

Comportamento da Frente de Escavação de Túneis Rasos

Yasletty Zamora Hernández

Universidade de Brasília, UnB, Brasília, Brasil, yasletty89@gmail.com

Renato Santos Paulinelli Raposo

Universidade de Brasília, UnB, Brasília, Brasil, renatopaulinelli@gmail.com

Aldo Durand Farfán

Universidade Estadual do Norte Fluminense, UENF, Campos dos Goytacazes, Brasil, aldo@uenf.br

André Pacheco de Assis

Universidade de Brasília, UnB, Brasília, Brasil, aassis@unb.br

RESUMO: As obras subterrâneas tem sido amplamente utilizadas desde tempos antigos na mineração, controle de enchentes, abastecimento de água e transporte. Os túneis são essenciais para o desenvolvimento das grandes cidades, fazendo uma economia do tempo e consumo da energia. Embora os benefícios destas obras, a sociedade pode não ter uma aceitação favorável ante elas, pelo fato dos numerosos acidentes que têm acontecido no mundo inteiro. Um dos principais tipos de ruptura que ocorrem em túneis rasos são aquelas provenientes da instabilidade da face de escavação daí a necessidade de estudar este fenômeno. A metodologia deste trabalho foi desenvolvida empregando métodos analíticos e numéricos. Primeiramente foi realizada uma revisão bibliográfica dos métodos analíticos existentes na literatura, destinados à avaliação da estabilidade da face de escavação, determinando-se o mais conveniente para uma análise preliminar do fenômeno de estudo. Os métodos numéricos foram empregados mediante o software de elementos finitos ABAQUS 3D®, que permite diferentes geometrias, presença de suporte e perfis geotécnicos complexos. Os modelos foram em solo homogêneo com seis profundidades de um túnel de 6 m de diâmetro, com a avaliação da necessidade de suporte, do avanço admissível e da pressão necessária para estabilização da face. Os parâmetros definidos nas análises foram baseados nas características típicas de solos rasos, com exceção de uma análise preliminar que considera variação de coesão mais altas do solo para avaliar até que condições o túnel é autossustentável. Com o emprego dos métodos numéricos foram determinadas as pressões a serem aplicadas na face de escavação para que esta seja estável, tendo em conta a variação da cobertura do túnel.

PALAVRAS-CHAVE: Face de Escavação, Túneis rasos, Métodos analíticos, ABAQUS 3D.

1. INTRODUÇÃO

A engenharia de túneis tem evoluído muito através das diferentes Eras, visando construir obras mais seguras e econômicas. Uma das etapas mais relevantes é a chamada Era das Ferrovias (sec. XIX). Nesta Era foram desenvolvidos técnicas e procedimentos construtivos empregados até hoje, permitindo seu aperfeiçoamento (Assis, 2002). Embora todos os aportes neste período, até o momento

não havia sido levado em conta o cálculo da estrutura, pelo qual o dimensionamento do túnel só era feito por tentativa e erro incrementando assim a ocorrência de acidentes e perdas de vidas humanas. Depois deste período começa a Era Ambiental (1960), onde surgem novas tecnologias como a implementação do concreto projetado, significando uma grande vantagem para a segurança e economia da obra.

A ruptura em túneis pode ter diversas causas, algumas delas são a erosão do solo provocada

pela água subterrânea, a entrada de fluxo de água e condições desfavoráveis do maciço (falta de confinamento, descontinuidades etc.). Os túneis urbanos geralmente são classificados como rasos, os quais apresentam valores de cobertura de até três vezes o diâmetro, no entanto coberturas de até seis vezes o valor do diâmetro também tem influência na superfície do terreno. Um dos principais tipos de rupturas ocorridas em túneis rasos é aquele proveniente da instabilidade da face de escavação. Daí a necessidade de estudar este fenômeno que, embora muitos pesquisadores têm incursionado nisto, ainda têm muitos temas a serem abordados e aprofundados.

