

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Francisco da Silva Pereira

**TÚNEIS REFORÇADOS POR TIRANTES PASSIVOS:
ANÁLISE NUMÉRICA BIDIMENSIONAL AXISSIMÉTRICA
UTILIZANDO UM MODELO DE HOMOGENEIZAÇÃO**

Porto Alegre
dezembro 2014

FRANCISCO DA SILVA PEREIRA

**TÚNEIS REFORÇADOS POR TIRANTES PASSIVOS:
ANÁLISE NUMÉRICA BIDIMENSIONAL AXISSIMÉTRICA
UTILIZANDO UM MODELO DE HOMOGENEIZAÇÃO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Denise Bernaud Maghous

Porto Alegre
dezembro 2014

FRANCISCO DA SILVA PEREIRA

**TÚNEIS REFORÇADOS POR TIRANTES PASSIVOS:
ANÁLISE NUMÉRICA BIDIMENSIONAL AXISSIMÉTRICA
UTILIZANDO UM MODELO DE HOMOGENEIZAÇÃO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2014

Profa. Denise Bernaud Maghous
Dra. pela École Nationale des Ponts et Chaussées
Orientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Dra. pelo PPGA/UFRGS
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Denise Bernaud Maghous (UFRGS)
Dra. pela *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Paris

Prof. Samir Maghous (UFRGS)
Dr. Pela *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Paris

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. Pela Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho a meus pais, Laura e Paulo, que sempre me incentivaram e me apoiaram a ir em busca dos meus sonhos, em especial do meu Curso de Graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Profa. Denise Bernaud Maghous, orientadora deste trabalho, pela atenção, paciência e empenho nas explicações e recomendações que permitiram a boa concepção deste trabalho.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt pela dedicação nas disciplinas de Trabalho de Conclusão, as quais foram imprescindíveis para a elaboração deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de obter minha formação profissional em curso de excelência, e pela formação pessoal, com o convívio de mestres e colegas.

Agradeço aos meus pais, Laura e Paulo, pelo amor incondicional, incentivo e apoio financeiro que tornaram possível a minha formação acadêmica.

Agradeço aos meus amigos, Felipe e Gabriel, pela amizade, pelos conselhos e pela compreensão nas horas de ausência.

Agradeço aos meus colegas de curso, pela amizade, pela ajuda nas dificuldades e pelo apoio motivacional.

Sem a cultura, e a liberdade relativa que ela pressupõe,
a sociedade, por mais perfeita que seja, não passa de
uma selva. É por isso que toda a criação autêntica é
um dom para o futuro.

Albert Camus

RESUMO

O presente trabalho aborda um método bidimensional axissimétrico para o cálculo de convergência em túneis reforçados por tirantes passivos. Para simular a interação entre o maciço e o reforço foi utilizado um método de homogeneização. O trabalho considerou o meio escavado como sendo homogêneo e isotrópico e, o túnel, circular, profundo e contínuo. Além disso também foi considerado que o meio formado por tirantes e maciço pode ser substituído por um meio homogeneizado. O critério de comportamento adotado foi o de Tresca. Para a realização das simulações foi utilizado um software desenvolvido por Bernaud (1991), o qual é baseado no método dos elementos finitos e simula o processo de escavação através do método de ativação e desativação. Esse trabalho foi dividido em três etapas. A primeira avaliou a influência dos tirantes radiais quanto a convergência do túnel variando os seguintes parâmetros: comprimento dos tirantes, densidade de tirantes, distância do tirante a frente de escavação e o diâmetro dos tirantes. Na segunda foi avaliado a utilização simultânea de tirantes radiais e revestimento quanto a convergência, foram realizados casos com valores de parâmetros dos tirantes diferentes para dois valores de rigidez do revestimento, a fim de analisar a influência do mesmo. Por fim foi realizada a verificação do dimensionamento dos túneis revestidos e reforçados. Os resultados mostram que há um comprimento mínimo do tirante radial que deve ser utilizado para que o reforço tenha efeito na redução da convergência do túnel. Além disso o diâmetro dos tirantes e a densidade de tirantes instalados foram identificados como parâmetros bastante influentes e a distância não reforçada como o parâmetro menos influente. Também constatou-se que o revestimento de concreto tem uma influência maior que o reforço com tirantes passivos na redução da convergência final do túnel.

Palavras-chave: Túneis Reforçados por Tirantes Passivos.
Modelo de Homogeneização para Túneis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação das etapas do trabalho	17
Figura 2 – <i>Roadheaders</i>	20
Figura 3 – <i>Tunnel Boring Machine</i>	21
Figura 4 – Aplicação de concreto projetado	24
Figura 5 – Peças de revestimento segmentados circulares	25
Figura 6 – Utilização de formas deslizantes em túneis	26
Figura 7 – Posicionamento de tirantes frontais	28
Figura 8 – Processo executivo de enfilagem	29
Figura 9 – Etapas do processo de escavação e colocação de suporte	31
Figura 10 – Malha típica de análises bidimensionais em deformações planas	33
Figura 11 – Malha típica de análises bidimensionais em axissimetria	34
Figura 12 – Malha típica de análises tridimensionais	35
Figura 13 – Representação da contribuição de um segmento de reforço na rigidez do elemento sólido por meio da transformação em um elemento sólido equivalente	37
Figura 14 – Caracterização geométrica de um problema axissimétrico reforçado com tirantes frontais e radiais	38
Figura 15 – Elementos representativos dos reforços	38
Figura 16 – Simplificação do modelo homogeneizado	39
Figura 17 – Configuração do túnel em escavação	46
Figura 18 – Configuração do túnel em escavação após avanço de um passo	47
Figura 19 – Curva típica de convergência	48
Figura 20 – Curvas de convergência: tirantes radiais – influência do comprimento dos tirantes	49
Figura 21 – Curvas de convergência: tirantes radiais – influência da densidade de tirantes	50
Figura 22 – Curvas de convergência: tirantes radiais – influência da distância não reforçada	51
Figura 23 – Curvas de convergência: tirantes radiais – influência do diâmetro dos tirantes	52
Figura 24 – Curvas de convergência: tirantes radiais e revestimento – influência da rigidez do revestimento no caso 1	53
Figura 25 – Curvas de convergência: tirantes radiais e revestimento – influência da rigidez do revestimento no caso 2	54
Figura 26 – Curvas de convergência: tirantes radiais e revestimento – influência da rigidez do revestimento no caso 3	55

Figura 27 – Curvas de convergência: tirantes radiais e revestimento – influência da rigidez do revestimento no caso 4	56
Figura 28 – Diagrama $P_i \times U_i$	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Peq para os casos da seção 8.2	59
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

U_{eq} – convergência de equilíbrio

P_{eq} – pressão de equilíbrio

d_0 – distância não revestida

D – diâmetro do túnel

P_i^f – pressão fictícia aplicada à parede da galeria

P_∞ – pressão geostática na profundidade da galeria

R – raio da escavação cilíndrica axissimétrica

p_r – espaçamento entre tirantes radiais segundo o eixo da escavação

β_r – espaçamento angular entre tirantes radiais na seção transversal

l_r – comprimento do tirante radial

$\eta_r(r)$ – proporção volumétrica de reforço radial ao longo da distância radial do túnel

r – distância ao eixo central do túnel

S_r – área da seção transversal do tirante radial

E_m – módulo de Young do material rochoso

E_r – módulo de Young do tirante radial

ν_m – coeficiente de Poisson do material rochoso

ν_r – coeficiente de Poisson do tirante radial

E_l^{hom} – módulo de Young longitudinal homogeneizado segundo o eixo do reforço

E_t^{hom} – módulo de Young transversal homogeneizado segundo o eixo do reforço

K – coeficiente de reforço

U_{rr} – convergência do túnel

d_t – densidade de tirantes

d_{eb} – distância não reforçada

Φ_t – diâmetro dos tirantes

l_b – comprimento dos tirantes

K_s – rigidez do revestimento

σ_0 – tensão de escoamento do tirante

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA	16
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA	16
2.2.1 Objetivo principal	16
2.2.2 Objetivo secundário	16
2.3 PRESSUPOSTO	16
2.4 DELIMITAÇÕES	17
2.5 LIMITAÇÕES	17
2.6 DELINEAMENTO	17
3 TÉCNICAS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS	19
3.1 ESCAVAÇÃO MINEIRA	19
3.2 ESCAVAÇÃO MECANIZADA	20
4 TÉCNICAS DE ESTABILIZAÇÃO DE ESCAVAÇÕES	23
4.1 REVESTIMENTOS	23
4.1.1 Concreto projetado	23
4.1.2 Segmentos pré-fabricados	25
4.1.3 Concreto moldado <i>in-loco</i>	26
4.2 REFORÇOS RADIAIS	26
4.2.1 Tirantes convencionais	27
4.2.2 Tirantes passivos	27
4.3 REFORÇOS FRONTAIS	27
4.3.1 Tirantes frontais	28
4.3.2 Enfilagem	29
5 MÉTODOS NUMÉRICOS DE DIMENSIONAMENTO DE TÚNEIS	30
5.1 MODELAGEM DO PROCESSO DE ESCAVAÇÃO	31
5.1.1 Método da ativação e desativação	32
5.2 MÉTODOS BIDIMENSIONAIS	32
5.2.1 Deformações planas	33
5.2.2 Axissimétrico	34
5.3 MÉTODOS TRIDIMENSIONAIS	34
6 MODELOS NUMÉRICOS DE INTERAÇÃO ENTRE MACIÇO E REFORÇO	36
6.1 DISCRETO	36

6.2 INCORPORADO	36
6.3 HOMOGENEIZAÇÃO	37
7 CRITÉRIOS DE COMPORTAMENTO DE SÓLIDOS	43
7.1 TRESCA	43
7.2 VON MISES	44
7.3 MOHR – COULOMB	44
8 ANÁLISE PARAMÉTRICA	46
8.1 TIRANTES RADIAIS	49
8.1.1 Influência do comprimento dos tirantes	49
8.1.2 Influência da densidade de tirantes	50
8.1.3 Influência da distância não reforçada	51
8.1.4 Influência do diâmetro dos tirantes	52
8.2 TIRANTES RADIAIS E REVESTIMENTO	53
8.2.1 Caso1: $l_b=5R$; $d_t=3t/m^2$; $d_{eb}=0$; $\varphi_t=50mm$	53
8.2.2 Caso2: $l_b=2R$; $d_t=2t/m^2$; $d_{eb}=0,33R$; $\varphi_t=50mm$	54
8.2.3 Caso3: $l_b=2R$; $d_t=2t/m^2$; $d_{eb}=0,33R$; $\varphi_t=24mm$	55
8.2.4 Caso4: $l_b=1R$; $d_t=1t/m^2$; $d_{eb}=0,67R$; $\varphi_t=24mm$	56
9 DIMENSIONAMENTO DE TÚNEIS	57
9.1 PRESSÃO MÁXIMA	58
9.2 VERIFICAÇÃO	58
10 CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Atualmente uma das barreiras que impedem um melhor desempenho da economia brasileira é a falta de infraestrutura qualificada para escoamento da produção. Devido às dimensões do País e a necessidade de levar a produção até as zonas portuárias, os produtos brasileiros sofrem com a falta de infraestrutura, que causa um acréscimo no preço final dos bens e faz com que percam competitividade no exterior. Outro problema que está ganhando cada vez mais notoriedade, em debates públicos, é a mobilidade urbana. Devido a uma rede de transporte público ineficiente, as grandes metrópoles brasileiras sofrem com constantes engarrafamentos todos os dias.

Para tentar melhorar a infraestrutura nacional, o Governo Federal planeja realizar diversas obras de modernização. Entre os projetos propostos está a ampliação da malha ferroviária. O transporte ferroviário, devido a suas limitações quanto ao traçado, muitas vezes necessita do uso de estruturas subterrâneas para se tornar viável.

Uma das soluções apontadas para melhorar a mobilidade urbana nas metrópoles é a implantação de linhas metroviárias. Como a construção de metrô, preferencialmente, deve ser subterrânea, impactando da menor maneira possível na superfície da cidade, é necessário o uso de túneis para a realização dessas obras.

Devido a essa perspectiva de crescente demanda de projetos de estruturas subterrâneas, se torna necessário aprimorar os métodos utilizados no dimensionamento de túneis. Embora hoje se possa modelar um túnel tridimensionalmente, nas etapas preliminares ao projeto, não é recomendado esse tipo de análise, pois demanda muito tempo e as informações disponíveis podem não ser suficientes para se gerar um modelo que represente a realidade. Existem diversas maneiras de se realizar um dimensionamento preliminar de túneis, mas é necessário encontrar um equilíbrio entre precisão e demanda de tempo para se escolher o método mais adequado. Desse modo decidiu-se realizar este trabalho, com enfoque em um tipo de análise ainda pouco utilizado.

O método de análise desse projeto consiste em considerar um túnel axissimétrico, reforçado por tirantes. O maciço reforçado pelos tirantes foi considerado como um corpo só,

dispensando a modelagem de iteração entre tirante e maciço. Esse trabalho tem como objeto de estudo uma análise dos parâmetros envolvidos no processo de cálculo do método descrito.

