



Avaliação de Pressões em Estruturas Enterradas com Modelagem Numérica Através do Programa Plaxis

Kamila Andreia Alves Novo¹, Sergio Hampshire de Carvalho Santos²

¹UFRJ / mila.tqr@poli.ufrj.br

²UFRJ / Estruturas / sergiohampshire@gmail.com

Resumo

Os projetos de estruturas enterradas são caracterizados pela atuação do solo como um elemento estrutural de grande volume. Estes tipos de obras se tornam mais complexos do que as obras de estruturas de superfície, uma vez que o solo apresenta propriedades que dependem de diversos fatores, como temperatura, rocha de origem e relevo do local. Além disso, a dificuldade de se definir a geometria e a vinculação solo-estrutura adequadas resulta em modelos teóricos com muitas incertezas associadas, sendo necessário validar alternativas para estas análises.

O objetivo do trabalho consiste em comparar alternativas aos métodos clássicos para o cálculo da distribuição de tensões do solo. A estrutura analisada é uma galeria subterrânea de passagem de água. A avaliação será realizada com o programa computacional PLAXIS, com elementos triangulares 2D de 15 nós, e será comparada com o método clássico de Rankine.

São analisadas oito situações para o modelo estudado. Em um primeiro momento, o topo da galeria é posicionado a 30 metros do nível do terreno, em solo arenoso. E em seguida, o topo da galeria é posicionado a 50 metros do nível do terreno. Para cada uma das situações anteriores, serão analisadas duas condições iniciais: nível d'água abaixo do fundo da galeria e nível d'água no topo da galeria. Por fim, o mesmo estudo será realizado considerando o solo argiloso.

A partir das análises foi constatado que os resultados extraídos do programa PLAXIS apresentaram uma concentração de tensões na região em que a galeria foi instalada. Já os modelos analisados pelo método de Rankine não levam em consideração a rigidez dos materiais, logo apresentam como resultado uma distribuição linear dos esforços. Os modelos analisados considerando o solo arenoso apresentaram variações menores das resultantes de tensões totais entre os dois métodos estudados. Já para solos argilosos, essa diferença foi maior.

Palavras-chave

Estruturas; Galerias Subterrâneas; Empuxo; Modelagem Numérica.

Introdução

As estruturas subterrâneas podem ser classificadas, quanto ao processo construtivo, em construídas a céu aberto ou túneis. As estruturas construídas acima do nível do terreno e em seguida enterradas ou aterradas são classificadas como construídas a céu aberto, e provocam destruição da superfície. Já as construídas abaixo do nível do terreno, sem destruição da superfície, são classificadas como túneis.

Instalações de dutos de fornecimento de energia, de sistemas de comunicação e de água, elementos que compõem o sistema de drenagem pluvial ou esgotamento sanitário, subsolos de edifícios e passagens subterrâneas são exemplos de estruturas enterradas. As figuras 1 e 2 a seguir mostram o subsolo do Theatro Municipal de São Paulo e o Projeto G-Cans, situado no subsolo de Tóquio, que são a maior galeria subterrânea do mundo e o maior sistema de drenagem construído pelo homem, respectivamente.

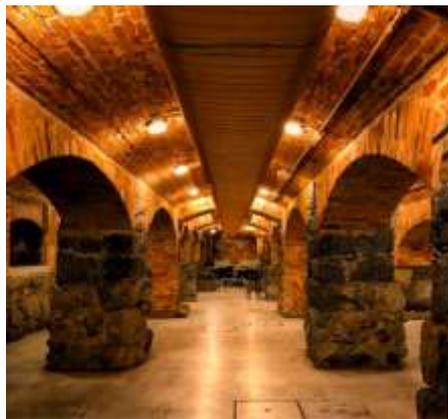


Figura 1 – Subsolo do Theatro Municipal de São Paulo.



Figura 2 – Projeto G-Cans, galeria de drenagem em Tóquio.