Muitos pesquisadores propuseram modelos matemáticos para a avaliação da estabilidade da face de escavação de túneis rasos e previram o comportamento da frente. Dentro estes modelos estão: Davis et al (1980), Muhlhaus (1985), Leca e Dormieux (1990) e Mollon et al. (2009). Cada um destes métodos tem evoluído com o melhoramento dos métodos anteriores, fazendo com que cada vez o modelo seja mais otimizado para a obtenção de resultados melhores e mais precisos. No final pode ser obtida a pressão de face necessária para manter a estabilidade e a superfície de ruptura. As técnicas computacionais foram empregadas neste trabalho, com a utilização do software ABAQUS 3D®, que utiliza o método dos elementos finitos.

O presente trabalho visa estudar o comportamento da face de escavação em túneis rasos com o emprego de algumas técnicas e modelos mencionados anteriormente. Neste caso foi empregado o método analítico desenvolvido por Mollon et al. (2009). Este método é muito preciso e pode ser comparado satisfatoriamente com métodos numéricos. Os resultados obtidos com estes métodos foram comparados com os obtidos mediante o software ABAQUS 3D®.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Métodos analíticos na análise da frente de escavação.

Existem vários métodos analíticos para análises da estabilidade da face de escavação de túneis. Todos eles são baseados no Método da

Análise Limite, que permite observar o comportamento do mecanismo de ruptura da frente de escavação. Este método avalia a pressão de falha de uma massa de solo, oferecendo os limites superior e inferior da pressão limite, usando enfoques cinemáticos e estáticos, respectivamente. A principal vantagem deste método é a sua simplicidade, é por isto que se mostra como alternativa para estudos de projetos preliminares (Ibrahim et al., 2015).

O método de Davis et al. (1980), faz uma análise da estabilidade dependendo da relação entre a cobertura do solo, o diâmetro, a sobrecarga da superfície, o comprimento sem revestimento, a pressão da frente. Além disso, eles também consideraram as propriedades do maciço (Davis et al., 1980).

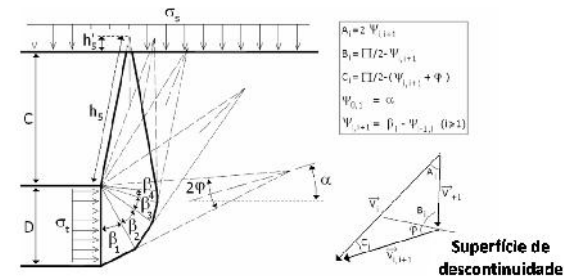
A análise proposta por Muhlhaus (1985) é considerada mais conservadora que os demais métodos. Trabalha com caso de túnel circular em solos muito resistentes (saprolíticos) e também adiciona a análise para pressões em escavações profundas, o que não tem no método anterior. Ele considera análise radial (Mühlhaus, 1985).

No caso da análise de Leca e Dormieux (1990), o comprimento sem suporte é igual a zero, e considera a aplicação de uma pressão na frente, como no caso de tuneladoras, aplicação de ar comprimido etc. Na sua solução considera o mecanismo de ruptura dividido em dois blocos. As condições do solo ao redor do túnel são adotadas uniformes e são considerados os parâmetros do solo na análise da estabilidade, o que não havia sido considerado até o momento em nenhum dos métodos. Além disso, são empregados parâmetros de carregamento relacionados aos empuxos realizados pela sobrecarga. No caso da análise do limite inferior considera um campo de tensão geostática obtendo resultados semelhantes a Davis et al. (1980).

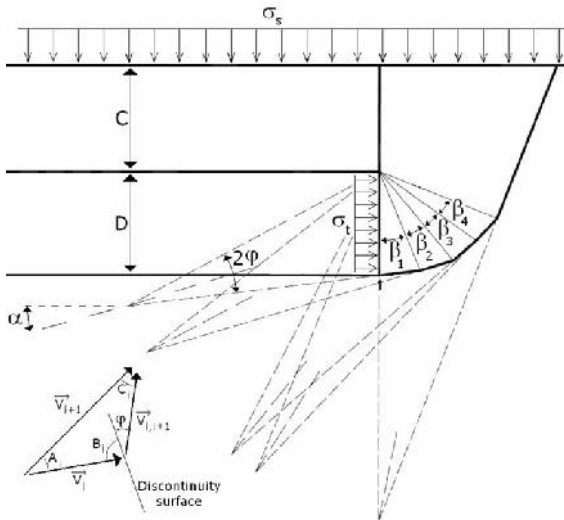
Por último, o método de Mollon et al. (2009), reavalia o método proposto por Leca e Dormieux (1990), pois obtém, de uma forma mais exata, a linha de ruptura ao desenvolver a análise com cinco blocos em lugar de dois. Este método é muito preciso e pode ser comparado satisfatoriamente com métodos numéricos.