No segundo capítulo, são apresentadas as diretrizes de pesquisa, que tem como objetivo nortear o trabalho e ressaltar as limitações e o delineamento do mesmo. Os capítulos três ao sete são provenientes da revisão bibliográfica e têm como objetivo apresentar as diversas técnicas existentes na atualidade para a construção e dimensionamento de túneis. Devido à grande variedade de técnicas disponíveis, foi dado maior enfoque nas que foram utilizadas nesse trabalho.

Nos capítulos oito e nove são apresentados gráficos com resultados provenientes das simulações realizadas e também é realizado a verificação dos túneis, para os casos com revestimento. Por fim, no último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com base nos capítulos anteriores.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: quais são os parâmetros que têm maior influência no cálculo de convergência de túneis reforçados por tirantes passivos?

2.2 OBJETIVO DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a análise dos resultados de convergência de equilíbrio (U_{eq}) e pressão de equilíbrio (P_{eq}) em túneis reforçados por tirantes passivos em função dos parâmetros estudados, utilizando um método numérico bidimensional axissimétrico com um modelo de homogeneização.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho é o cálculo da convergência de túneis através do método estudado.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que o meio formado por tirantes e maciço pode ser substituído por um meio homogêneo.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a um método bidimensional axissimétrico com um modelo de homogeneização, que representa um comportamento elastoplástico e anisotrópico na zona homogeneizada.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

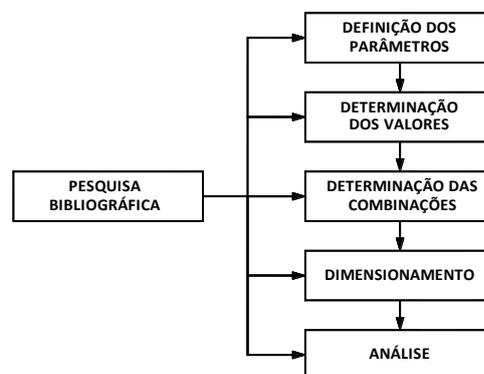
- a) o túnel é profundo, circular e contínuo;
- b) o meio escavado é homogêneo e isotrópico;
- c) ausência de fluidos (meio seco).

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição dos parâmetros a serem estudados;
- c) determinação dos valores para os parâmetros;
- d) determinação das combinações;
- e) dimensionamento;
- f) análise dos resultados.

Figura 1 – Representação das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

O conhecimento teórico para o desenvolvimento do trabalho foi obtido através de pesquisa bibliográfica. A pesquisa bibliográfica foi realizada durante todo o trabalho, simultaneamente com as outras etapas.

A etapa de definição dos parâmetros a serem estudados consistiu na escolha dos parâmetros que foram variados. Após foi necessário fixar valores para esses parâmetros e decidir quais combinações de variáveis seriam abordadas no trabalho.

Durante as etapas de definição dos parâmetros, determinação dos valores e determinação das combinações obtiveram-se os valores dos dados de entrada que seriam utilizados no software. Como há um tempo limitado para a realização do trabalho, foi necessário direcionar a pesquisa para alguns parâmetros de cálculo e limitar a quantidade de combinações.

O dimensionamento deu-se através de software desenvolvido pela professora orientadora Denise Bernaud chamado GEOMECC91. Foram gerados os gráficos utilizando as combinações determinadas nas etapas anteriores para a convergência ao longo do túnel, além da verificação do dimensionamento dos túneis para os casos com revestimento.

Por fim, foi feita a análise dos resultados. Através dos gráficos se obteve conclusões quanto à influência de cada parâmetro na convergência final do túnel.

3 TÉCNICAS DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS

Para se entender melhor o processo de análise de túneis, também é necessário conhecer os processos construtivos, pois esses têm influência direta na escolha de análise de túneis a ser aplicada.

A escolha da técnica mais adequada para uma escavação deve levar em conta não só os aspectos geotécnicos do maciço, mas também os aspectos ligados ao impacto da construção do túnel nos arredores da obra, as questões econômicas, de saúde e de segurança. Então a técnica de construção adequada depende de muitos fatores, todos sendo específicos de cada projeto (CHAPMAN et al., 2010, p. 127, tradução nossa).

Nesse capítulo, são apresentados brevemente alguns dos métodos e equipamentos de construção utilizados atualmente.

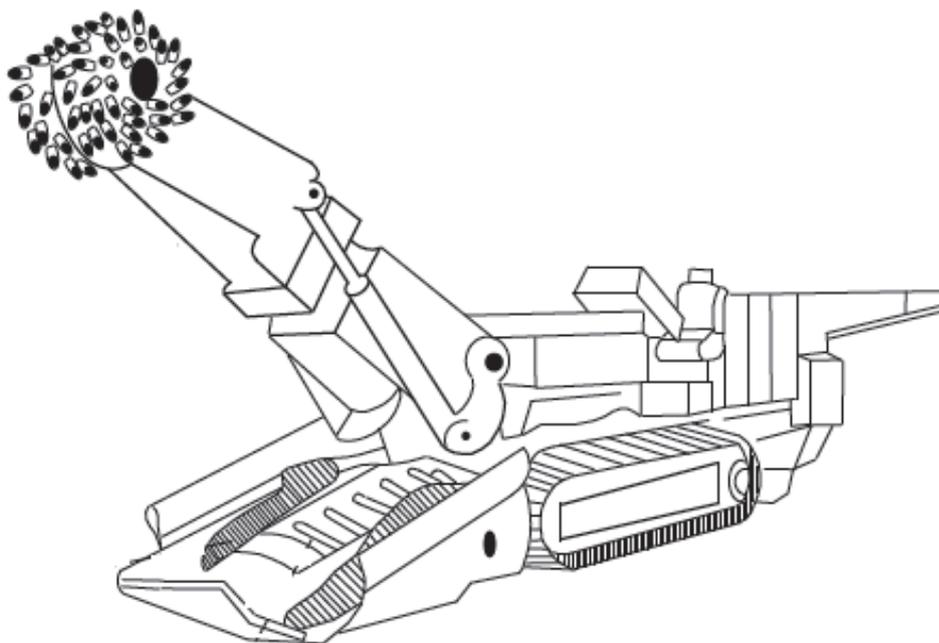
3.1 ESCAVAÇÃO MINEIRA

A escavação mineira pode ser realizada com o auxílio de explosivos ou equipamentos mecânicos. A escavação mineira chamada de mecânica, que utiliza apenas o auxílio de equipamentos, tem sua aplicabilidade restringida a solos ou rochas menos rígidas. Já a escavação com o uso de explosivo tem limitações quanto ao meio onde podem ser utilizadas, pois geram vibrações, ruídos e poeiras (COUTO, 2011, p. 30).

Um dos equipamentos utilizados na escavação mineira mecânica são as *roadheaders* (figura 2) que são equipamentos de face de perfuração parcial. Esses equipamentos utilizam uma cabeça de corte giratória que é pressionada contra o maciço a ser escavado. Uma das desvantagens desse equipamento é a elevada geração de poeira, que muitas vezes podem ser tóxicas. Por esse motivo, quando se usa esse tipo de equipamento, é necessário um sistema de ventilação eficiente. As *roadheaders* têm como vantagens a maior versatilidade quanto ao meio a ser escavado e as geometrias do túnel. Esses equipamentos também causam menos vibrações quando comparados com equipamentos de perfuração de face plena, além disso,

podem ser facilmente reutilizados em outras obras (CHAPMAN et al., 2010, p. 131, tradução nossa).

Figura 2 – *Roadheaders*



(fonte: CHAPMAN et al., 2010, p. 130)

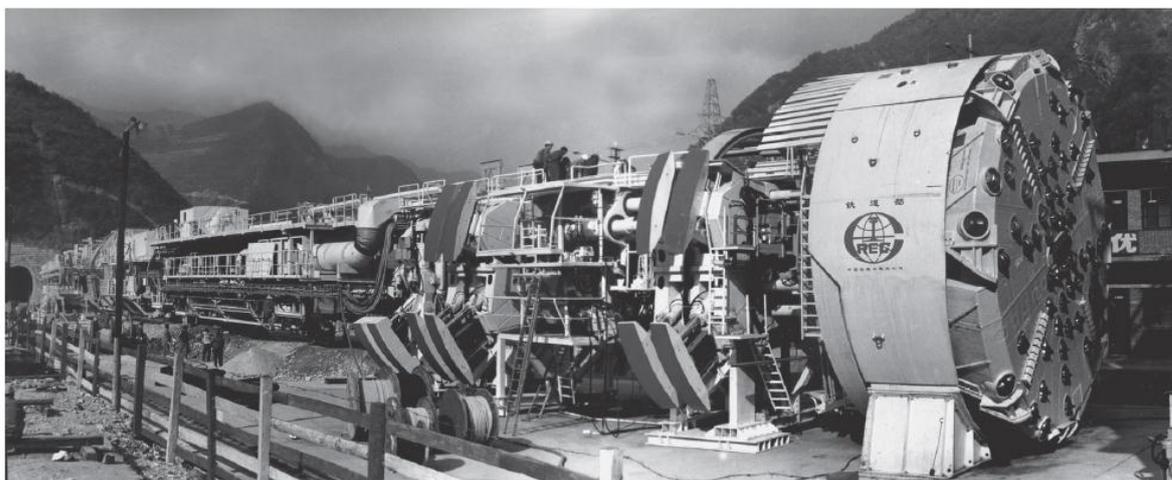
3.2 ESCAVAÇÃO MECANIZADA

A técnica de escavação mecanizada é aquela que faz uso dos equipamentos TBM (*Tunnel Boring Machine*). As TBM são equipamentos de tunelamento a face plena que dependendo do modelo, têm a capacidade de quebrar rochas, e são bem mais suaves que a escavação com uso de explosivo, portanto causam menos dano a rocha em torno da escavação (CHAPMAN et al., 2010, p. 147, tradução nossa).

Esses equipamentos de grande porte, escavam os túneis através de uma cabeça de corte, que geralmente é composta de discos cortantes que esmagam ou quebram a rocha. Os discos cortantes são fixados em um rolamento e rolam em círculos concêntricos na face quando a cabeça de corte roda. Além dos discos cortantes, também existem dentes (ou discos de cortes de fundo), esses dentes são pressionados contra a rocha, a fim de causar um carregamento pontual no maciço. Através da combinação das tensões cortantes (geradas pelos discos cortantes) e por tensões de compressão (geradas pelos dentes) se consegue quebrar a rocha. A

figura 3 apresenta uma TBM tipicamente utilizada para escavação em rochas (CHAPMAN et al., 2010, p. 147, tradução nossa).

Figura 3 – *Tunnel Boring Machine*



(fonte: CHAPMAN et al., 2010, p. 144)

Existem diversas técnicas de tunelamento a face plena que podem ser utilizadas em rochas. A escolha de qual é mais adequada para cada caso consiste em analisar o volume de água que se espera ingressar na escavação, o tipo de rocha a ser escavada e o controle de estabilidade da escavação durante o processo construtivo. Atualmente pode-se separar as TBM em dois tipos principais, que dependem do mecanismo que utilizam para se locomover no interior da escavação, as *gripper* TBM e as *shielded* TBM (CHAPMAN et al., 2010, p. 140, tradução nossa).

Para condições de rochas estáveis, com baixa entrada de água no interior da escavação, a solução com tuneladora do tipo *gripper* pode ser adotada. Esse tipo de tuneladora utiliza equipamentos que são pressionados contra a parede da escavação, deixando a TBM fixa dentro do túnel. Após, é utilizado um sistema com macacos hidráulicos, que empurram o disco da tuneladora para frente, forçando-o contra a face a ser escavada. Dessa maneira consegue-se avanços entre 0,7 m e 1,2 m a cada escavação, dependendo do comprimento e da capacidade dos macacos hidráulicos. Para finalizar, os macacos hidráulicos são movidos para frente através do uso de equipamentos auxiliares, e assim, pode-se começar um novo ciclo de escavação (CHAPMAN et al., 2010, p. 139, tradução nossa).

Ao contrário das tuneladoras do tipo *gripper*, as *shield* TBM têm uma proteção que funciona como um escudo, que se estende sobre a frente da seção da máquina. O escudo tem a função de prover segurança para os operários (contra possíveis desprendimentos de rocha) e servir de suporte para o solo em volta da frente de escavação. Uma das principais vantagens desse tipo de máquina é que ela pode ser utilizada em condições de elevada pressão de água, no caso de TBM completamente vedadas pelo escudo. Para se locomover, fazem uso de um sistema de reação contra o revestimento que foi instalado pela própria tuneladora anteriormente, não pressionando a rocha em volta da escavação (CHAPMAN et al., 2010, p. 145, tradução nossa).

Uma das desvantagens da TBM, é que a geologia ao longo da rota do túnel deve ser consistente, pois as diferentes ferramentas de corte são apropriadas para somente uma pequena gama de variações características do material. A combinação de diferentes ferramentas na cabeça de corte pode aumentar essa gama de condições de maciço. Outra limitação importante das TBM é a restrição quanto à rota de escavação, que deve ser o mais linear possível, pois como se trata de um equipamento de grandes dimensões, fazer uma curva com esse equipamento durante a escavação só é possível para raios pequenos. Além disso, as TBM só podem ser utilizadas para uma geometria de seção transversal, e por isso, geralmente após a construção do túnel para o qual ela foi construída, dificilmente é utilizada novamente (CHAPMAN et al., 2010, p. 138, tradução nossa).