As galerias subterrâneas são passagens, abaixo do nível do terreno, destinadas ao escoamento de água e esgoto e serão objeto de estudo neste trabalho. Ao se verificar a estabilidade e dimensionar estas estruturas, a solicitação do solo no seu entorno deve ser considerada por meio de uma distribuição de tensões, cuja resultante é denominada empuxo do solo. Considerando o solo como homogêneo, esta distribuição de tensões nas superfícies da estrutura em contato com o solo varia com a profundidade.

O estudo do solo onde a estrutura será posicionada é realizado por meio de investigações geotécnicas, com sondagens e ensaios de laboratório. Por meio destas investigações, é possível conhecer algumas propriedades e condições deste solo, como por exemplo, sua tensão admissível, a posição do lençol freático e suas camadas constituintes. Essas informações são importantes para a determinação das cargas verticais e horizontais efetivas e sua distribuição ao longo das camadas do solo.

O efeito do solo sobre a estrutura é estimado usando os conceitos da Teoria da Elasticidade, que considera a relação entre tensões e deformações do solo. Métodos clássicos baseados nesta teoria, como os de

Coulomb e de Rankine, permitem a determinação das pressões de empuxo de terra por meio de soluções analíticas. A distribuição de tensões horizontais depende das condições de deformação do solo, que por sua vez, dependem de seu estado de tensões.

No caso em que a massa de solo está em equilíbrio perfeito, sem deformação, o empuxo atuante sobre a estrutura será o de repouso que, neste caso, é calculado com base nas constantes elásticas do material e não depende da resistência ao cisalhamento do solo. Já em estruturas com deslocamento no plano de contenção, as resistências internas ao cisalhamento são ativadas e produzem o estado ativo ou passivo do empuxo.

Os métodos clássicos são desenvolvidos considerando-se hipóteses ideais em suas formulações, como por exemplo, o terrapleno constituído por uma camada única e contínua do solo, horizontal e sem sobrecargas. Por esse motivo, não apresentam resultados precisos, apesar de serem conservadores por utilizarem coeficientes superestimados. A incerteza do ponto de aplicação da resultante do diagrama de tensões horizontais, também se apresenta como um fator de imprecisão nos cálculos.

O método de Rankine para a determinação da distribuição de tensões horizontais em uma estrutura baseia-se nas seguintes hipóteses:

- O solo não é coesivo (a coesão é nula) e está emerso
- A superfície do terreno é horizontal
- A estrutura que recebe as tensões horizontais é vertical e rígida
- O atrito entre o solo e a estrutura é nulo
- O solo é homogêneo e isotrópico

A tensões horizontais efetivas nos estados ativo e passivo são iguais a:

$$\sigma'_{ha} = K_a \sigma'_{va} = K_a \gamma Z \quad (1)$$

$$\sigma'_{hp} = K_p \sigma'_{vp} = K_p \gamma Z \quad (2)$$

O parâmetro γ corresponde ao peso específico da camada de solo (FERNANDES, 2014). No estado ativo, a tensão horizontal alcança o seu valor mínimo. No gráfico de Mohr isso corresponde ao semicírculo tangenciado pela reta de ruptura do solo e com tensão horizontal menor que a vertical. Nesta condição, a razão entre tensão efetiva horizontal e a tensão efetiva vertical é definida pelo coeficiente de empuxo ativo K_a .

$$K_a = \frac{\sigma'_{ha}}{\sigma'_v} \quad (3)$$

Já no estado passivo, a tensão horizontal efetiva alcança o seu valor máximo, representado no círculo de Mohr pelo semicírculo tangenciado pela reta de ruptura do solo e com tensão horizontal maior que a vertical. Assim como no caso anterior, o coeficiente de empuxo passivo, K_p , é definido como a razão entre a tensão efetiva horizontal e a tensão efetiva vertical.

