

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

Luiz Givago Franco Dutra

**TÚNEIS REVESTIDOS POR CONCRETO PROJETADO:
ANÁLISE DA INTERAÇÃO MACIÇO-REVESTIMENTO**

Porto Alegre
julho 2011

LUIZ GIVAGO FRANCO DUTRA

**TÚNEIS REVESTIDOS POR CONCRETO PROJETADO:
ANÁLISE DA INTERAÇÃO MACIÇO-REVESTIMENTO**

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

julho 2011

LUIZ GIVAGO FRANCO DUTRA

**TÚNEIS REVESTIDOS POR CONCRETO PROJETADO:
ANÁLISE DA INTERAÇÃO MACIÇO-REVESTIMENTO**

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, 18 julho de 2011

Profa. Denise Bernaud Maghous
Dra. pela *Ecole Nationale de Ponts et Chaussées*, Paris
Orientadora

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

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

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

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

Aos meus pais, Lia e Luiz, e a minha irmã Larissa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Profa. Denise Bernaud Maghous, orientadora deste trabalho, pela atenção dispensada sempre quando solicitada e pela ajuda para tornar este um bom trabalho.

Agradeço à Profa. Carin Maria Schmitt pelo empenho nas disciplinas do Trabalho de Conclusão, as quais foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul por importante parcela da minha formação pessoal e profissional, que se deu através de diversas experiências e do convívio com mestres e colegas.

Agradeço aos amigos da época do CMPA, os quais sempre estão presentes, nem sempre fisicamente, mas sempre lembrados.

Eu não tenho uma resposta simples,
mas sei que posso responder
algo melhor.

Brandon Flowers

RESUMO

DUTRA, L. G. F. **Túneis Revestidos por Concreto Projetado**: análise da interação maciço-revestimento. 2011. 57 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Dentre os métodos de análise estrutural de túneis, aqueles que consideram o efeito acoplado da interação entre maciço e suporte são os mais adequados para uma melhor análise desse problema. Esse trabalho avaliou a influência dos seguintes parâmetros nos deslocamentos radiais de um túnel revestido por concreto projetado: distância da colocação de revestimento à face de escavação, velocidade de escavação e propriedades mecânicas dos materiais. Atualmente o concreto projetado é tido como um dos principais suportes de túneis e sua característica principal é a dependência que suas propriedades mecânicas têm do tempo. Aqui o concreto projetado foi modelado, num primeiro momento, como material viscoplástico e, num segundo, como material elástico. O meio no qual está inserido o túnel foi considerado um meio viscoplástico modelado pelo critério de resistência de Drucker-Prager. A avaliação foi feita por intermédio do programa GEOMEQ91 desenvolvida por Bernaud (1991), o qual é baseado no método dos elementos finitos e usa o procedimento chamado **ativação-desativação** de elementos. Como resultado dos cálculos realizados, são apresentadas as curvas de avaliação dos deslocamentos radiais da estrutura, também chamadas de curvas de convergência, para os valores 300 MPa, 3.000 MPa e 30.000 MPa do módulo de elasticidade do concreto projetado, para as velocidades 1 m/dia, 5 m/dia, 10 m/dia e 20 m/dia e para as distâncias não-revestidas de $2/3$ e $4/3$ do raio. Aqui o túnel estudado é profundo e cumpre as condições de axissimetria. Foi observado que para baixas velocidades de escavação há maiores deslocamentos radiais, assim como maiores distâncias não revestidas entre a face de escavação e o revestimento. Além disso, verificou-se que quanto menor a rigidez, maiores são os efeitos a longo prazo e que, para determinadas situações, é importante escolher de forma adequada o modelo para o concreto projetado, pois há diferenças ao modelá-lo em viscoplasticidade e, após, em elasticidade.