4 TÉCNICAS DE ESTABILIZAÇÃO DE ESCAVAÇÕES

Atualmente conta-se com diversas técnicas de estabilização de escavações, que têm por finalidade garantir a estabilidade mecânica da escavação e reduzir a convergência final do túnel. Nesse capítulo são abordadas algumas das principais técnicas utilizadas.

4.1 REVESTIMENTOS

Os revestimentos são elementos estruturais instalados ao longo do perímetro do túnel e formam uma superfície que produz uma rigidez ao deslocamento do maciço (BOBET; EINSTEIN¹, 2001 apud COUTO, 2011, p. 33).

O projeto de revestimento permanente para túneis deve levar em conta fatores que vão além dos carregamentos e do controle de água. Aspectos como a operação do túnel, a segurança, a resistência aos incêndios e as futuras manutenções devem ser considerados no momento de se optar por uma solução de revestimento (CHAPMAN et al., 2010, p. 108, tradução nossa).

4.1.1 Concreto projetado

A utilização do concreto projetado como revestimento para escavações tem se desenvolvido bastante nos últimos anos. Embora antigamente podia ser utilizado como uma simples proteção superficial do terreno, hoje se pode utilizá-lo como um revestimento capaz de melhorar a capacidade de resistência do maciço (FETHI, 2012, p. 22, tradução nossa).

Gomes (2006, p. 16-17) afirma que “O Concreto projetado pode ser definido como uma mistura de areia, brita, cimento Portland e aditivos aceleradores de pega bem homogeneizados. Essa mistura é impulsionada por uma máquina de projeção rumo à superfície a ser tratada.”.

¹ BOBET, A.; EINSTEIN, H. H. Tunnel reinforcement with rockbolts. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 26, n.1, p. 100-123, Jan. 2011.

Algumas das vantagens do concreto projetado quando comparado com o concreto convencional são (CHAPMAN et al., 2010, p. 110, tradução nossa):

- a) ganho de resistência em menor tempo;
- b) aderência em superfície irregular.

Porém, também se identifica algumas desvantagens. Abaixo algumas das desvantagens (CHAPMAN et al., 2010, p. 110, tradução nossa):

- a) resistência final menor;
- b) maior deformação por fluência do concreto;
- c) maior retração.

Diferentemente do concreto convencional, que é compactado por meio de vibração, o concreto projetado é compactado através da energia cinética gerada pelo lançamento. No entanto, essa diferença no método de compactação não implica em uma resistência à compressão mais elevada (GOMES, 2006, p. 21-22).

O comportamento de fluência do concreto deve ser observado com bastante cuidado, devendo ser monitorado ao longo da construção do túnel (CHAPMAN et al., 2010, p. 110, tradução nossa).

A figura 4 ilustra a aplicação manual de concreto projetado.

Figura 4 – Aplicação de concreto projetado



(fonte: CHAPMAN et al., 2010, p. 112)

4.1.2 Segmentos pré-fabricados

Segundo Chapman et al. (2010, p. 115, tradução nossa), “Sistemas de revestimentos segmentados pré-fabricados, suportam o solo com uma estrutura feita de elementos estruturais intertravados. Juntos esses elementos formam uma estrutura de suporte contínua, que é mais comumente de forma circular.”.

Geralmente esses elementos são fabricados de concreto, com espessura variando de 30 cm à 40cm, mas também podem ser utilizados elementos metálicos. (FETHI, 2012, p. 25, tradução nossa).

King² (2006 apud CHAPMAN et al., 2010, p. 116, tradução nossa) afirma que “Revestimentos segmentados podem ser fixados utilizando tirantes ou chumbadores, ou podem não ter nenhuma conexão mecânica. A escolha das conexões está fortemente relacionada com o método construtivo do túnel.”.

A figura 5 apresenta peças de revestimento segmentado circular.

Figura 5 – Peças de revestimento segmentado circular



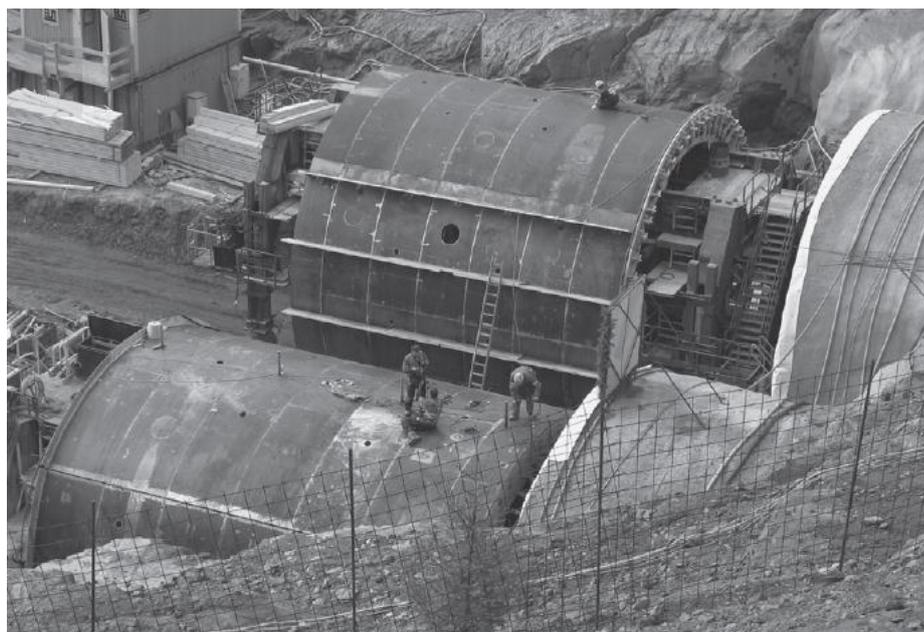
(fonte : CHAPMAN et al., 2010, p. 116)

² KING, M., **Segmental lining design**. Guildford, UK: British Tunneling Society; University of Surrey, 2006. Course on Tunnel Design and Construction.

4.1.3 Concreto moldado *in loco*

Concretos moldados *in loco* podem ser utilizados como suporte principal ou como suporte secundário para túneis (no caso de algum sistema de reforço ou revestimento ter sido instalado anteriormente), dependendo do tipo de material escavado e das exigências de projeto. Esse revestimento é executado utilizando o sistema de formas. Então, primeiramente é colocada a forma, deixando-se uma brecha entre a forma e a parede do túnel (ou revestimento executado anteriormente), e posteriormente a brecha é concretada. Quando o concreto atingir o seu tempo de cura e, conseqüentemente adquirir a resistência de projeto, a forma pode ser retirada. Normalmente é utilizado o sistema de formas deslizantes metálicas (figura 6) ou de madeira (CHAPMAN et al., 2010, p. 123, tradução nossa).

Figura 6 – Utilização de formas deslizantes metálicas em túneis



(fonte: CHAPMAN et al., 2010, p. 124)

4.2 REFORÇOS RADIAIS

Em engenharia de túneis são considerados reforços os elementos instalados dentro do maciço e que melhoram a qualidade do mesmo (BOBET; EINSTEIN³, 2001 apud COUTO, 2011, p. 33).

³ BOBET, A.; EINSTEIN, H. H. Tunnel reinforcement with rockbolts. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 26, n. 1, p. 100-123, Jan. 2011.

Existem dois tipos de tirantes que são utilizados como reforço radial de túneis, os tirantes convencionais e os tirantes passivos. Os tirantes passivos também são conhecidos como chumbadores.

4.2.1 Tirantes convencionais

Segundo Chapman et al. (2010, p. 96, tradução nossa) os tirantes convencionais podem ser definidos da seguinte maneira:

São elementos de reforço que são tensionados durante a instalação. Eles são constituídos de uma haste e uma ancoragem metálica ou grauteada (com cauda de cimento ou resina) combinada com algum meio de aplicação e retenção da tensão na haste. Fixações mecânicas são aptas para rochas rígidas, enquanto que fixações grauteadas podem ser utilizadas na maioria dos tipos de rocha. O comprimento varia entre 2m a 8m para barras resinadas grauteadas, e 3m a 20m para barras com expansores.

4.2.2 Tirantes passivos

Os tirantes passivos são diferenciados dos tirantes convencionais por não serem tensionados durante a instalação, só sendo ativados quando ocorre deslocamento do maciço. Podem ser utilizados como reforço simétrico do túnel ou para reforço pontuais, a fim de evitar desprendimentos de blocos e conseqüente queda dentro da escavação (CHAPMAN et al., 2010, p. 96, tradução nossa).

Segundo Chapman et al. (2010, p. 96, tradução nossa):

Eles [tirantes passivos] consistem de uma haste, um painel frontal e uma porca, e podem ser feitos de barras de aço deformadas, fibra de vidro ou plástico, dependendo se for uma instalação permanente ou temporária. A haste é geralmente inserida em um tubo rebocado ou preenchido com argamassa, embora resina também seja comumente utilizada.

4.3 REFORÇOS FRONTAIS

Gomes (2006, p. 10) afirma que:

A operação de escavação de um túnel causa grandes modificações no estado de tensões originais do maciço, seja ele constituído de rocha ou solo, que reagirá à escavação de algum modo. A passagem da frente de escavação por uma determinada seção transversal do túnel aumenta a velocidade de tais mudanças nos estados de tensões e deformações de suas vizinhanças.

Desta maneira se torna importante a estabilização da frente de escavação. A seguir é apresentado algumas técnicas de reforço frontal.

4.3.1 Tirantes frontais

É formado por hastes metálicas que são posicionadas na seção transversal do túnel. Como esses tirantes devem ser cortados ao longo da escavação, geralmente são constituídos de materiais que possam ser facilmente cortados. Tirantes de aço podem ser utilizados, mas como esse material deve ser escavado posteriormente, é preferível, e mais comum, o uso de tirantes de fibra de vidro (CHAPMAN et al., 2010, p. 100, tradução nossa).

Tirantes frontais têm por finalidade melhorar a estabilidade da face de escavação do túnel. Para se obter uma estabilidade contínua da frente de escavação, os tirantes são encurtados até uma certa distância mínima, pré-definida pelo projetista, neste ponto deve ser instalado um novo conjunto de tirantes que deve se sobrepor ao conjunto anterior em alguns metros (CHAPMAN et al., 2010, p. 100, tradução nossa).

A figura 7 apresenta a execução de tirantes passivos frontais temporários.

Figura 7 – Posicionamento de tirantes frontais



(fonte: CHAPMAN et al., 2010, p. 102)

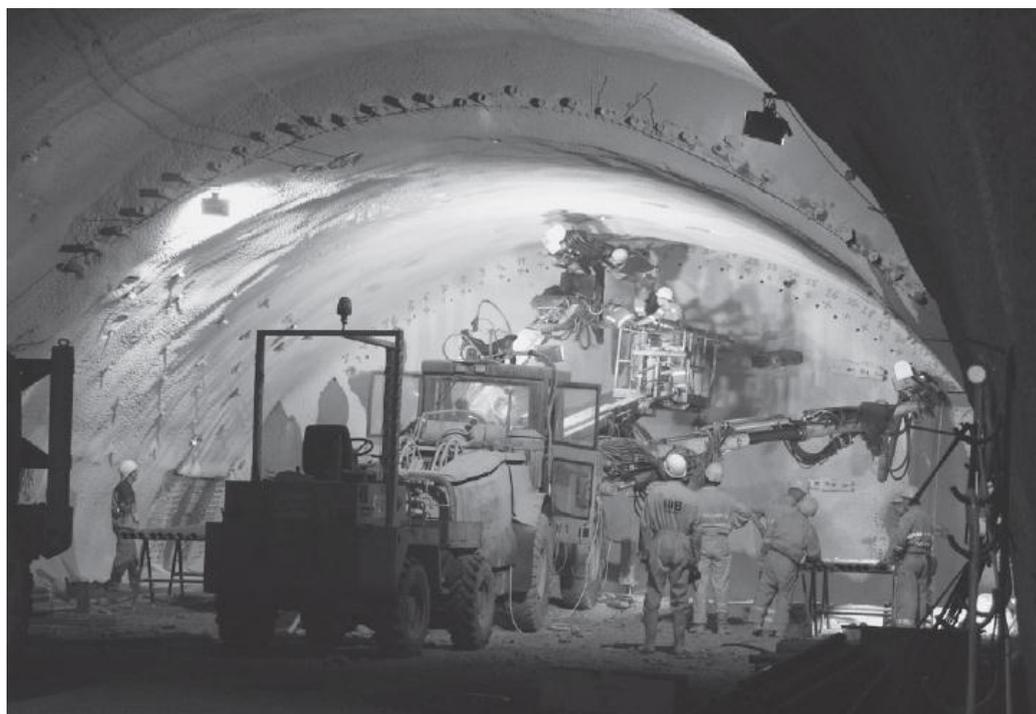
4.3.2 Enfilagem

A enfilagem é executada antes do processo de escavação, e o principal objetivo quando se utiliza essa técnica é manter a sustentação do maciço, até que seja concluída a aplicação do suporte (COUTO, 2011, p. 37).

