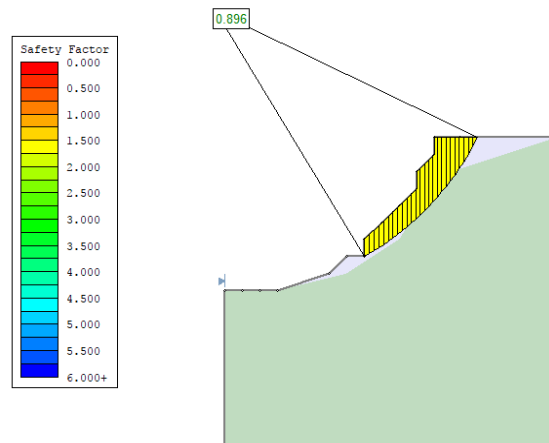


Figura 4: Seção Natural - Análise Equilíbrio Limite

Executou-se a análise de tensões x deformações com o *software Phase²* da *Rocscience* utilizando o método dos elementos finitos para resolver as soluções governantes de forma a se calcular o fator de segurança à ruptura por meio da redução dos parâmetros. Os fatores de segurança obtidos a partir da análise tensão x deformação (Griffiths e Lane, 1999), realizadas estão apresentados na Tabela 3 e nas Figuras 5 e 6.

Tabela 3: Fatores de Segurança Análise de Tensões

Seção	FS
Natural	0,7
Final	1,4

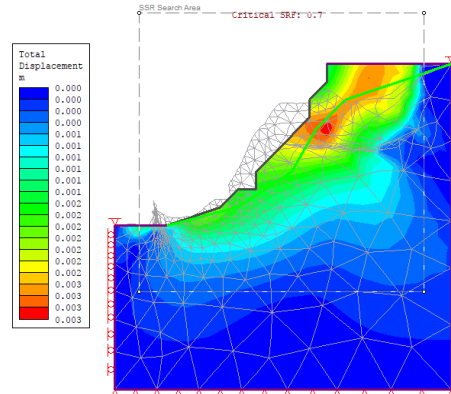


Figura 5: Seção Natural - Análise de Tensões

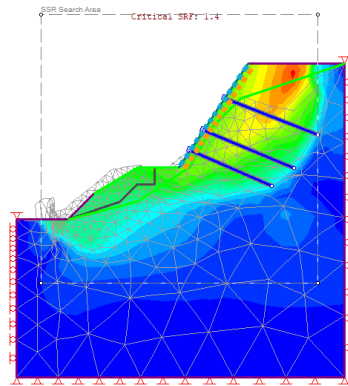


Figura 6: Seção Final - Análise de Tensões

4 Comparação e discussão dos resultados

É de total concordância que a estabilidade do maciço pode ser analisada por ambos os métodos satisfatoriamente, conforme Tabela 4 e Figura 7 apresentados a seguir.

Tabela 4: Comparação dos Fatores de Segurança

Seção	Equilíbrio Limite	Análise de Tensões
Natural	0,9	0,7
Final	1,7	1,4

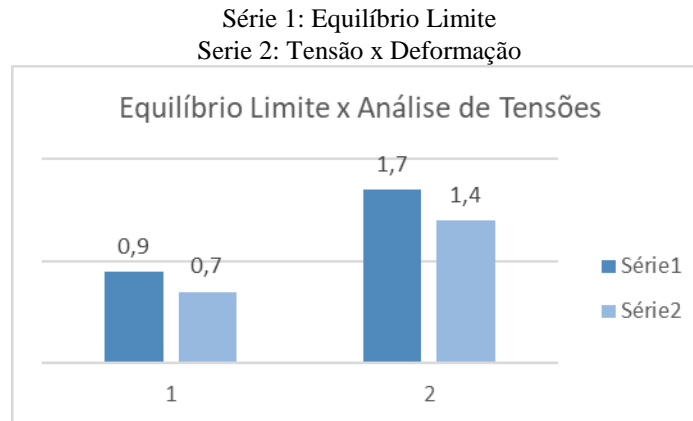


Figura 7: Comparação dos Fatores de Segurança

Em uma análise inicial entende-se que método de equilíbrio limite fornece a análise de estabilidade de forma mais simples e com maior facilidade no lançamento de dados, porém resulta em um menor grau de detalhamento informativo e gráfico, gerando FS maiores, distanciando-se mais da realidade de campo.

Já a análise de tensões, torna-se mais complexa, elevando o grau de detalhamento, tanto de parâmetros de entrada, quanto graficamente. A possibilidade de inserção combinada de elementos estruturais (solo grampeado, neste caso) é de grande valia para aproximação do real funcionamento da estrutura.

Destacando-se em relação ao método de equilíbrio limite, o método de análise de tensões não só executa a análise de estabilidade como também ilustra graficamente as tensões e deformações do solo, tornando visíveis possíveis movimentações e suas prováveis direções. Função essa, que é de grande valia em projetos geotécnicos, adicionando maior segurança e confiabilidade nas decisões. Neste estudo de caso, a visualização de deformações no maciço indicou um ponto de possível ruptura, posterior a implantação da contenção, conforme a Figura 8, informação que deveria ser considerada no estudo/projeto de estabilização.