$$K_p = \frac{\sigma'_{hp}}{\sigma'_v} \quad (4)$$

Em ambos os casos a direção das superfícies de ruptura faz um ângulo de $45^\circ - \frac{\varphi'}{2}$ com a direção da tensão principal máxima, que no caso ativo é a tensão vertical e no passivo é a horizontal. Sendo assim, os coeficientes de empuxo podem ser determinados em função do ângulo de atrito, como (GERSCOVICH, 2010):

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) \quad (5)$$

$$K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) \quad (6)$$

O coeficiente de empuxo em repouso depende dos parâmetros geotécnicos do solo e pode ser determinado por ensaios de laboratório e de campo ou avaliado pela Teoria da Elasticidade ou por correlações

empíricas. Será utilizada neste trabalho a equação de Jaky (1944), no qual o coeficiente de empuxo depende do ângulo de atrito do solo.

$$K_0 = 1 - \text{sen}\varphi' \quad (7)$$

A tensão horizontal efetiva atuante, portanto, pode ser obtida por meio da equação:

$$\sigma'_{ho} = K_0 \sigma'_{vo} \quad (8)$$

onde σ'_{vo} é a tensão vertical efetiva no estado de repouso.

Segundo CAPUTO (2015), as perturbações inerentes à abertura de túneis, com a conseqüente deformação na parte superior do maciço, resultam em tensões de cisalhamento ao longo de superfícies de escorregamento, tais como as definidas pelas linhas ABC da figura 3. Com isso, desenvolve-se o “efeito de arco” e parte do peso da zona BBCC é transferida para as zonas adjacentes do maciço, aumentando as pressões verticais. Sobre o coroamento da galeria, a pressão é diminuída, como pode ser observado na figura 4.

Este efeito ocorre somente até a altura de aproximadamente de 4 a 6 vezes a largura da galeria. Logo, em galerias profundas, até a profundidade $H - (\sim 4L)$ as pressões se distribuem como em um maciço em repouso, e a partir dessa profundidade apresenta-se o efeito de arco, com conseqüente diminuição de pressão sobre o coroamento da galeria.

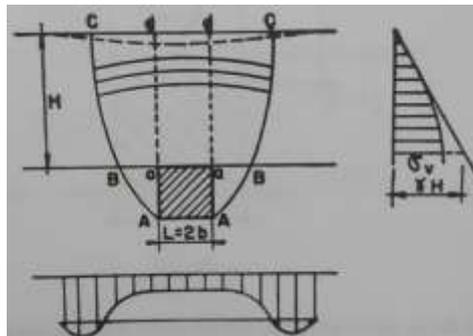


Figura 3 – Distribuição de tensões horizontais de maciço em repouso (CAPUTO, 2015).

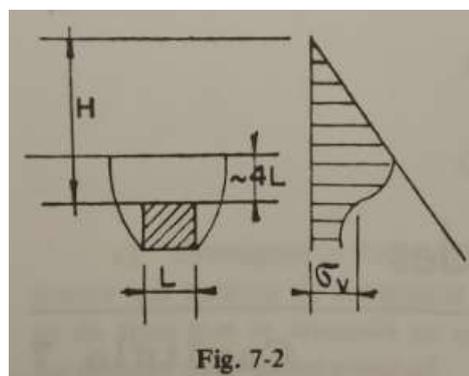


Figura 4 – Distribuição de tensões horizontais no efeito de arco (CAPUTO, 2015).

Devido às limitações e imprecisões dos processos clássicos em grandes profundidades e com a presença de estruturas de maior rigidez comparadas à do solo, é necessário definir outras formas mais precisas para a determinação dos esforços do solo sobre estruturas enterradas. O conhecimento destas tensões é importante para garantir a segurança e a economia do projeto.

Soluções baseadas no Método dos Elementos Finitos são muito utilizadas na Engenharia Civil. Este método consiste em discretizar a estrutura em pequenas regiões (malhas de elementos finitos), aplicando

funções pré-definidas para interpolar resultados obtidos em pontos discretos do domínio de integração (pontos nodais). Resultados cada vez mais precisos podem ser obtidos, com um refinamento maior da malha de elementos finitos.