Nesse método, tubos de aço são cravados no contorno do teto da frente a ser escavada. Depois de retirar o material de dentro dos tubos, eles são preenchidos com graute. Quando o final de um campo de enfilagem é alcançado, ainda há uma parte dos tubos restantes no maciço a frente da face. Este comprimento é conhecido como “comprimento de trespasse” do sistema de enfilagem. O diâmetro utilizado geralmente é de 60 mm à 200 mm e o comprimento de 12 m à 15 m (VOLKMANN; SCHUBERT, 2007, p. [2], tradução nossa).

A figura 8 ilustra o processo executivo da enfilagem.

Figura 8 – Processo executivo de enfilagem



(fonte: CHAPMAN et al., 2010, p. 103)

5 MÉTODOS NUMÉRICOS DE DIMENSIONAMENTO DE TÚNEIS

Segundo Bernaud et al. (1995a, p. 267, tradução nossa):

Estabilizar aberturas subterrâneas como túneis escavados em rocha continua a ser uma grande preocupação dos engenheiros geotécnicos que lidam com esse tipo de estrutura. O dimensionamento de túneis é principalmente focado em limitar as consequências do alívio de pressão do solo em volta da abertura, devido ao processo de escavação, e mais especificamente para manter a convergência do túnel dentro de valores admissíveis, compatíveis com as subsequentes condições de operação da estrutura.

Couto (2011, p. 60-61) afirma que:

Os métodos numéricos, em engenharia civil, permitem a análise de estruturas complexas. São métodos aproximados que possibilitam a resolução do conjunto de equações diferenciais ao qual um meio em equilíbrio deve satisfazer. Os mais conhecidos são: o método das diferenças finitas, o método dos elementos de contorno e o método dos elementos finitos, sendo este último o mais usual.

Para o dimensionamento de túneis existem disponíveis diversos métodos, cada método tem suas vantagens e limitações. É necessário escolher um método válido para o problema a ser analisado, levando em conta as características técnicas e construtivas. Neste capítulo são descritos alguns dos métodos e modelos numéricos utilizados atualmente. O dimensionamento consiste no cálculo da convergência do túnel, que é apresentado na fórmula 1.

$$U_{rr} = \frac{-u_r(r = R)}{R} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

U_{rr} é a convergência de um ponto na parede do túnel;

u_r é o deslocamento radial da parede do túnel;

R é o raio interno do túnel.

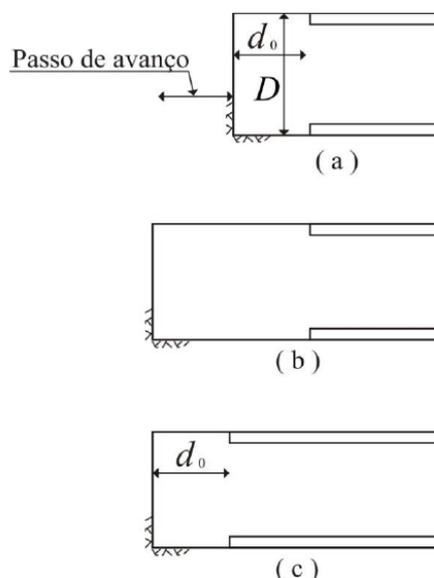
5.1 MODELAGEM DO PROCESSO DE ESCAVAÇÃO

O ciclo de avanço da frente de escavação do túnel pode ser dividido em 3 etapas (HANAFI; EMERY^{4 5}, 1980, 1982, apud COUTO, 2011, p. 60-61):

- a) revestimento instalado a uma distância d_0 da face da escavação;
- b) avanço da face de escavação, sem revestimento;
- c) avanço do revestimento até uma distância d_0 da face.

O processo de escavação e de colocação de suporte pode ser mais facilmente entendido através da figura 9.

Figura 9 – Etapas do processo de escavação e colocação de suporte



(fonte: adaptado de BERNAUD, 1991, p. 189)

Hanafy e Emery^{6 7} (1980, 1982, apud COUTO, 2011, p. 61) ressaltam que durante a etapa (b), devido a uma mudança no campo de tensões, muito da carga redistribuída é transferida para o

⁴ HANAFY, E. A.; EMERY, J.J. Advancing face simulation of tunnel excavation and lining placement. In: CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, 13., 1980, Montreal. **Proceedings ...** Toronto: CIMM, 1980. p. 119-125.

⁵ HANAFY, E. A.; EMERY, J.J. Three-dimensional simulation of tunnel excavation in squeezing ground. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUMERICAL METHODS IN GEOMECHANICS, 4., 1982, Edmonton. **Proceedings...** Charlottesville: University of Virginia, 1982. p. 1203-1209.

⁶ HANAFY, E. A.; EMERY, J.J. Advancing face simulation of tunnel excavation and lining placement. In: CANADIAN ROCK MECHANICS SYMPOSIUM, 13., 1980, Toronto. **Proceedings ...** Montreal: CIMM, 1980. p. 119-125.

suporte do túnel já instalado, especialmente para a última seção instalada. Uma parte da carga também é transferida para o maciço não escavado adiante da face, porém esse não é comumente considerado no projeto. Devido a essa redistribuição de cargas, ocorre uma mudança no padrão de movimentos de massa dentro do maciço.

5.1.1 Método de ativação e desativação

Bernaude (1991, p. 188, tradução nossa) afirma que:

O método de ativação-desativação dos elementos, utiliza uma técnica incremental que modeliza as sequências de escavação e de instalação do revestimento ou reforço de um túnel axissimétrico. A simulação da escavação é realizada pela retirada progressiva de faixas de maciço do interior do perfil do túnel. Por outro lado, se é previsto o uso de revestimento, ele é colocado logo após a etapa de escavação, acrescentando uma faixa de material a parede do túnel a uma distância d_0 da frente de escavação.

5.2 MÉTODOS BIDIMENSIONAIS

Os métodos bidimensionais apresentam algumas limitações importantes quando comparados com o método tridimensional, no entanto, exigem menor tempo de processamento e pouca exigência de hardware (COUTO, 2011, p. 63).

Gomes (2006, p. 36) ressalta que:

[...] a pressão fictícia no modelo bidimensional somente mantém o mesmo grau de deformação e tensão das paredes do túnel em situação real, ou em um modelo tridimensional, de modo que as deformações e as tensões que ocorrem dentro do maciço sejam um tanto quanto diferentes. Todavia, este tipo de aproximação pode ser tomada como razoável, conveniente e precisa sobre o ponto de vista prático de engenharia.

Existem dois métodos que são comumente utilizados em análises bidimensionais, o método de deformações planas e o axissimétrico. Ambos são apresentados a seguir.

5.2.1 Deformações planas

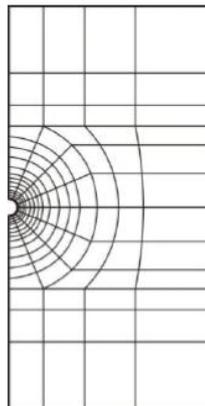
Segundo Couto (2011, p. 62):

⁷ HANAFY, E. A.; EMERY, J.J. Three-dimensional simulation of tunnel excavation in squeezing ground. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUMERICAL METHODS IN GEOMECHANICS, 4., 1982, Edmonton. **Proceedings...** Charlottesville: University of Virginia, 1982. p. 1203-1209.

As análises bidimensionais em deformações planas consistem em análises de seções transversais de maior interesse no processo construtivo, considerando-as em estado plano de deformações. Em tais análises, a carga pode ser anisotrópica. A geometria da abertura e o comportamento do maciço podem ser quaisquer.

Quando se trata o problema de escavação de uma galeria em deformações planas, o efeito da passagem da frente de escavação é equivalente a uma pressão fictícia $P_i^f(t)$ aplicada à parede da galeria. Essa pressão fictícia vale inicialmente P_∞ (pressão geostática na profundidade da galeria) e diminui à medida que a frente de escavação se distancia, até que atingir o valor zero para uma seção muito distante da frente. Esta hipótese é a base do método Convergência - Confinamento (método simplificado para dimensionamento de túneis) e conduz a uma aproximação real do problema. A figura 10 ilustra uma malha típica desse tipo de análise (BERNAUD, 1991, p. 143, tradução nossa).

Figura 10 – Malha típica de análises bidimensionais em deformações planas



(fonte: COUTO, 2011, p. 63)

5.2.2 Axissimétrico

Bernaud (1991, p. 183, tradução nossa) afirma que o método bidimensional axissimétrico pode ser utilizado quando:

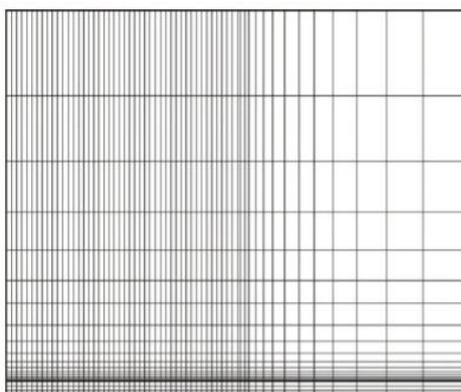
[...] o túnel apresenta uma geometria circular e que as propriedades mecânicas do material são tais que a grandeza do problema não dependa das coordenadas angulares. É o caso de um túnel profundo de seção circular em um meio isotrópico e

homogêneo, para o qual a tensão inicial no maciço é igualmente homogênea e isotrópica.

As análises numéricas bidimensionais axissimétricas modelam o processo de escavação de forma realista, quando as condições de axissimetria são respeitadas (BERNAUD, 1991, p. 183, tradução nossa).

A figura 11 apresenta uma malha típica de análises bidimensionais em axissimetria.

Figura 11 – Malha típica de análise bidimensional em axissimetria

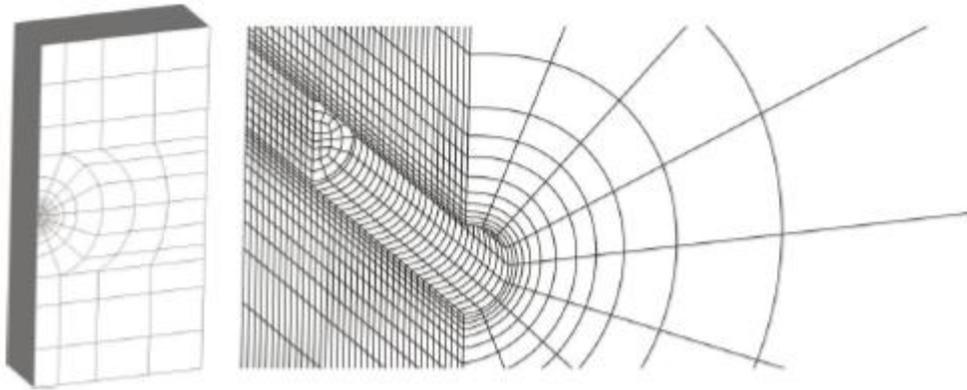


(fonte: adaptado de BERNAUD et al., 1995b, p. 59)

5.3 MÉTODOS TRIDIMENSIONAIS

Os modelos tridimensionais não estão sujeitos a limitações quanto a heterogeneidade, carregamentos, anisotropia do material, posição e forma das camadas que formam o maciço. Além disso, é o método que modela com precisão o processo de escavação e a colocação de revestimento. No entanto elas demandam maior tempo de processamento, maior capacidade de hardware e utilizam malhas que, em situações complexas, são de difícil construção. Na figura 12 se ilustra uma malha típica de análises tridimensionais (COUTO, 2011, p. 64).

Figura 12 – Malha típica de análises tridimensionais



(fonte: COUTO, 2011, p. 64)

6 MODELOS NUMÉRICOS DE INTERAÇÃO ENTRE MACIÇO E REFORÇO

Devido à complexidade de se realizar uma análise numérica direta em elementos finitos do meio maciço-tirante, alguns modelos foram desenvolvidos com a finalidade de deixar os cálculos menos demorados. Nesse capítulo é comentado o método de abordagem numérica direta e duas abordagens alternativas, sem discretização do meio, que são aplicáveis a maciços reforçados por tirantes.

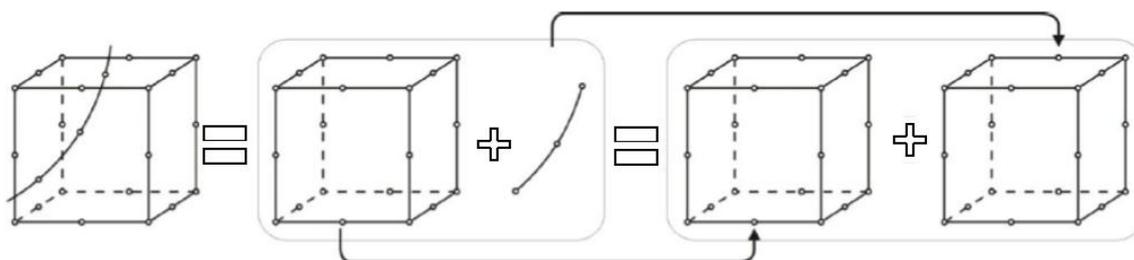
6.1 DISCRETO

Neste método é utilizada uma abordagem numérica direta, correspondente à utilização convencional do método dos elementos finitos. No caso da análise de interação maciço/suporte, considerando um suporte de tirantes ancorados ao longo de todo o comprimento, a malha se torna complexa, pois é necessário modelar os tirantes utilizando elementos de barra e o maciço utilizando elementos tridimensionais, sendo que os elementos tridimensionais próximos aos tirantes devem ser da mesma ordem de grandeza do diâmetro dos tirantes. Mesmo com a capacidade computacional atual, esse tipo de análise demandaria um tempo demasiado para ser concluído (COUTO, 2011, p. 65).