2.2. Método analítico de Mollon et al. (2009).

Este método pode representar de forma mais adequada a linha de ruptura da frente de escavação. Na Figura 1 estão representados os dois mecanismos de falha fundamentais empregados pelos autores, denominados MI (caso do colapso) e MII (caso do *blow-out*).



(a) Mecanismo MI (caso de colapso).



(b) Mecanismo MII (caso de *blow-out*).

Figura 1 – Mecanismos de falha para a estabilidade de face (Mollon et al., 2009).

O mecanismo MI é denominado como “ativo”, pois os diferentes cones truncados se movimentam como corpos rígidos em direção ao interior do túnel. No caso de túneis muito rasos, localizados em solos pouco resistentes, pode acontecer que as pressões aplicadas na face do túnel sejam tão grandes que ocorra o colapso por *blow-out*, o que define o comportamento “passivo” do mecanismo MII. Contrário ao mecanismo MI, o mecanismo MII sempre apresenta uma movimentação da massa do solo em direção à superfície do terreno.

Para ambos mecanismos (MI e MII), a pressão última (σ_u) no colapso e *blow-out*, quando o total de energia dissipada e o total de trabalho externo são equalizados, pode ser determinada mediante na Equação 1:

$$\sigma_u = \gamma N_\gamma + cN_c + \sigma_s N_s \quad (1)$$

Onde, N_γ, N_c e N_s : Coeficientes adimensionais, que representam respectivamente o efeito do peso do solo, da coesão e do carregamento superficial; γ o Peso específico do solo; c a coesão do solo e σ_s o carregamento superficial.

2.3. Método analítico de Kirsch (1898).

O método desenvolvido por Kirsch (1898) é aplicável a túneis com profundidades maiores ou iguais a 10 vezes o raio. Além disso, ele considera um meio infinito onde as direções vertical e horizontal são principais (Assis, 2002). Pode ser empregado satisfatoriamente na validação de modelos numéricos que considerem um meio elástico-linear com geometrias simples. A Figura 2 representa esquematiza esta solução.

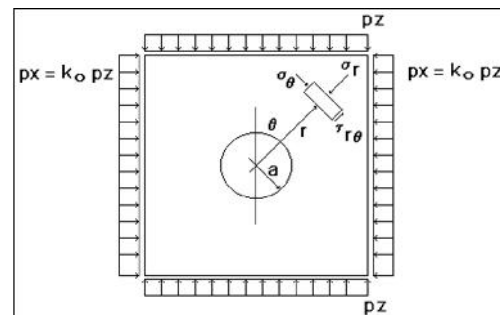


Figura 2 – Esquema da solução analítica de Kirsch (1898) (Assis, 2002).

3. METODOLOGIA.

O trabalho aborda a estabilidade da face de escavação de um túnel, escavado em solo, com o objetivo fundamental de achar a pressão de face necessária para evitar o colapso da estrutura.

Foi empregada uma secção transversal genérica de 6 m, além de considerar uma

escavação de face plena em um meio homogêneo. Os métodos empregados para estas análises foram o método analítico desenvolvido por Mollon et al. (2009), o qual é o método analítico mais conservador segundo o estudo de Rocha (2014), e o MEF empregando o software ABAQUS 3D®.

Na Figura 3 pode ser observada uma idealização do problema, sendo c a Coesão do solo; φ o Ângulo de fricção interna do solo; γ o peso específico do solo; a o avanço da escavação; C a Cobertura do túnel; D o diâmetro do túnel e σ_{ti} a pressão de face limite para evitar o colapso.