A discretização da estrutura deve cumprir com as seguintes condições:

- A reunião de todos os elementos forma um domínio aproximado do domínio original;
- Os elementos não se sobrepõem;
- Os vértices de um elemento nunca ocorrem no lado de outro elemento, conforme ilustrado na figura 5 (GIACCHINI, 2012).

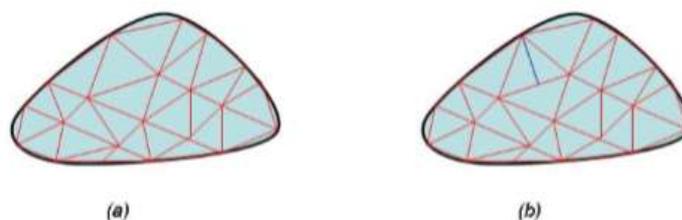


Figura 5 – (a) Exemplo de malha em material genérico; (b) Exemplo de malha em material genérico não permitida (GIACCHINI, 2012).

O Método dos Elementos Finitos precisa atender a duas condições dentro dos elementos: equilíbrio de forças e compatibilidade dos deslocamentos. Estas condições podem ser garantidas pelo método dos deslocamentos, no qual os deslocamentos nodais são as incógnitas, ou pelo método das forças, em que estas são as forças nodais (OLIVEIRA, 2015).

O programa computacional PLAXIS (2018) utiliza o método dos elementos finitos para a análise de problemas geotécnicos. São utilizadas as teorias geotécnicas da deformação, do fluxo de água e da consolidação, com suas respectivas formulações pelo método dos elementos finitos.

Neste trabalho, foi utilizada a versão 8.2, em ambiente Windows. A estrutura do PLAXIS se divide em quatro subprogramas: Entrada de dados (input), Cálculos (calculation), Resultados (output) e Curvas (curves).

No programa PLAXIS, os modelos foram os seguintes:

- Mohr-Coulomb, com a galeria à profundidade de 30 metros.
- Mohr-Coulomb, com a galeria à profundidade de 50 metros.

Pelo método de Rankine, foram analisados os seguintes modelos:

- Galeria a uma profundidade de 30 metros.
- Galeria a uma profundidade de 50 metros.

Essas profundidades são consideradas a partir do nível do terreno ao topo da galeria.

Todos os modelos foram processados com propriedades pré-definidas dos materiais constituintes do solo e da estrutura. Essas propriedades são apresentadas na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais.

Propriedades dos materiais			
Solo	Tipo de Solo	Areia	Argila
	Peso Específico Saturado [kN/m ³]	18	14
	Coesão	0	5
	Ângulo de Atrito (°)	30	25
	Coefficiente de Poisson	0,3	0,35
	k ₀	0,5	0,577
Água	Peso Específico [kN/m ³]	10	
Estrutura	Rigidez à Flexão	1,40E+05	
	Rigidez Axial	1,40E+07	
	Coefficiente de Poisson	0,15	

A espessura equivalente da galeria é dada por:

$$d_{eq} = \sqrt{12 \times \frac{EI}{EA}} = \sqrt{12 \times \frac{1,40 \times 10^5}{1,40 \times 10^7}} \cong 0,35 \text{ metros}$$

Todos os modelos foram calculados no estado plano de tensões, no plano XY e com elementos de quinze nós.