6.2 INCORPORADO

O método incorporado foi desenvolvido por Elwi e Hrundey em 1989. A partir de um comprimento do tirante, se determina o ponto inicial e final. Através de uma rotina de pré-processamento, se determina pontos de interação entre o maciço e o tirante. Dessa maneira são obtidos vários segmentos de reforço, cada um deles contido dentro de um elemento da malha base. A contribuição de cada segmento de tirante pode ser interpretada como um acréscimo na rigidez do correspondente elemento sólido que o contém. Como o tirante é tratado como um elemento de barra, essa contribuição depende da geometria e da posição dentro do maciço, e ocorre de maneira localizada. Essa consideração pode ser mais facilmente visualizada através da figura 13 (COUTO, 2011, p. 65).

Figura 13 – Representação da contribuição de um segmento de reforço na rigidez do elemento sólido por meio da transformação em um elemento sólido equivalente



(fonte: adaptado de DURAND, 2008, p. 15)

Couto (2011, p. 65) acrescenta que:

Esse elemento sólido equivalente deve ser da mesma natureza que o elemento da malha base. Assim, as matrizes de rigidez terão as mesmas dimensões e poderão ser somadas durante a análise. A formulação do método incorporado permite que seja levado em consideração deslizamento entre o tirante e a malha base. Nessa opção, o deslizamento, em um nó do elemento da barra, corresponde a um grau de liberdade e o deslizamento em outro ponto do mesmo elemento é obtido por interpolação.

6.3 HOMOGENEIZAÇÃO

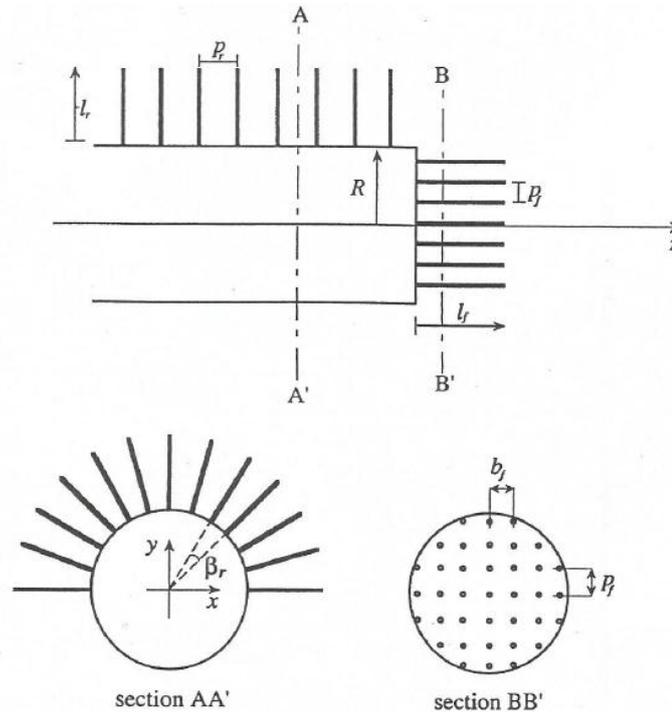
Esse modelo consiste em substituir o meio formado por maciço e tirante por um meio homogeneizado equivalente, de maneira que não seja necessário considerar cada componente separadamente (BERNAUD et al., 1995a, p. 267, tradução nossa).

Considerando-se um meio escavado homogêneo e isotrópico, e uma escavação cilíndrica de raio R , reforçada por tirantes radiais e frontais, dispostos à medida que a frente de escavação avança, e supostamente perfeitamente aderentes ao maciço. As características geométricas do problema são as seguintes (BERNAUD et al., 1995b, p. 55, tradução nossa):

- a) tirantes radiais: são dispostos perpendicularmente ao eixo de escavação do túnel, espaçados de uma distância pr segundo o eixo da escavação, e um espaçamento angular βr na seção transversal. O comprimento dos tirantes ao longo da direção radial é lr ;
- b) tirantes frontais: são dispostos paralelamente ao eixo de escavação, seu comprimento é lf . São igualmente espaçados na seção, de tal maneira que os pontos de inclusão formam uma malha retangular de espaçamentos bf (horizontal) e pf (vertical).

Essa caracterização fica mais compreensível através da figura 14.

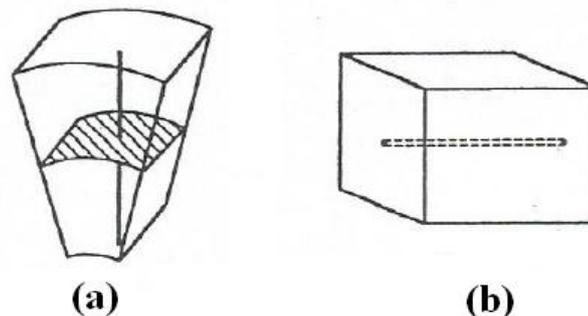
Figura 14 – Caracterização geométrica de um problema axissimétrico reforçado com tirantes frontais e radiais



(fonte: BERNAUD et al., 1995b, p. 54)

Supondo agora, que os reforços frontais e radiais são suficientemente densos, o maciço pode ser considerado como um meio localmente ortotrópico na zona reforçada pelos tirantes radiais e um meio homogêneo ortotrópico na zona reforçada pelos tirantes frontais. Deste modo, se tem volumes elementares que permitem definir os parâmetros pertinentes ao reforço. A figura 15 apresenta, de maneira mais clara, os elementos de reforço para as zonas de reforço frontal e radial (BERNAUD et al., 1995b, p. 55, tradução nossa).

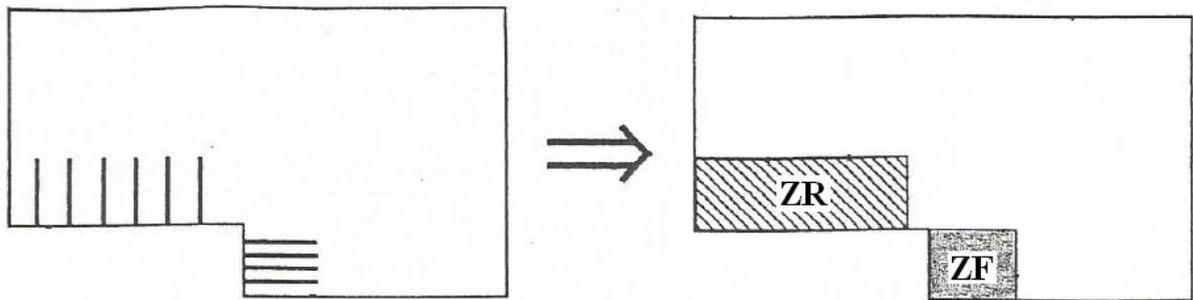
Figura 15 – Elementos representativos dos reforços:
(a) reforço da zona radial (b) reforço da zona frontal



(fonte: adaptado de BERNAUD et al., 1995b, p. 55)

Assim, através desse processo se pode simplificar consideravelmente o problema inicial, pois como o maciço e o reforço são considerados um meio homogêneo, não é mais necessária uma abordagem discreta para modelar a heterogeneidade das zonas reforçadas. A figura 16 ilustra a simplificação resultante do modelo de homogeneização (BERNAUD et al., 1995b, p. 55, tradução nossa).

Figura 16 – Simplificação do modelo homogeneizado



(fonte: adaptado de BERNAUD et al., 1995b, p. 55)

A proporção volumétrica de reforço, definida como uma proporção entre a área da seção transversal do tirante e a área da seção representativa correspondente volumétrica, é calculada conforme as fórmulas abaixo (BERNAUD et al., 1995b, p. 55, tradução nossa):

$$\eta_r(r) = \frac{S_r}{p_r \beta_r r}, r \in [R, R + l_r] \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

$\eta_r(r)$ é a proporção volumétrica de reforço radial em relação ao raio;

S_r é a área da seção transversal do tirante;

p_r é a distância entre dois tirantes consecutivos;

β_r é o arco da seção média entre dois tirantes da mesma seção transversal;

R é o raio interno do túnel;

l_r é o comprimento do tirante radial.

$$\eta_f = \frac{S_f}{p_f b_f} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

η_f é a proporção volumétrica de reforço frontal;

S_f é a área da seção transversal do tirante frontal;

p_f é a distância vertical entre dois tirantes frontais na seção frontal do túnel;

b_f é a distância horizontal entre dois tirantes frontais na seção frontal do túnel.

Como se pode observar através da fórmula 2, a proporção volumétrica de reforço radial decresce em função da distância r ao eixo central da escavação. Isso ocorre porque o espaçamento entre tirantes cresce à medida que há o afastamento do eixo central. Pode-se observar também, através da fórmula 3, que a proporção volumétrica de reforço frontal é constante (BERNAUD et al., 1995b, p. 55, tradução nossa).

A densidade de tirantes, definida como o número de tirantes por área da superfície da parede do túnel (quando $r = R$) para a zona de reforço radial, e como número de tirantes por área de superfície da frente de escavação para a zona de reforço frontal, é calculada segundo as seguintes fórmulas (BERNAUD et al., 1995b, p. 55, tradução nossa):

$$\delta_r = \frac{1}{p_r \beta_r R} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

δ_r é a densidade de tirantes na zona de reforço axial.

$$\delta_f = \frac{1}{p_f b_f} \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

δ_f é a densidade de tirantes na zona de reforço frontal.

A determinação do tensor de elasticidade é definida através de uma lei de comportamento do maciço reforçado. Os constituintes desse meio são supostos como tendo propriedades elásticas lineares e como sendo isotrópicos. Dessa maneira se pode caracterizar os materiais por seus respectivos módulos de Young e coeficientes de Poisson, ou seja, para o material rochoso E_m e ν_m , para os tirantes radiais E_r e ν_r e para os tirantes frontais E_f e ν_f . No caso em que a proporção volumétrica de reforço é baixa ($\eta \ll 1$) e a rigidez dos tirantes ser muito maior que a do maciço ($E_r \gg E_m$ e $E_f \gg E_m$), o material se comporta, em escala macroscópica como um meio elástico isotrópico ao longo do eixo radial para a zona de reforço radial, e ao longo do eixo da escavação para a zona reforçada frontal. Dessa maneira é possível simplificar o comportamento do meio homogeneizado, chegando as definições a seguir (BERNAUD et al., 1995b, p. 56, tradução nossa).

O módulo de Young longitudinal do meio homogeneizado, segundo o eixo do reforço é:

$$E_l^{hom} = E_m + K \quad (\text{fórmula 6})$$

O módulo de Young transversal do meio homogeneizado, segundo o eixo do reforço é:

$$E_t^{hom} = E_m \frac{E_m + K}{E_m + (1 - \nu_m^2)K} \quad (\text{fórmula 7})$$

K é um coeficiente de reforço, que deve ser definido tanto para os tirantes axiais (fórmula 8) quanto para os frontais (fórmula 9):

$$K(r) = \eta_r(r)E_r \quad (\text{fórmula 8})$$

$$K = \eta_f E_f \quad (\text{fórmula 9})$$

Os coeficientes de Poisson longitudinal (ν_L) continua o mesmo do maciço, e o transversal é determinado segundo a fórmula 10.

$$\nu_T = \nu_m \frac{E_m + (1 + \nu_m)\eta E_r}{E_m + (1 - \nu_m^2)\eta E_r} \quad (\text{fórmula 10})$$

7 CRITÉRIOS DE COMPORTAMENTO DE SÓLIDOS

Para realizar uma análise do comportamento de um material, é necessário determinar como ele se comporta quando submetido a tensões. Para isso se deve determinar um critério que melhor represente o comportamento desse material. Esses critérios determinam uma condição de escoamento, que decide se o material está tendo um comportamento elástico ou plástico (SPENCER, 2004, p. 147).

7.1 TRESCA

Essa teoria resulta da observação que, em um material dúctil, ocorre deslizamento durante o escoamento ao longo de planos criticamente orientados. Isso sugere que a tensão de cisalhamento máxima execute o papel de principal e se admite que o escoamento do material dependa apenas da máxima tensão de cisalhamento alcançada no interior do elemento. Dessa maneira, sempre que o valor crítico de tensão de cisalhamento é alcançado, inicia-se o escoamento em um elemento (POPOV, 1978, p. 300).

É importante ressaltar que tal teoria não sofre nenhuma alteração caso seja adicionado tensões hidrostáticas tanto de tração quando de compressão (POPOV, 1978, p. 302).

O critério de comportamento de Tresca pode ser calculado através da fórmula 11.

$$F(\underline{\sigma}, \alpha) = \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s \quad (\text{fórmula 11})$$

Onde:

F é o critério de plasticidade;

σ_1 é a tensão principal 1;

σ_3 é a tensão principal 3;

σ_s é o limite de elasticidade em tração simples.

7.2 VON MISES

A teoria de Von Mises, também conhecida como teoria da máxima energia de distorção, é baseada em conceitos de energia. A energia elástica total é dividida em duas partes: uma associada com a mudança volumétrica do material, e a outro causando distorções de cisalhamento. Igualando a energia de distorção de cisalhamento no ponto de escoamento a tração simples, com aquela sob tensão combinada, é estabelecido o critério para escoamento combinada (POPOV, 1978, p. 303).