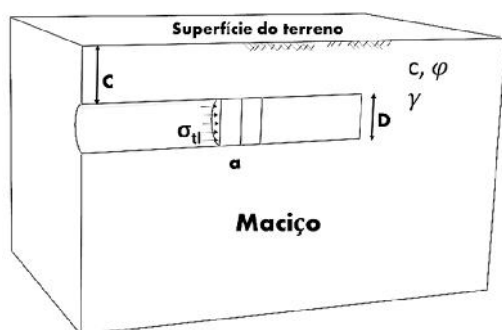


Figura 3 – Esquemática do problema.

3.1. Metodologia para a aplicação do método analítico de Mollon et al. (2009).

Para este método foram desenvolvidos seis casos de estudo fundamentais dados pela variação da relação C/D , os quais podem ser encontrados na Tabela 1. O desenvolvimento matemático deste método analítico foi aplicado usando o software de programação matemática Matlab.

3.2. Metodologia para a aplicação do MEF

▪ Validação do modelo.

Os resultados dos métodos numéricos dependem das propriedades do material, do modelo constitutivo e da sequência construtiva utilizada, por isso é muito importante que a simulação utilizada represente corretamente o problema real.

Tabela 1. Casos empregados nas análises analíticas.

C/D	c (kPa)	φ (°)	γ (kN/m ³)
1			
2			
3	20	28	18
4			
5			
6			

Um aspecto importante nesta parte é a correta definição das condições de contorno e uma malha bem otimizada. Para comprovar isto, foi feito um modelo simples considerando um túnel profundo escavado em solo homogêneo, isotrópico, contínuo e linearmente elástico para poder comparar com a solução analítica de Kirsch de 1898.

▪ Obtenção da Pressão de Face Limite (σ_{ti})

Partindo dos parâmetros padrão empregados no método analítico, foram desenvolvidos seis modelos no software ABAQUS 3D correspondentes às variações da relação C/D de 1 até 6.

Para determinar a Pressão de Face Limite foi feita uma diminuição gradual da σ_{t0} (Pressão de Face Inicial) definida pela Equação 2, até atingir a ruptura do túnel, identificada no programa de elementos finitos quando não conseguir completar o “Step” de análise. Isto foi feito para os diferentes valores de cobertura (C) considerados.

$$\sigma_{t0} = (\gamma * H) * k_0 \quad (2)$$

Onde:

σ_{t0} é a pressão de face inicial; γ o peso específico do solo; H a distância da superfície até o eixo longitudinal do túnel ($C+D/2$) e k_0 o Coeficiente de empuxo no repouso.

▪ Influência da presença do poço na linha de escavação.

Uma vez definidas as pressões limites para cada relação de C/D propostas, é interessante o estudo de outros casos especiais que ocorreram na escavação de túneis. Dentro destes casos se

encontra a presença desconhecida de um poço antigo. Isto pode influenciar na estabilidade da estrutura ao fazer o maciço mais enfraquecido.

Para simular este caso, foram feitos dois modelos mantendo os mesmos parâmetros de resistência utilizados nos estudos anteriores, com coesão de 20 kPa, ângulo de atrito de 28° e módulo de elasticidade de 10 MPa. Estes dois estudos envolvem:

- Caso 1: Encontro da face do túnel com o poço;
- Caso 2: Túnel escavado sob o poço.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

4.1. Método de Mollon et al. (2009).

Para todos os casos analisados mediante este método não foi necessária a aplicação de uma pressão na frente de escavação, porém o Fator de Segurança determinado resultou muito baixo fazendo com que estas condições não sejam adequadas para realizar a escavação do túnel em nenhum dos casos analisados, como observado na Figura 4.

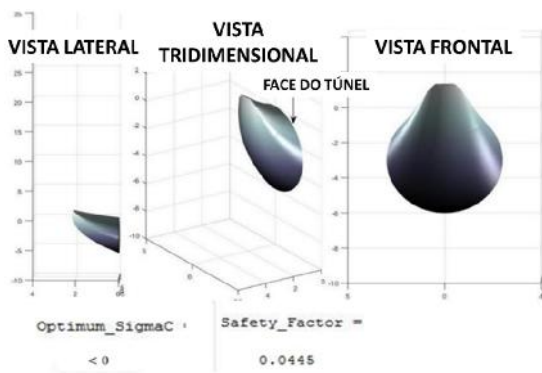


Figura 4: Mecanismo MI determinado mediante o Método de Mollon et al. (2009) ($C/D = 6$).