A galeria foi modelada de forma que sua escavação se assemelhasse ao método de NATM, com aproximadamente 10 metros de diâmetro, sendo realizada em duas fases, com uma camada intermediária provisória de concreto projetado. Na primeira fase, a camada de solo no interior da parte superior do túnel foi desativada, e as camadas de concreto ao redor foram ativadas, como ilustrado na figura 6 a seguir:

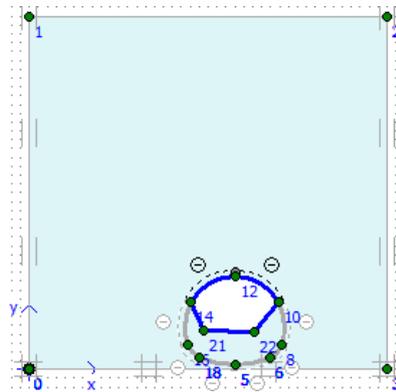


Figura 6 – Primeira etapa de escavação no programa PLAXIS.

Na segunda fase, a camada intermediária de concreto foi desativada, assim como o solo restante no interior da seção da galeria, e as paredes de concreto foram ativadas, completando o anel de sustentação. A figura 7 ilustra a segunda fase.

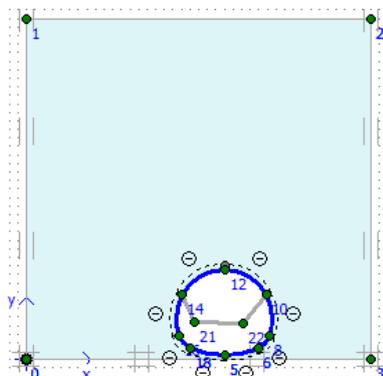


Figura 7 – Segunda etapa de escavação no programa PLAXIS.

No comando select points for curves (seleção de pontos para curvas), foram selecionados pontos próximos à parede da galeria, como ilustrado na figura 8 a seguir.

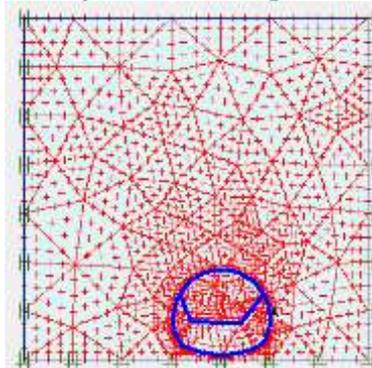


Figura 8 – Ponto selecionado para a geração de curvas de tensão e deformação.

Em seguida, foram realizados cortes verticais próximos à parede lateral da galeria, tendo em vista verificar a distribuição de tensões horizontais. Foram estudadas as tensões horizontais totais, efetivas e as poropressões, para os estados de nível d'água no topo da superfície e abaixo da galeria.

Por fim, foram realizados cortes horizontais no topo da galeria, com o objetivo de visualizar a distribuição de tensões verticais. As linhas de corte são mostradas na figura 9 a seguir.

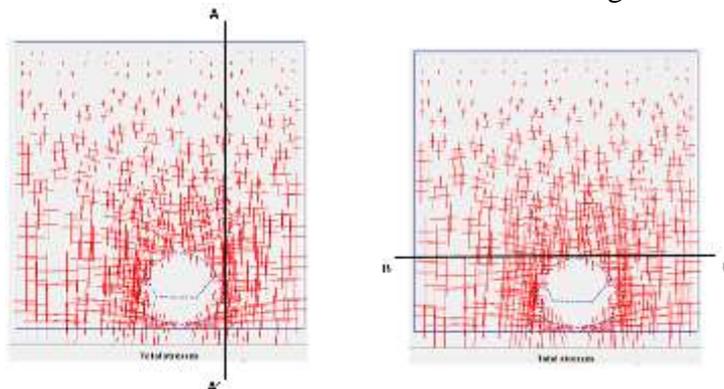


Figura 9 – Linhas de corte vertical e horizontal, respectivamente.

Conclusões

Serão apresentadas nas tabelas a seguir, para cada situação estudada, as tensões efetivas e totais, extremas e as resultantes, obtidas pelo método de Rankine e pelo método numérico por meio do PLAXIS. Em seguida, é calculada a variação dos valores de tensões totais resultantes entre os dois métodos.