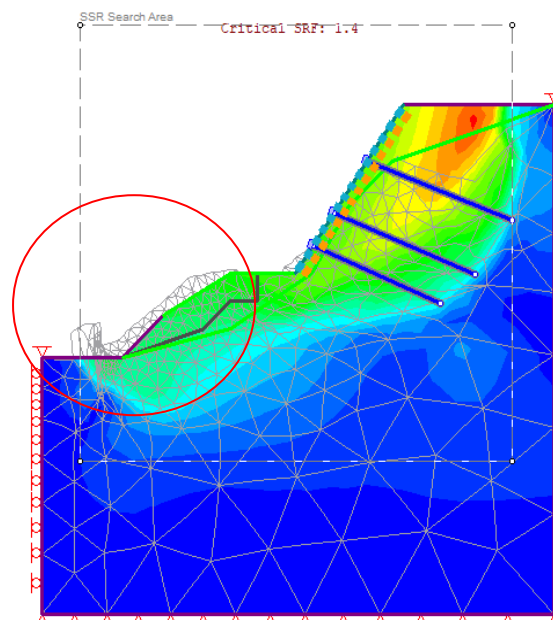


Figura 8: Ponto de possível movimentação na Seção Final

Os valores reduzidos dos fatores de segurança obtidos com o método de análise de tensões, em relação aos valores obtidos pelo método de equilíbrio limite, podem ser atribuídos à maior complexidade do método, a associação de maior número de variáveis, naturalmente resulta em uma análise considerada mais completa e mais próxima da realidade local.

5 Conclusão

A captação de dados geotécnicos para a análise de estabilidade foi executada com êxito, os dados utilizados foram coletados da íntegra do estudo realizado no local pela empresa, possibilitando as análises de estabilidade.

Com as análises de estabilidade por equilíbrio limite e análise de tensões finalizadas, concluiu-se que ambos os métodos analisam a estabilidade satisfatoriamente, porém o método de análise de tensões fornece um leque maior de informações e aceita uma entrada maior e mais detalhada de dados, chegando à resultados mais próximos a realidade.

Na comparação entre os métodos é imprescindível citar a maior facilidade de inserção das seções no *software Slide*, baseado em Equilíbrio limite, bem como maior rapidez nas análises, em contrapartida também apresenta baixo grau de detalhamento de parâmetros e resultados. É, sem dúvida, um método simples graficamente, ideal para aplicação em estudos prévios e pré-projetos.

Oposto a isso, o *software Phase²* baseado em análise de tensões exige um maior grau de detalhamento das seções e dos parâmetros inseridos, analisando não apenas a estabilidade, mas simultaneamente o comportamento das tensões/deformações da massa de solo. A análise torna-se mais complexa e com isso mais lenta, porém o resultado é considerado mais próximo do real comportamento da encosta, e possibilita a visualização gráfica, não só da seção do rompimento, ou da contenção, mas de todas as fases construtivas e a influência que a aplicação de tensão ou alívio dela, traz para o maciço, o que, sem dúvidas, é uma informação de grande valia para projetos geotécnicos.

Com relação a solução geotécnica adotada pela empresa, esta apresentou-se satisfatória no ponto de execução da contenção, com base nas análises por elementos finitos. Porém, na seção final analisada, surgiu um possível ponto de movimentação na base do talude, situação que não surgiu nas análises por equilíbrio limite, método utilizado pela empresa. Entendeu-se ser de grande importância a avaliação deste fator, e sua não consideração pode vir a comprometer a estabilidade do local novamente.

Por fim, conclui-se que embora ambos os métodos sejam considerados satisfatórios, para um projeto executivo de contenção, o método de análise de tensões fornece maior quantidade de informações, analisando o caso em sua totalidade, e garantindo maior segurança e confiabilidade as decisões do engenheiro geotécnico.

AGRADECIMENTOS

O maior agradecimento sempre será a Deus, que está sempre presente. Agradeço imensamente meus pais, Jane e Edilson Colombo, meu irmão, Junior e minha família em um todo, pelo apoio e suporte. E ao meu professor orientador e segundo autor deste artigo que além de repassar seu conhecimento, faz isso com amor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11682. *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro.
- Carvalho, P. A. S., Freitas, C. G. L., Wolle, C. M., Gama Junior, G. F. C., Barros, J. M. C., Cunha, M. A. C., et al. (1991), *Manual de geotecnia: taludes de rodovias ; orientacao para diagnostico e solucoes de seus problemas*. São Paulo: Ipt.



- Gerscovich, D. M. S. (2016) *Estabilidade de taludes*, 2. ed., Rio de Janeiro, Oficina de textos, Brasil, 192 p.
- Griffiths, D. V., Lane P. A (1999), *Slope stability analysis by finite elements*. Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA. In: *Geotechnique*, 49, n. 3, pp. 387-403.
- Guidicini, G.; Nieble, C. M. (1983), *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo, Blucher, Brasil.
- Massad, F. (2016), *Obras de terra: curso básico de geotecnia*, 3. ed., São Paulo, Oficina de textos, Brasil, 216 p.
- Oliveira, A. M. S., Brito, S. N. A. (1998) *Geologia de Engenharia*, 1. ed. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia e Engenharia, Brasil, 586 p.