Igualmente a teoria de Tresca, essa teoria não prevê mudanças na resposta do material caso sejam adicionadas tensões de tração e compressão hidrostática (POPOV, 1978, p. 305).

O critério de Von Mises é apresentado na fórmula 12.

$$F(\underline{\sigma}, \alpha) = \sqrt{\frac{3}{2}} \|\underline{\sigma}^D\| - \sigma_s \quad (\text{fórmula 12})$$

Onde:

$\underline{\sigma}^D$ é o tensor de tensões desviatório;

7.3 MOHR-COULOMB

Essa teoria apresenta uma relação linear entre a tensão cisalhante e a tensão normal. Quando o valor da tensão cisalhante ao qual o material está submetido atinge um valor limite, há uma mudança do estado elástico para o plástico. Esta tensão limite é a tensão de escoamento do material (PARISEAU, 2006, p. 497).

Quando o ângulo de atrito interno é zero, se tem uma particularização do critério de Mohr-Coulomb. Essa particularização é o critério de Tresca, apresentado anteriormente (PARISEAU, 2006, p. 498).

O critério de Mohr-Coulomb é apresentado na fórmula 13.

$$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha) = k \sigma_1 - \sigma_3 - S(\alpha) \quad (\text{fórmula 13})$$

Onde:

K é o coeficiente de empuxo;

$S(\alpha)$ é o limite de elasticidade em tração simples;

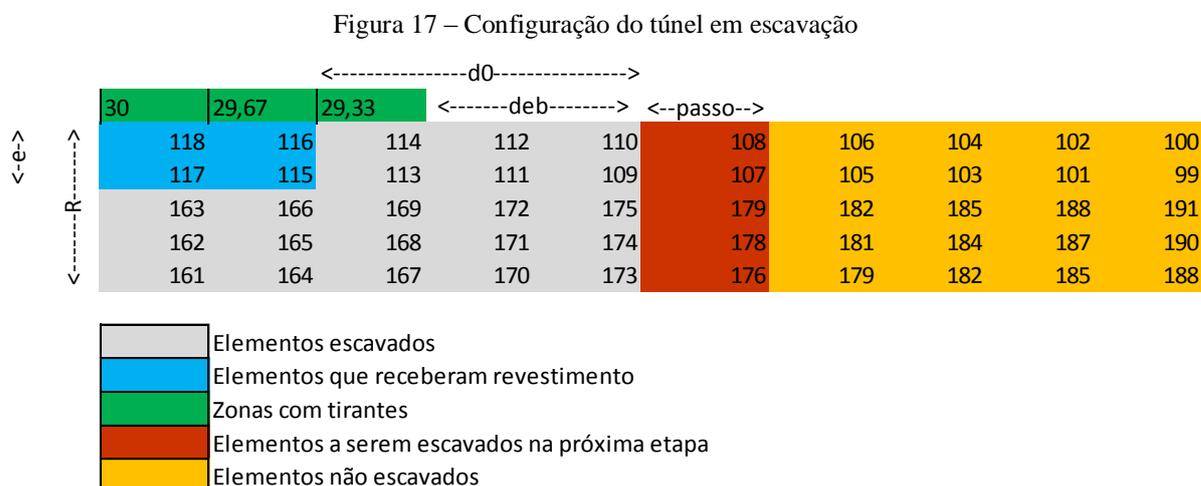
α é o parâmetro de encruamento;

8 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Nesse capítulo são explicados os métodos adotados e o funcionamento do software utilizado para as simulações do processo de escavação. Também são informados os parâmetros que permaneceram inalterados durante todas as simulações e os resultados obtidos pelo programa numérico GEOMEQ91.

Foi utilizado o método bidimensional axissimétrico para a modelização do túnel. Para a interação entre o tirante e o maciço se utilizou o modelo de homogeneização. O critério de plastificação adotado foi o de Tresca.

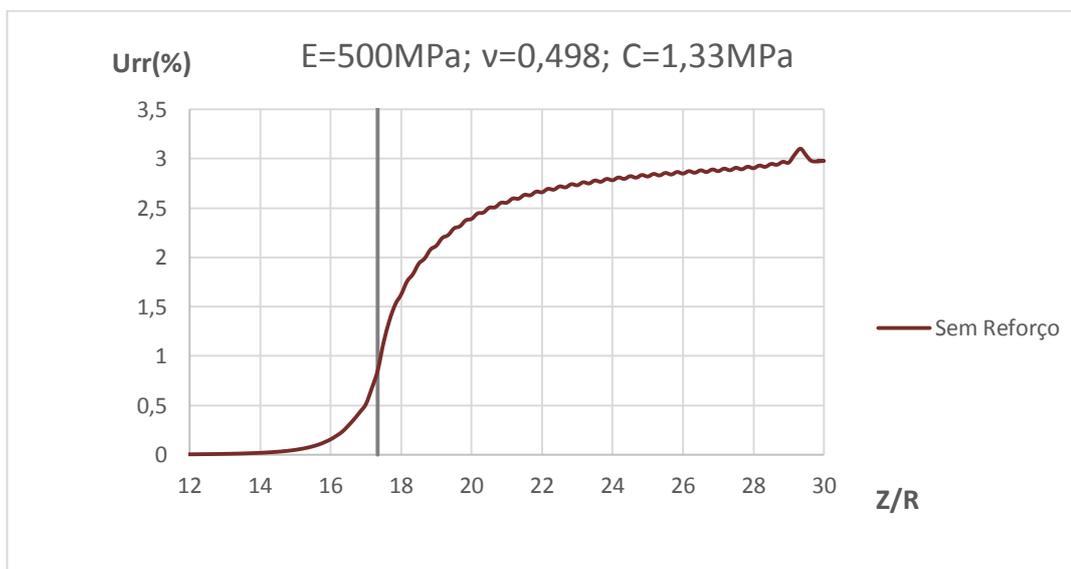
O software utilizado nesse trabalho faz uso do método de ativação e desativação para simular o processo de escavação do túnel e colocação de reforço e revestimento. Para melhor compreensão do funcionamento do software a figura 17 ilustra como é a configuração do túnel em escavação.



(fonte: elaborado pelo autor)

Nesse trabalho foi adotado $R=1\text{m}$ e o passo de escavação é de $1/3R$, pode-se notar que na escavação apresentada se tem um $d_0 = R$ e um $d_{eb} = 2/3R$. Na próxima etapa de escavação, os elementos <108>, <107>, <179>, <178> e <176> são desativados, ao mesmo tempo os elementos <114> e <113> tem as resistências reativadas, porém com as características do

Figura 19 – Curva típica de convergência



(fonte: elaborado pelo autor)

É importante destacar que no gráfico o túnel avança da direita para a esquerda e que a linha vertical representa a frente de escavação, ou seja, o que está à direita da linha já foi escavado e o que está à esquerda ainda não foi escavado. Nesse tipo de gráfico pode-se identificar o U_{eq} , que é o valor máximo de $U_{eq}(\%)$ no gráfico. Na parte inicial do gráfico ocorre um pico do valor de convergência, que corresponde ao primeiro passo de escavação, quando há um passo de avanço de R . Esse valor de pico não é considerado como o valor final de convergência e sim o valor no qual o gráfico se estabiliza.

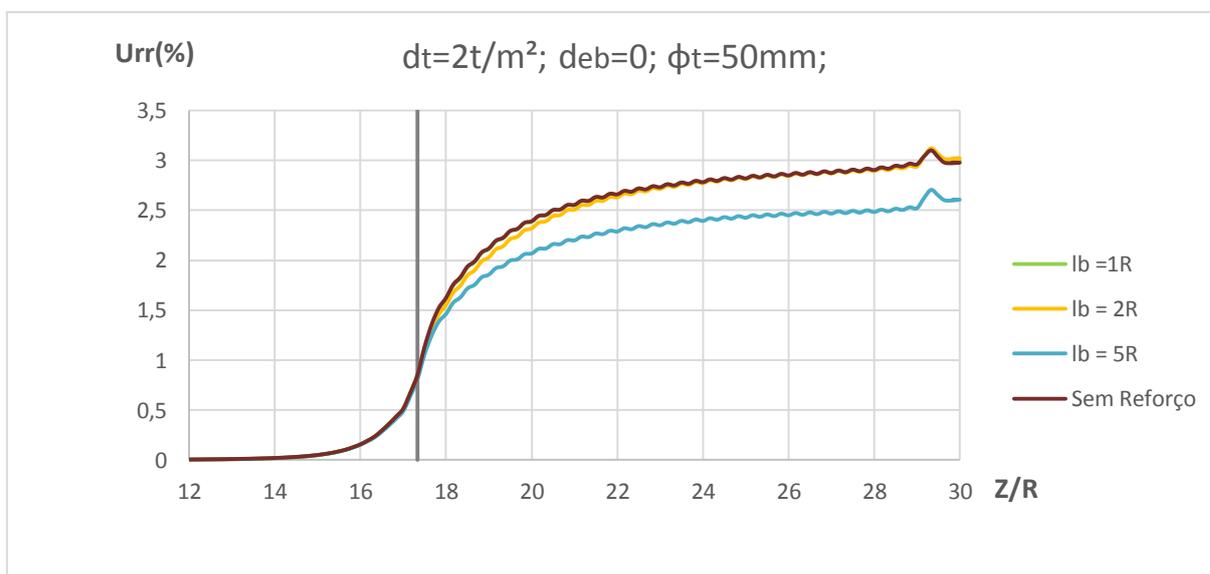
8.1 TIRANTES RADIAIS

Os tirantes radiais podem ter influência importante na diminuição da convergência do túnel. Nessa seção foram realizadas simulações para se identificar a influência dos parâmetros de interesse do trabalho. No título de cada gráfico é apresentada as características do reforço que não foram variadas.

8.1.1 Influência do comprimento dos tirantes

Como pode-se verificar através do gráfico da figura 20, os tirantes radiais com comprimentos de $l_b=1R$ e $l_b=2R$ não apresentam redução significativa da convergência quando comparados com o caso sem a utilização de reforço. Por outro lado, quando se utiliza um $l_b=5R$ se obtém uma redução de convergência considerável.

Figura 20 – Curvas de convergência: tirantes radiais – influência do comprimento dos tirantes

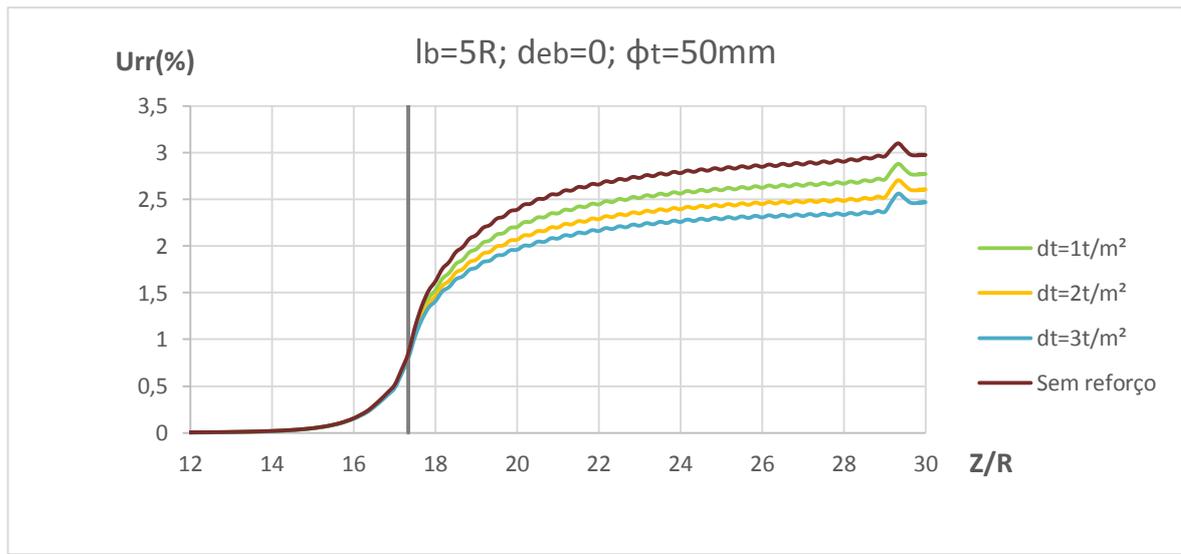


(fonte: elaborado pelo autor)

8.1.2 Influência da densidade de tirantes

A partir do gráfico da figura 21 constata-se que há redução da convergência do túnel sempre que se aumenta a densidade de tirantes. A redução mostra-se bastante significativa.