Palavras-chave: túneis; interação maciço-revestimento; concreto projetado; viscoplasticidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: esquema do delineamento da pesquisa	18
Figura 2: direção das tensões principais no maciço	24
Figura 3: curvas características da interação maciço-revestimento	25
Figura 4: esquema relativo ao avanço da face de escavação	26
Figura 5: consideração da convergência u_0 pelo método convergência-confinamento	29
Figura 6: consideração da rigidez do revestimento pelo método convergência-confinamento	30
Figura 7: diferença entre suporte linear e não-linear	30
Figura 8: influência da rigidez do revestimento na convergência	32
Figura 9: comportamento elástico linear e elástico não-linear	33
Figura 10: comportamento viscoso de um material, aumento da deformação com o tempo para uma tensão constante	34
Figura 11: representação do modelo elasto-viscoplástico	35
Figura 12: ilustração de um esquema de malha utilizada em rotina computacional GEOMEQ91	45
Figura 13: esquema da malha utilizada em uma escavação “i”	46
Figura 14: esquema da malha utilizada em uma escavação “i+1”	46
Figura 15: gráfico das curvas de convergência em determinadas escavações para $v=5$ m/dia, $d_0=(4/3)R$, $E=30.000$ Mpa, modelo viscoplástico.....	47
Figura 16: gráfico das curvas de convergência em função do módulo de elasticidade para $v=20$ m/dia, $d_0=(4/3)R$, modelo viscoplástico	48
Figura 17: gráfico das curvas de convergência em função do módulo de elasticidade para $v=5$ m/dia, $d_0=(4/3)R$, modelo viscoplástico	48
Figura 18: deslocamentos iniciais em trecho não revestido	49
Figura 19: efeito da parada de escavação nos deslocamentos radiais	49
Figura 20: gráfico de convergências para $E=300$ MPa, $d_0=(2/3)R$, em tempo de estabilização, modelo viscoplástico	50
Figura 21: gráfico de convergências para $E=30.000$ MPa, $d_0=(2/3)R$, em tempo de estabilização, modelo viscoplástico	50
Figura 22: gráfico de convergências para $E=30.000$ MPa, $d_0=(4/3)R$, em tempo de estabilização, modelo viscoplástico	51
Figura 23: gráfico da diferença entre curvas de convergência em função de d_0 para $v=5$ m/dia em estabilização	51
Figura 24: gráfico da diferença entre curvas de convergência em função de d_0 para $v=20$ m/dia em estabilização	52

Figura 25: gráfico da diferença entre curvas de convergência em função da viscosidade para $v=20$ m/dia, $d_0=(2/3)R$ e $E=300$ MPa.....	53
Figura 26: gráfico da diferença entre curvas de convergência do modelo utilizado para o revestimento para $v=20$ m/dia e $d_0=(2/3)R$	54
Figura 27: gráfico da diferença entre curvas de convergência do modelo utilizado para o revestimento para $v=1$ m/dia, $d_0=(4/3)R$ e $E=30.000$ MPa.....	54

LISTA DE SÍMBOLOS

K_s = rigidez do revestimento (MPa)

P_i = tensão aplicada nas paredes do maciço (MPa)

λ = taxa de desconfinamento

P_∞ = tensão geostática na profundidade do túnel (MPa)

γ = peso específico do solo (MN/m³)

H = profundidade (m)

R = raio (m)

d_0 = distância não revestida (m)

P_s = pressão ao equilíbrio (MPa)

P_∞ = pressão do maciço (MPa)

u = deslocamento radial (m)

U = convergência

u_0 = deslocamento radial a uma distância d_0 da face do túnel (m)

u_s = deslocamento ao equilíbrio (m)

$f_{cu}(t)$ = compressão simples num tempo t (MPa)

$f_{cu}(1)$ = compressão simples após 24h (MPa)

$f_{cu}(28)$ = compressão simples aos 28 dias (MPa)

t = tempo (s)

ε = deformação total

ε_e = deformação elástica

ε_{vp} = deformação viscoplástica

$F(\sigma, t)$ = critério de viscoplasticidade

F_0 = critério de resistência de referência

$G(\sigma)$ = potencial viscoplástico

η = viscosidade do material (MPa.s)

σ = tensão (MPa)

E = módulo de elasticidade (MPa)

ν = coeficiente de Poisson

C = coesão (MPa)

Φ = ângulo de atrito (graus)