- Solo Arenoso

Tabela 2 – Tensões em solo arenoso com NA abaixo da galeria.

Areia	Tensões Horizontais - NA abaixo da galeria							
	Tensão Efetiva				Tensão Total			
	Extrema [kN/m ²]		Resultante [kN/m]		Extrema Total [kN/m ²]		Resultante [kN/m]	
Prof. (m)	Rankine	Plaxis	Rankine	Plaxis	Rankine	Plaxis	Rankine	Plaxis
40	360	373,63	7200	7290	360	373,63	7200	7290
60	540	545,57	16200	15940	540	545,57	16200	15940



XII CONGRESSO BRASILEIRO
de PONTES e ESTRUTURAS
7 a 11 de junho de 2021 - Congresso Virtual

Tabela 3 – Variação de tensões totais com NA abaixo da galeria.

Tensão Total - Resultante [kN/m]				
Prof. (m)	Rankine	Plaxis	Variação	%
40	7200	7290	0,012	1,2
60	16200	15940	0,016	1,6

Tabela 4 – Tensões em solo arenoso com NA na superfície.

Areia	Tensões Horizontais - NA na superfície do terreno							
	Tensão Efetiva				Tensão Total			
	Extrema [kN/m ²]		Resultante [kN/m]		Extrema [kN/m ²]		Resultante [kN/m]	
Prof. (m)	Rankine	Plaxis	Rankine	Plaxis	Rankine	Plaxis	Rankine	Plaxis
40	160	238,2	3200	3910	560	620,05	11200	11920
60	240	288,23	7200	7680	840	872,67	25200	25690

Tabela 5 – Variação de tensões totais com NA na superfície.

Tensão Total - Resultante [kN/m]				
Prof. (m)	Rankine	Plaxis	Variação	%
40	11200	11920	0,060403	6
60	25200	25690	0,019074	1,9

- Solo Argiloso

Tabela 6 - Tensões em solo argiloso com NA abaixo da galeria.

Argila	Tensões Horizontais - NA abaixo da galeria							
	Tensão Efetiva				Tensão Total			
	Extrema [kN/m ²]		Resultante [kN/m]		Extrema [kN/m ²]		Resultante [kN/m]	
Prof. (m)	Rankine	Plaxis	Rankine	Plaxis	Rankine	Plaxis	Rankine	Plaxis
40	315	395,34	6300	7770	323	395,34	6460	7770
60	477	611,93	14310	17130	485	611,93	14550	17130

Tabela 7 - Variação de tensões totais com NA abaixo da galeria.

Tensão Total - Resultante [kN/m]				
Prof. (m)	Rankine	Plaxis	Variação	%
40	6460	7770	0,168597	16
60	14550	17130	0,150613	15

Tabela 8 - Tensões em solo arenoso com NA na superfície.

Argila	Tensões Horizontais - NA na superfície do terreno							
	Tensão Efetiva				Tensão Total			
	Extrema Efetiva [kN/m ²]		Resultante [kN/m]		Extrema Total [kN/m ²]		Resultante [kN/m]	
Prof. (m)	Rankine	Plaxis	Rankine	Plaxis	Rankine	Plaxis	Rankine	Plaxis
40	85	221,37	1700	4240	492	612,54	9840	12240
60	131	353,24	3926	9390	738	928	22140	27400

Tabela 9 - Variação de tensões totais com NA na superfície.

Tensão Total - Resultante [kN/m]				
Prof. (m)	Rankine	Plaxis	Variação	%
40	9840	12240	0,196078	19
60	22140	27400	0,191971	19

A partir dos resultados apresentados, é possível concluir que:

Os resultados extraídos do programa PLAXIS apresentaram uma concentração de tensões na região em que a galeria foi instalada. Isso ocorre devido à maior rigidez do material constituinte da galeria em comparação com o solo. Logo, a estrutura de concreto tende a receber maiores esforços.