Figura 21 – Curvas de convergência: tirantes radiais – influência da densidade de tirantes

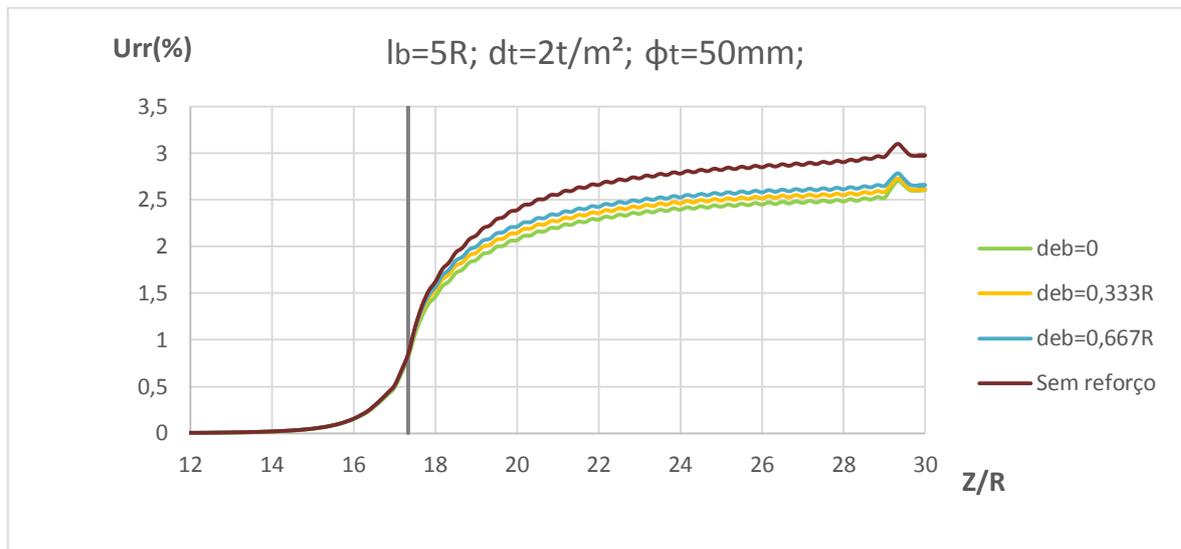


(fonte: elaborado pelo autor)

8.1.3 Influência da distância não reforçada

Quando se varia a distância de reforço à frente de escavação nota-se que há uma semelhança com a variação da densidade de tirantes. Pode-se constatar a partir do gráfico da figura 22 que se têm redução da convergência sempre que se diminui a distância a frente escavada, porém essa diminuição não se mostra muito significativa.

Figura 22 – Curvas de convergência: tirantes radiais – influência da distância não reforçada

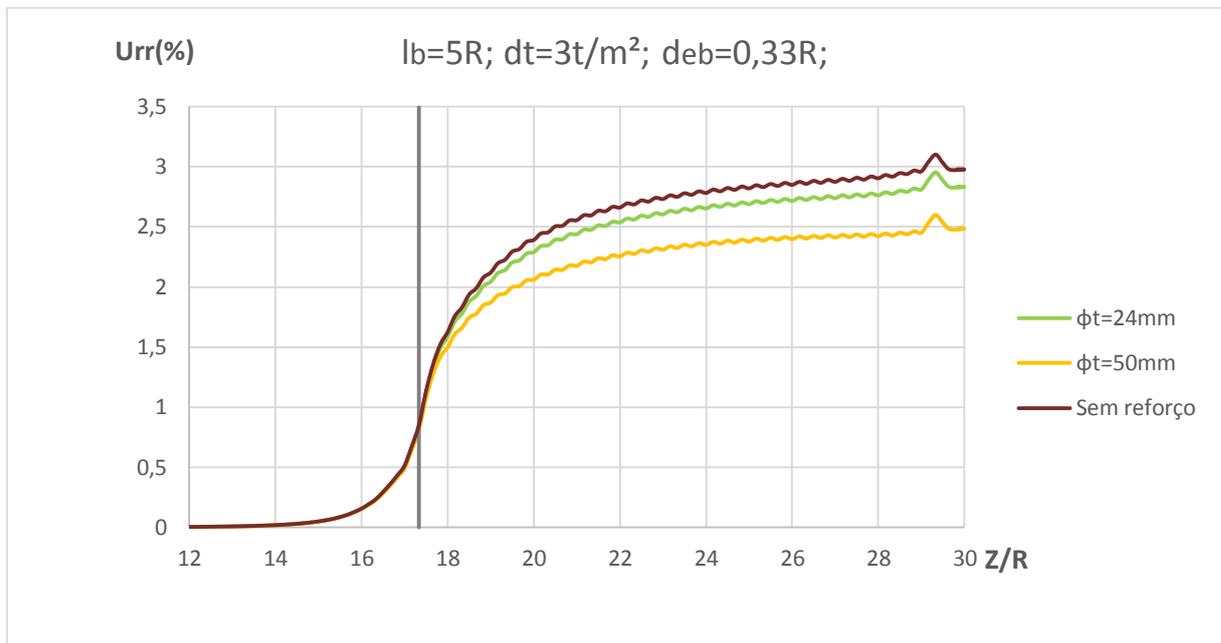


(fonte: elaborado pelo autor)

8.1.4 Influência do diâmetro dos tirantes

Como pode-se constatar a partir do gráfico da figura 23, aqui também se tem redução da convergência sempre que se aumenta o diâmetro do tirante. No entanto, ao contrário da distância não reforçada, o aumento do diâmetro do tirante tem grande influência na redução da convergência.

Figura 23 – Curvas de convergência: tirantes radiais – influência do diâmetro dos tirantes



(fonte: elaborado pelo autor)

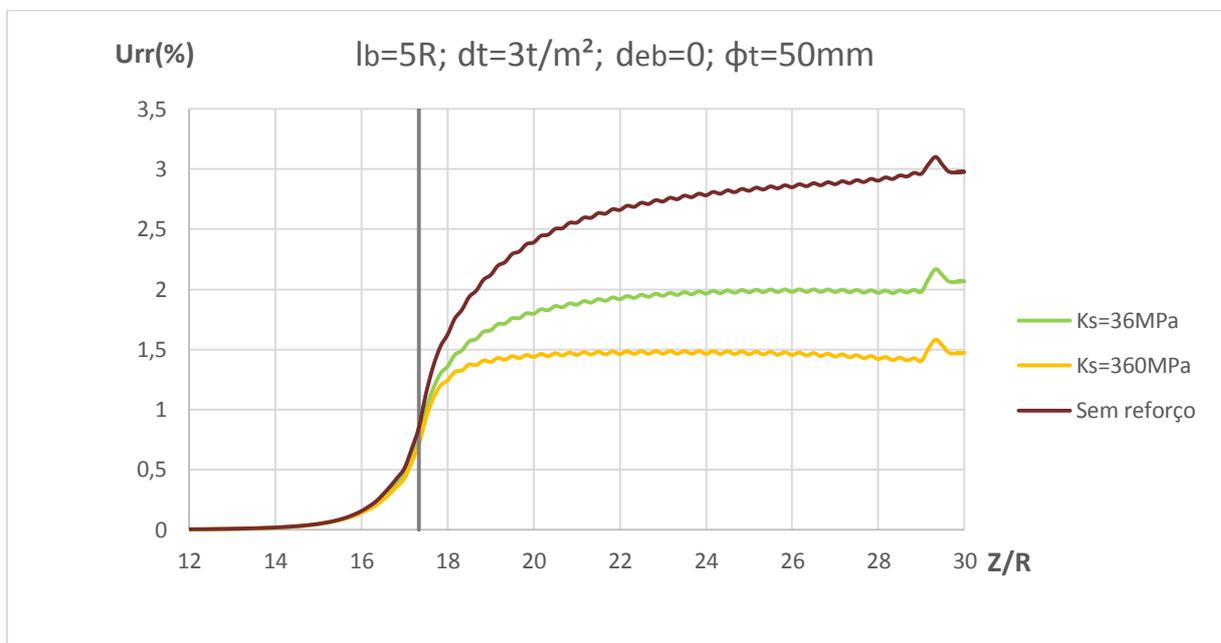
8.2 TIRANTES RADIAIS E REVESTIMENTO

Diferentemente das seções anteriores, nessa seção foi analisada apenas a influência da rigidez do revestimento. Para se fazer uma análise mais completa foram feitas comparações variando também os parâmetros dos tirantes. A distância não revestida (d_0) foi mantida constante em todas as simulações. O valor utilizado foi de $d_0 = R$.

8.2.1 Caso 1: $l_b=5R$; $d_t=3t/m^2$; $d_{eb}=0$; $\phi_t=50mm$;

A partir do gráfico da figura 24 pode-se notar que há uma redução significativa da convergência do túnel quando utiliza-se simultaneamente tirantes radiais e revestimento. Quando aplica-se revestimento com $K_s=360MPa$ a convergência do túnel se reduz praticamente a metade quando comparada com o caso sem reforço e sem revestimento. Ao se comparar os resultados obtidos com $K_s=36MPa$ e $K_s=360MPa$ observa-se que há uma redução significativa da convergência com o aumento da rigidez do revestimento.

Figura 24 – Curvas de convergência: tirantes radiais e revestimento – influência do revestimento no caso 1

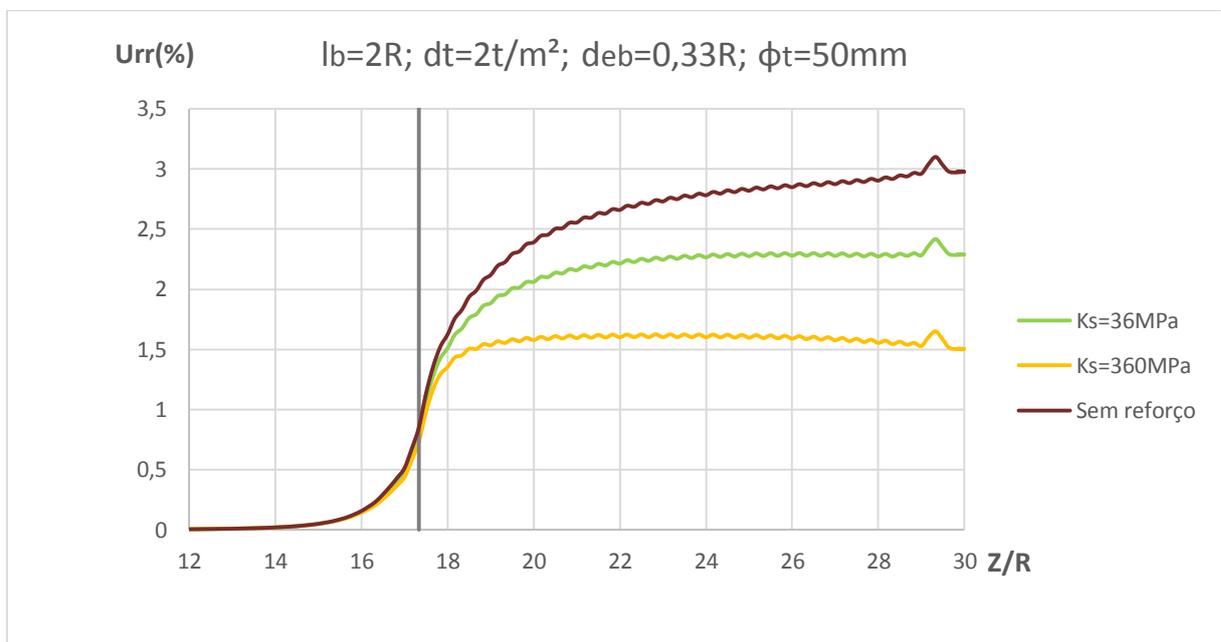


(fonte: elaborado pelo autor)

8.2.2 Caso 2: $l_b=2R$; $d_t=2t/m^2$; $d_{eb}=0,33R$; $\phi_t=50mm$;

Quando comparando o gráfico da figura 25 com o gráfico da figura 24 nota-se que há igualmente uma diminuição significativa da convergência do túnel quando aumenta-se a rigidez do revestimento.

Figura 25 – Curvas de convergência: tirantes radiais e revestimento – influência do revestimento no caso 2

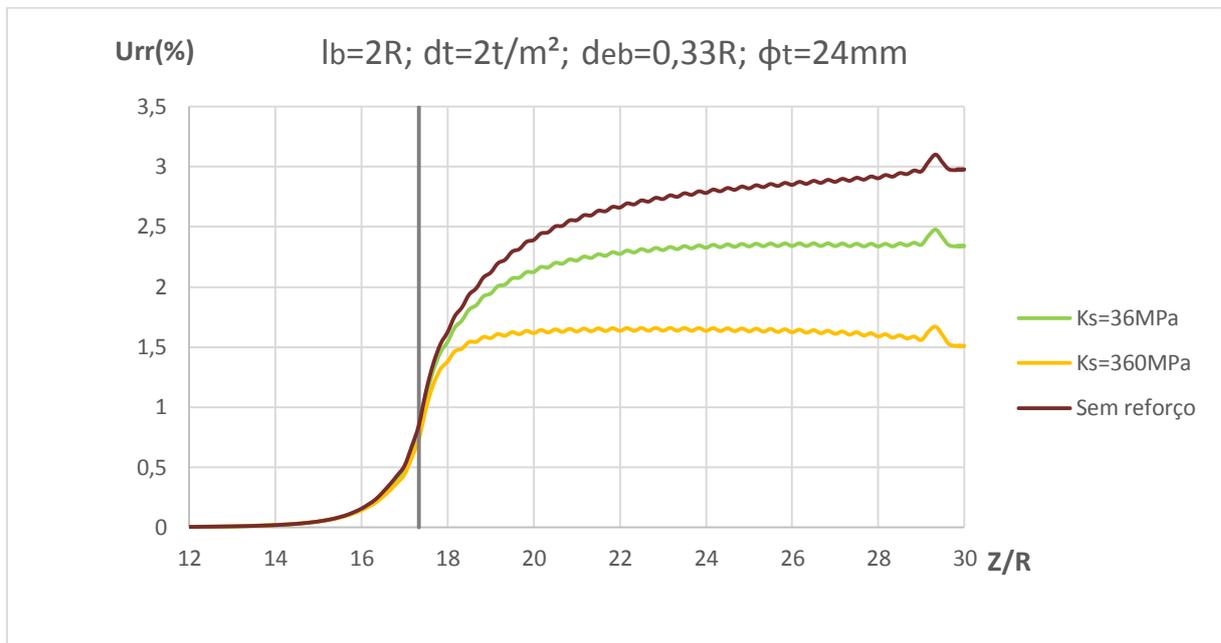


(fonte: elaborado pelo autor)

8.2.3 Caso 3: $l_b=2R$; $d_t=2t/m^2$; $d_{eb}=0,33R$; $\phi_t=24mm$;

Comparando-se o gráfico da figura 26 com os demais gráficos dessa seção, nota-se uma tendência de aumento da influência da rigidez do revestimento à medida que se reduz os parâmetros dos tirantes. Como nos outros casos, nota-se uma elevada influência da rigidez do revestimento na redução da convergência do túnel.