Z = posição da seção da escavação (m)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DE PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	15
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	15
2.2.1 Objetivo Principal	15
2.2.2 Objetivos Secundários	15
2.3 HIPÓTESES	16
2.4 PRESSUPOSTOS	16
2.5 PREMISSE	16
2.6 DELIMITAÇÃO	17
2.7 LIMITAÇÕES	17
2.8 DELINEAMENTO	17
3 O PROBLEMA DE INTERAÇÃO MACIÇO-REVESTIMENTO	20
3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO	20
3.1.1 Métodos Empíricos	20
3.1.2 Métodos Semi-Empíricos	21
3.1.3 Métodos das Reações Hiperestáticas	21
3.1.4 Métodos da Interação Maciço-Revestimento	22
3.2 SIMPLIFICAÇÕES NO USO DO MÉTODO DE INTERAÇÃO MACIÇO- REVESTIMENTO	22
3.3 O MÉTODO CONVERGÊNCIA-CONFINAMENTO	25
3.4 LEI DE COMPORTAMENTO DO MACIÇO.....	32
3.5 CONCRETO PROJETADO COMO REVESTIMENTO DE TÚNEIS.....	35
3.5.1 Resistência Mecânica	37
3.5.2 Módulo de Elasticidade	39
4 ANÁLISE PARAMÉTRICA	41
4.1 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	44
4.2 INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DO REVESTIMENTO	47
4.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ESCAVAÇÃO E DA DISTÂNCIA DE COLOCAÇÃO DO REVESTIMENTO À FACE	48
4.4 INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE	52
4.5 CONCRETO PROJETADO MODELADO EM ELASTICIDADE.....	53
5 CONCLUSÕES	55

1 INTRODUÇÃO

O espaço subterrâneo é utilizado pela humanidade desde o tempo em que as moradias dos seres humanos eram as cavernas. As civilizações que surgiram após essa Era se utilizavam do subsolo para enterrar seus mortos e para explorar riquezas lá encontradas. Na Idade Moderna e Contemporânea, a necessidade de uma melhor infraestrutura, para dar vazão à transferência de riquezas entre as nações, exigiu soluções de Engenharia mais complexas e eficientes. Nesse sentido, a construção de túneis foi impulsionada, pois ferrovias e rodovias foram projetadas, e seus traçados passavam por morros ou montanhas que se encontravam entre a origem e o destino de recursos.

No século XX, a partir da década de 60, dá-se uma maior importância às questões relativas ao meio ambiente e à melhoria da qualidade de vida, buscando o menor impacto ambiental possível nos projetos de Engenharia. Nesse sentido, o espaço subterrâneo surge como alternativa para a implantação de infraestrutura. Isso faz com que os meios urbanos, por exemplo, se transformem em locais mais confortáveis e agradáveis para viver, uma vez que a superfície fica disponível para o uso mais nobre: moradia, locais de trabalho e lazer.

A aplicabilidade de estruturas subterrâneas vai além do transporte de mercadorias e pessoas. Esse tipo de estrutura é utilizado para o transporte de água, esgoto, gás, entre outros; passagem de cabos elétricos e telefônicos; é utilizada como caverna de armazenamento de recursos naturais, combustíveis ou resíduos, como os radioativos, por exemplo; e, até, como estacionamentos, bibliotecas, museus, locais de lazer em geral.

No meio urbano, a tendência mundial é a expansão dos sistemas de metrô e ferrovias, como em centros urbanos norte-americanos, europeus e asiáticos. Essa tendência não é acompanhada em mesmo ritmo pelos países em desenvolvimento, como o Brasil. Esses sistemas de transporte acarretam, na maioria das vezes, a construção de vias subterrâneas. Devido ao crescimento econômico brasileiro da última década e sua tendência de continuidade, as soluções usuais de Engenharia de Tráfego, para o meio urbano, se tornam insuficientes para atender o aumento de fluxo ocasionado pelo aumento do poder aquisitivo da população.