4.2. Método numérico.

Foram avaliados os valores de tensão radial e tangencial nos eixos 0°, 45° e 90 mediante a solução de Kirsch (1898). Na Figura 5 são apresentados os resultados no eixo 0°.

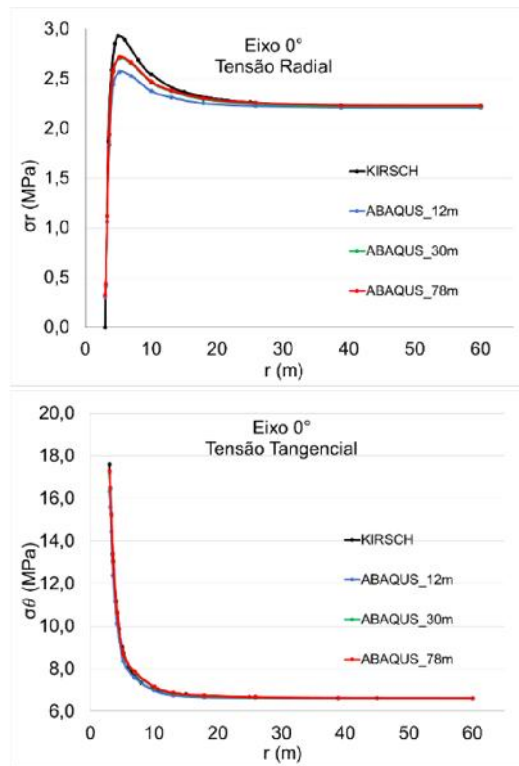


Figura 5: Comparação dos valores das tensões radiais e tangenciais no eixo 0.

A Pressão de Face Limite foi determinada para os seis modelos implementados, os quais variaram na faixa de entre 40~300 kPa como é apresentado nas Figuras 6 e 7.

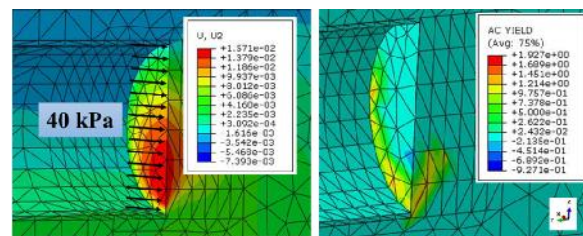


Figura 6 – Pressão de Face Limite (a) e plastificação do solo (b) para cobertura $C = 1D$.

4.3. Comparação dos resultados.

Na Tabela 2 estão recolhidos os resultados de Pressão de Face Limite determinados pelo método analítico proposto por Mollon et al. (2009) e os determinados com o emprego do MEF com o software. Como pode ser observado nos resultados, segundo o método analítico, a face de escavação é estável para todos os valores

de cobertura analisados. Embora o Fator de Segurança calculado pelo mesmo método, em todos os casos resultou menor do que um. Este fato leva à conclusão que para as condições analisadas não é possível executar a escavação do túnel sem a colocação de uma pressão na frente. Os resultados obtidos com o método numérico confirmam a necessidade da presença de uma pressão na frente, sendo possível a sua determinação.

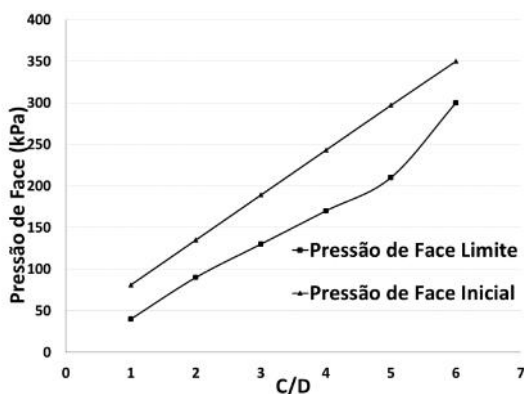


Figura 7 – Pressões de Face vs. Relação C/D.