Já os modelos analisados pelo método de Rankine não levam em consideração a rigidez dos materiais, logo apresentam como resultado uma distribuição linear dos esforços.

Os modelos analisados considerando o solo arenoso apresentaram variações menores das resultantes de tensões totais entre os dois métodos. Já para solos argilosos, essa diferença foi maior, chegando a quase 20% para o nível d'água localizado na superfície.

Para solos arenosos, o método de Rankine se apresenta como uma boa alternativa ao Método dos Elementos Finitos. Porém, em solos argilosos, essa variação é maior, sendo aconselhável a verificação por programas de elementos finitos.

Os diagramas de tensões horizontais obtidos pelo programa PLAXIS não confirmaram o formato de distribuição apresentado por CAPUTO (2015). No programa de elementos finitos, a consideração da rigidez dos materiais levou a uma concentração de tensões na região da galeria, como dito anteriormente.

A distribuição de tensões verticais fornecida pelo programa PLAXIS indicou uma diminuição de tensões no topo da galeria, como indicado por CAPUTO (2015). O método de Rankine não considera essa diminuição, o que apesar de a favor dos requisitos de segurança, não é favorável quanto à economia da construção.

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

Desenvolvimento de estudo comparativo entre os métodos clássicos e Método dos Elementos Finitos através do programa PLAXIS utilizando modelos tridimensionais.

Estudo de distribuição de tensões em estruturas enterradas considerando cargas dinâmicas (como sismos).



Referências

- CAMPANHÃ, Carlos Augusto e BOSCOV, Pedro. NATM - Túneis em Terreno Pouco Consistentes. Manual Técnico, 1998.
- CAPUTO, H. P. Mecânica dos Solos e suas Aplicações, Vol. 1, LTC– Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2015.
- CERELLO, Luiz e REDAELLI, Leandro Lorenzo. Escavações, Geologia de Engenharia. São Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE, 1998.
- GIACCHINI, B. L. Uma Breve Introdução ao Método dos Elementos Finitos. Departamento de Matemática, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012
- FERNANDES, M. M. Mecânica dos Solos. Introdução à Engenharia Geotécnica. Oficina de Textos, São Paulo, 2014
- FERRANDIN, E. R. Análise e Dimensionamento de Cortinas de Estacas Moldadas no Local. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- GERSCOVICH, DENISE M. S, Estruturas de Contenção, Muros de Arrimo. UERJ, Rio de Janeiro, 2010.
- LIMA, Victor Barreto de Oliveira - Aplicação do Método NATM na Execução de Túnel em Rocha. Projeto de Graduação, UFRJ/ Escola Politécnica, 2016.
- LOPES, F. R., Métodos numéricos em geotecnia - Versão 3.0 - Notas de apoio às aulas da cadeira de Métodos Numéricos em Geotecnia da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- MOTA, A. M. Avaliação do Desempenho de Estrutura de Contenção em Balanço Executada em Estacas Secantes, Dissertação de Mestrado, Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, UFRJ, 2018
- OLIVEIRA, FERNANDO DA SILVA. Análise Numérica de Experimento para Avaliação dos Efeitos de Sobrecargas Assimétricas em Estacas, Dissertação de Mestrado, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro 2015.
- PINTO, CARLOS DE SOUSA. Curso Básico de Mecânica dos Solos. Exercícios Resolvidos. Oficina de Textos, São Paulo, 2001.
- PLAXIS, 2018. Tutorial Manual
- POULOS, H. G. – Elastic solutions for soil and rock mechanics. Wiley, New York, 1973.
- SOLOTRAT Engenharia Geotécnica LTDA – Manual de Serviços Geotécnicos, 2018.
- TIMOSHENKO, S. P. GERE J. E., Mecânica dos Sólidos, Volume I.: LTC – Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1983.
- VAZ, L.E. Método dos Elementos Finitos em Análise de Estruturas. Campus, 2010.