A demanda por soluções alternativas de Engenharia gera, por conseguinte, a necessidade de aprimoramento de técnicas construtivas e do cálculo estrutural. Para o cálculo de túneis, o Novo Método Austríaco de Túneis (NATM), proposto em 1964, foi largamente empregado. No entanto, diversos casos de acidentes relacionados a ele são facilmente encontrados na literatura. Outros métodos simplificados, tais como o Método Convergência-Confinamento e o Novo Método Implícito, foram propostos para a verificação da interação maciço-revestimento, esse último apresentando resultados mais próximos ao real. Ainda assim, para o cálculo mais preciso de estruturas subterrâneas, faz-se uso de ferramentas computacionais, baseadas no método dos elementos finitos.

No que concerne à tecnologia de revestimento, pode-se citar os seguintes materiais como sendo usualmente aplicados: concreto pré-fabricado, concreto armado, cintas metálicas, tirantes e, finalmente, o concreto projetado. O concreto projetado é atualmente a técnica dominante para suporte de túneis escavados mecânica ou manualmente.

Dado o exposto, esse trabalho teve como objetivo fazer uma análise de um túnel revestido por concreto projetado, material que apresenta variação de resistência conforme o tempo, em maciço que também possui características viscoplásticas. Para isso, foi utilizada análise numérica.

No segundo capítulo, são apresentadas as diretrizes de pesquisas que nortearam o trabalho. Na sequência, no terceiro capítulo, é apresentado o embasamento teórico básico para compreensão do problema de interação solo-estrutura. No quarto capítulo, tem-se a apresentação do procedimento de cálculo utilizado, bem como a apresentação dos valores dos parâmetros utilizados, os resultados em forma de gráficos e a sua análise. Por fim, o quinto capítulo traz as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

2 DIRETRIZES DE PESQUISA

A seguir é apresentado o método de pesquisa desse trabalho.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Dada a variação ao longo do tempo das características mecânicas do concreto projetado e sua aplicação como revestimento, esse trabalho responderá a seguinte questão: de que forma os parâmetros do problema de interação maciço-revestimento influenciam nos deslocamentos radiais das seções de um túnel viscoplástico?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

Esse trabalho tem como objetivo principal a análise da forma como os parâmetros do problema de interação maciço-revestimento influenciam os deslocamentos radiais de um túnel revestido por concreto projetado.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários são:

- a) a análise do comportamento de maciços viscoplásticos quando revestidos por concreto projetado modelado em elasticidade;
- b) a análise do comportamento de maciços viscoplásticos quando revestidos por concreto projetado modelado em viscoplasticidade;
- c) a descrição dos parâmetros inerentes ao problema de interação-macijo revestimento;
- d) a avaliação dos deslocamentos radiais do túnel a curto e longo prazo.

2.3 HIPÓTESES

A pesquisa tem como hipóteses:

- a) revestimentos viscoplásticos geram maiores deslocamentos radiais;
- b) uma maior distância entre a colocação do revestimento e a face do túnel gera maiores deslocamentos radiais;
- c) uma maior velocidade de escavação gera diminuição dos valores de deslocamentos radiais.

2.4 PRESSUPOSTOS

Foram pressupostos da pesquisa:

- a) as condições de axissimetria garantem resultados aproximados à realidade da interação macijo-revestimento;
- b) o modelo de Drucker-Prager é adequado para verificação de maciços viscoplásticos;
- c) a lei de comportamento apresentada para o concreto projetado é adequada.

2.5 PREMISSA

Alguns estudos apresentaram avaliações do comportamento mecânico do sistema macijo-suporte cujo revestimento é o concreto projetado, através da variação dos parâmetros

inerentes ao problema. No entanto há a necessidade de realizar estudos complementares a fim de caracterizar de forma ampla a análise desse comportamento.

2.6 DELIMITAÇÃO

O trabalho delimitou-se à análise dos deslocamentos radiais do sistema acoplado maciço-revestimento de um túnel teórico profundo de seção circular e cujo raio é 1 metro.

2.7 LIMITAÇÕES

Como limitações, a pesquisa apresentou as seguintes:

- a) o maciço é considerado um material homogêneo de comportamento isótropo;
- b) o revestimento tem espessura constante e é homogêneo de comportamento isótropo;
- c) o concreto projetado é apresentado como único revestimento, não havendo presença de tirantes radiais ou frontais;
- d) a velocidade de escavação é constante;
- e) a distância de colocação do revestimento à face é constante.