Tabela 2. Comparação dos métodos empregados na análise da Estabilidade da Face.

Análise da Estabilidade da Face de Escavação			
C/D	Método Analítico de Mollon et al. (2009)	MEF ABAQUS 3D	
	σ_t (kN/m ²)	FS	σ_t (kN/m ²)
1	< 0	< 1	40
2	< 0	< 1	90
3	< 0	< 1	130
4	< 0	< 1	170
5	< 0	< 1	210
6	< 0	< 1	300

4.4. Pressão de Face Limite com a presença do poço na linha de escavação.

Foram avaliados dois casos fundamentais com relações $C/D = 1$ e $C/D = 2$. Os resultados ressaltam que o caso mais desfavorável para a estabilidade da face se apresenta quando existe uma interseção do eixo do túnel com o poço ($C/D = 1$), resultando em um aumento da Pressão de Face Limite até 43 kPa. É importante sinalar que a presença do poço faz com que o maciço seja mais enfraquecido e, portanto, mais vulnerável à

ruptura. Isto interfere também com a estabilidade da face de escavação, pois existe uma maior concentração de tensões na massa do solo quando comparado com o caso sem a presença do poço, podendo ser necessária uma pressão de face maior, como o ocorrido no caso apresentado com $C/D = 1$.

5. CONCLUSÕES.

Os resultados obtidos com o método analítico desenvolvido por Mollon et al. (2009), mostraram que a face do túnel manteve-se estável para os diferentes valores de cobertura e condições do maciço empregadas. Porém, o Fator de Segurança permaneceu abaixo de um, comprovando-se assim a necessidade da aplicação de uma pressão na frente de escavação.

Para a determinação das Pressões de Face Limites (σ_{tl}), foram assumidos parâmetros e características típicas de solos superficiais, adotando-se um valor de coesão de 20 kPa. Com estas condições foi necessária a aplicação do suporte para fazer a escavação, considerando o mesmo como uma estrutura de concreto projetado. As Pressões de Face Limite (σ_{tl}) foram determinadas mediante um processo iterativo, diminuindo a Pressão de Face Inicial (σ_{t0}), para todas as profundidades propostas, sendo que os valores de σ_{tl} mostraram uma correlação direta com o aumento da relação cobertura e diâmetro do túnel (C/D).

A presença desconhecida de estruturas existentes na linha de escavação, como pode ser o caso de um poço antigo, foi avaliada neste trabalho. Os resultados mostraram que a maior influência deste fenômeno é representada quando o poço intersecta o eixo do túnel, resultando em um aumento da σ_{tl} requerida para a estabilidade da frente.

Segundo a comparação dos resultados, o método de Mollon et al. (2009) caracteriza a face de escavação como estável não sendo possível a determinação da pressão de face necessária para os casos analisados, apresentando um valor de FS muito baixo. Pelo contrário, os resultados obtidos mediante o método numérico

comprovam a necessidade da colocação de uma pressão na face para cada valor de cobertura proposto neste estudo.

AGRADECIMENTOS.

Agradecemos a CAPES e CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS.

- Assis, A.P. (2002). Mecânica das Rochas: Obras Subterrâneas - Apostila. 2002. Universidade de Brasília-UnB, G.AP-AA004/01: 11–12.
- Davis, E.H., Gunn, M.J., Mair, R.J. e Seneviratne, H.N. (1980). The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material. *Géotechnique*, 1980, 30(4):397-416.
- Ibrahim, E., Soubra, A.H., Mollon, G. (2015). Three-dimensional face stability analysis of pressurized tunnels driven in a multilayered purely frictional medium. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49: 18–34.
- Leca, E., Dormieux, L. (1990). Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material. *Geotechnique*, 40: 581–606.
- Mollon, G., Dias, D., Soubra, A.H. (2009). Probabilistic analysis and design of circular tunnels against face stability. *International Journal Geomechanics*, 9: 237–249.
- Mühlhaus, H.B., (1985). Lower bound solutions for circular tunnels in two or three dimensions. *Rock Mech; Rock Engineering*, 1985, 18, 37-52.
- Rocha, M.O. (2014). Estudo da estabilidade da frente de escavação de túneis rasos em solo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 158 p.