Figura 26 – Curvas de convergência: tirantes radiais e revestimento – influência do revestimento no caso 3

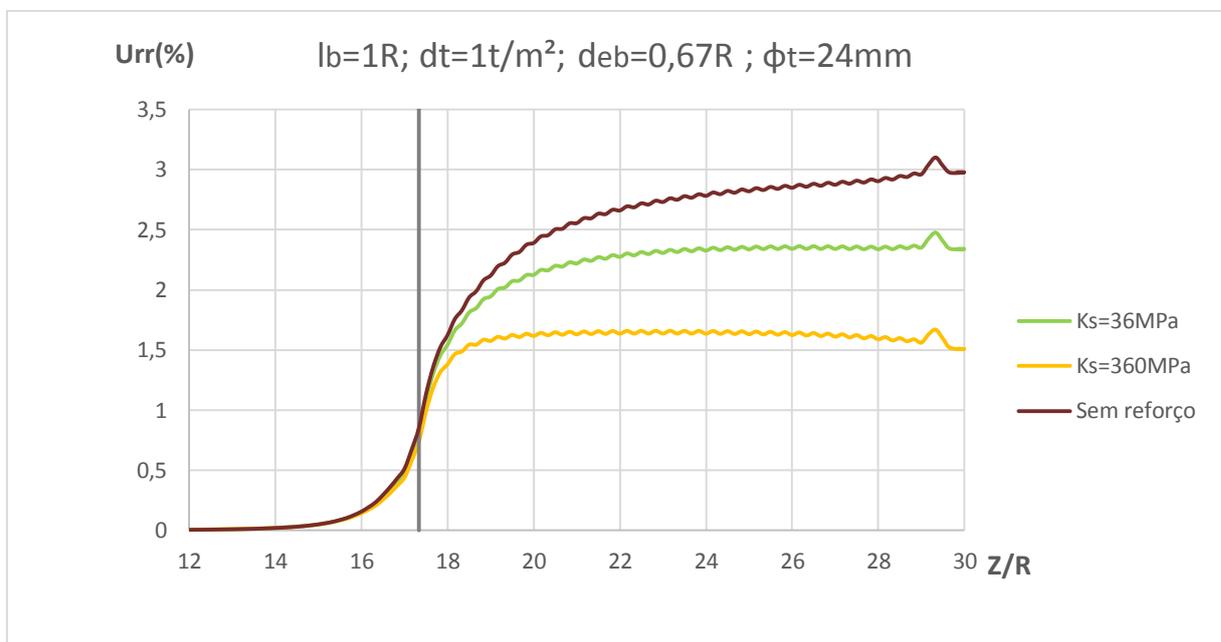


(fonte: elaborado pelo autor)

8.2.4 Caso 4: $l_b=1R$; $d_t=1t/m^2$; $d_{eb}=0,67R$; $\phi_t=24mm$;

A partir dos resultados obtidos com o gráfico da figura 27 e comparando-os com os resultados obtidos na seção 8.2.3 percebe-se que praticamente não há variação dos resultados, indicando que os parâmetros dos tirantes não têm influência significativa no resultado da convergência para esses dois casos. Igualmente aos outros casos dessa seção, foi possível verificar uma importante redução da convergência do túnel quando alterada a rigidez do revestimento.

Figura 27 – Curvas de convergência: tirantes radiais e revestimento – influência do revestimento no caso 4

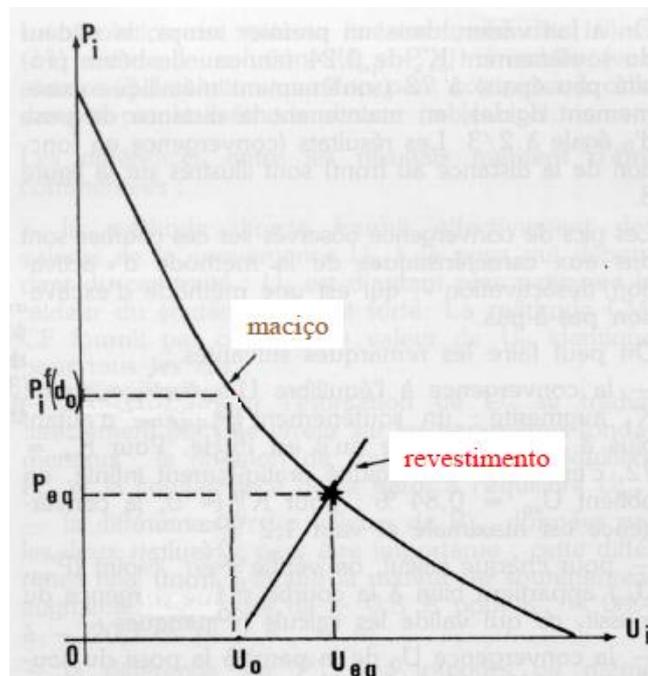


(fonte: elaborado pelo autor)

9 DIMENSIONAMENTO DE TÚNEIS

Neste capítulo foram realizadas verificações para se determinar se o revestimento utilizado seria suficiente para suportar a P_{eq} no túnel. A P_{eq} foi calculada para os quatro casos apresentados na seção 8.2 através de um software cujo as entradas são os seguintes parâmetros: v_m , E_m , C , P_{∞} e U_{eq} . Os valores utilizados estão definidos no princípio do capítulo 8, a exceção do U_{eq} que varia em cada caso. Para cada U_{eq} se obtêm um P_{eq} o que representa um ponto no diagrama ($P_i \times U_i$). A figura 28 ilustra um diagrama ($P_i \times U_i$), onde se pode identificar a convergência no instante da colocação do revestimento (U_0) e a pressão fictícia $P_i^f(d_0)$.

Figura 28 – Diagrama $P_i \times U_i$



(fonte: adaptado de BERNAUD, 1991, p.15)

9.1 PRESSÃO MÁXIMA

A pressão máxima é a pressão resistente do revestimento, ou seja, caso a pressão de equilíbrio alcançada pelo túnel seja superior a $P_{m\acute{a}x}$ ocorre ruptura do revestimento, e conseqüentemente seria necessário realizar um redimensionamento do túnel. Para a determinação da $P_{m\acute{a}x}$ foi utilizada a seguinte equação:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{R_c e}{R + e} \frac{2R + e}{2(R + e)} \quad (\text{f\acute{o}rmula 14})$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ é pressão máxima que o suporte resiste;

R_c é a resist\ecencia compress\ao do concreto;

R é o raio interno do túnel;

e é a espessura do revestimento;

No presente trabalho foram utilizados os seguintes valores para a determinação do $P_{m\acute{a}x}$:

$$R_c = 30\text{MPa}$$

$$R = 1\text{m}$$

$$e = 0,1\text{m}$$

Aplicando-se os valores acima na fórmula 10 encontra-se um $P_{m\acute{a}x} = 2,6\text{MPa}$. Como os parâmetros para o cálculo são os mesmos para todos os túneis, o $P_{m\acute{a}x}$ é igual em todos os casos.

9.2 VERIFICAÇÃO

Nessa seção foram verificados os diferentes casos apresentados na seção 8.2. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Peq para os casos da seção 8.2.

	Ks=36MPa			Ks=360MPa		
	Ueq (%)	Peq (MPa)	Coef. Seg.	Ueq (%)	Peq (MPa)	Coef. Seg.
Caso 1	1,98	2,53	1,028	1,41	2,07	1,256
Caso 2	2,28	2,72	0,956	1,53	2,18	1,193
Caso 3	2,35	2,76	0,942	1,55	2,21	1,176
Caso 4	2,35	2,76	0,942	1,56	2,21	1,176

(fonte: elaborado pelo autor)

Comparando-se os valores de P_{eq} da tabela 1 com o $P_{m\acute{a}x}$ calculado anteriormente, pode-se verificar que para um $K_s=36\text{MPa}$ o túnel do caso 1 satisfaz o critério para que não ocorra ruptura do revestimento, no entanto os outros casos não satisfazem a verificação. Para um túnel com $K_s=360\text{MPa}$, observa-se que o critério de dimensionamento é satisfeito em todos os casos.

10 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi analisado a influência que alguns parâmetros do reforço com tirantes passivos têm na redução da convergência de um túnel profundo. Foram avaliados o comprimento dos tirantes, a densidade de tirantes instaladas na parede do túnel, a distância do reforço à frente de escavação e o diâmetro do tirante. Posteriormente também foi analisada a influência da rigidez do revestimento.

A análise dos resultados e as conclusões foram realizadas através da comparação da convergência de equilíbrio de cada caso. A partir desses resultados foi possível chegar as conclusões descritas nesse capítulo. É importante ressaltar que a validade desses resultados se aplica ao caso estudado, utilizando-se os métodos e modelos escolhidos para a análise e os materiais com as características informadas.

Na primeira etapa do trabalho, constatou-se que o comprimento dos tirantes é um parâmetro fundamental para a redução da convergência do túnel. Para que o reforço tenha efeito, é necessário que o tirante tenha um comprimento mínimo. Também foi possível observar que a densidade de tirantes instalados na parede do túnel é um parâmetro que apresenta uma influência importante na redução da convergência, pois a medida que se aumenta a densidade se tem reduções significativas da convergência de equilíbrio do túnel. A distância não reforçada foi identificada como o parâmetro com menor influência no cálculo, não apresentando grandes aumentos de convergência a medida que se afastava a instalação dos tirantes da frente de escavação. Por fim, foi observado que o diâmetro dos tirantes é o parâmetro mais influente do reforço na redução da convergência do túnel.

Na segunda etapa, quando se simulou o uso simultâneo dos tirantes radiais e do revestimento, foi possível concluir que a rigidez do revestimento é um parâmetro importante na redução da convergência do túnel. Inclusive, constatou-se que o revestimento tem uma influência maior do que a utilização de reforços com tirantes passivos.

REFERÊNCIAS

- BERNAUD, D. **Tunnels profonds dans les milieux viscoplastiques: approches expérimentale et numérique.** 1991. 353 f. Thèse (Docteur Structures et Matériaux) – Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1991.
- BERNAUD, D.; DE BUHAN, P.; MAGHOUS, S. Numerical simulation of the convergence of a bolt-supported tunnel through a homogenization method. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 19, p. 267-288. Sept. 1995a.
- _____. Calcul numérique des tunnels boulonnés par une method d'homogénéisation. **Revue Française de Géotechnique**, n. 73, p. 53-65. 4^{ème} trimestre 1995b.
- CHAPMAN, D.; METJE, N.; STÄRK, A. **Introduction to tunnel construction.** London: Taylor & Francis, 2010. Applied Geotechnics, v. 3.
- COUTO, E. C. **Um modelo tridimensional para túneis escavados em rocha reforçada por tirantes passivos.** 2011. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- DURAND, R. F. **Análise tridimensional de estruturas geotécnicas submetidas a reforço e drenagem.** 2008 153 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- FETHI, K. **Etude numérique de la stabilité d'une section du Tunnel T4 de l'autoroute Est-Ouest.** 2012. 147 f. Mémoire (Magistère en Génie Civil) – Institut de Génie Civil, d'Hydraulique et d'Architecture, Université El Hadj Lakhdar, Batna, DZ, 2012.
- GOMES, R. A. M. P. **Análise tridimensional de túneis considerando o comportamento dependente do tempo na interação maciço-suporte.** 2006. 306 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- PARISEAU, W. G. **Design analysis in Rock Mechanics.** London, Taylor & Francis, 2006.
- POPOV, E. P. **Introdução à mecânica dos sólidos.** São Paulo: Edgar Blücher, 1978 (reimpr. 2001).
- SPENCER, A. J. M. **Continuum mechanics.** Mineola, USA: Dover, 2004.
- VOLKMANN, G. M.; SCHULBERT, W. Geotechnical Model for Pipe Roof Supports in Tunneling. In: WORLD TUNNELING CONGRESS, 33rd, 2007, Praga. **Proceedings...** Praga: ITA-AITES, 2007. Não paginado. Disponível em: <https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getVollText?pDocumentNr=112041&pCurrPk=29321>. Acesso em: 5 jun. 2014