2.9 DELINEAMENTO

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

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição das leis de comportamento dos materiais estudados;
- c) definição dos parâmetros a serem avaliados;
- d) cálculo através do programa GEOMECH91 (BERNAUD, 1991);
- e) elaboração dos gráficos de convergência;

- f) análise dos resultados;
- g) conclusão do trabalho.

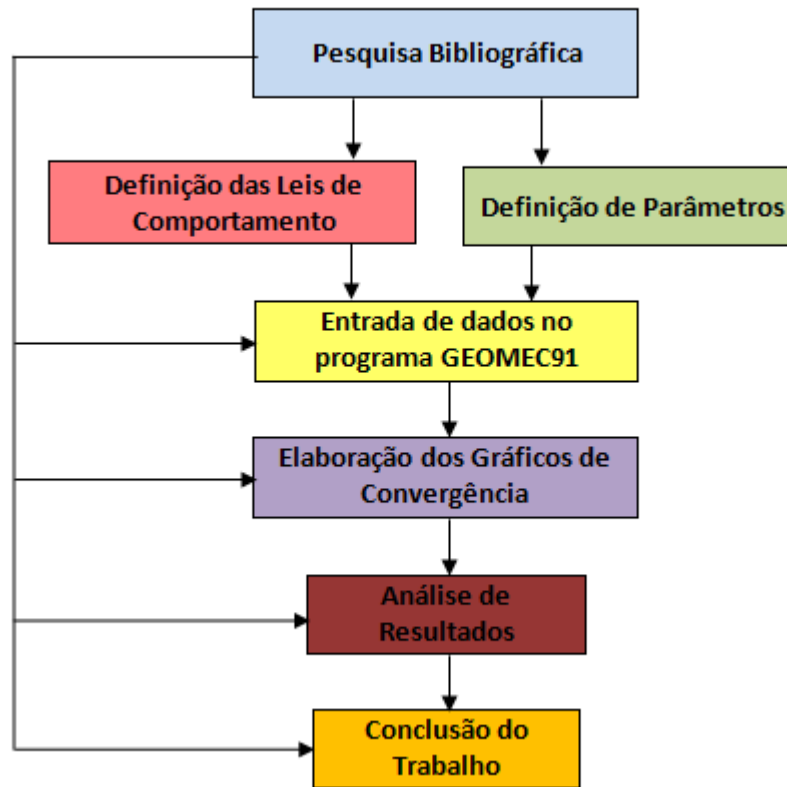


Figura 1: esquema do delineamento da pesquisa

A **pesquisa bibliográfica** consistiu na pesquisa de materiais publicados que são referência ao assunto abordado no presente trabalho, a fim de sustentar seu embasamento teórico. A revisão bibliográfica foi realizada de forma contínua.

A **definição das leis de comportamento dos materiais** teve por objetivo indicar de forma adequada o comportamento dos materiais estudados, através de formulações existentes na literatura. Para o maciço, consistiu na descrição do modelo viscoplástico e, para o concreto projetado, na definição das formulações adequadas relativas à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade. A **definição dos parâmetros a serem avaliados** ocorreu de forma simultânea à etapa anterior e teve por fim estabelecer os valores das variáveis a serem avaliadas posteriormente. Além disso, deu-se a descrição desses parâmetros, tais como

distância de colocação de revestimento à face de escavação, velocidade de escavação e propriedades mecânicas dos materiais.

O **cálculo através do programa GEOMEQ91** (BERNAUD, 1991) consistiu na entrada e coleta de dados na ferramenta computacional mencionada e eventual adaptação da rotina computacional para adequação do modelo ao problema estudado. Paralelamente, conforme os dados foram extraídos, deu-se a **elaboração dos gráficos de convergência** que consistiu em plotar os deslocamentos radiais em função dos demais parâmetros.

Na sequência, deu-se a **análise de resultados**, momento em que se avaliou a influência dos parâmetros estudados na interação maciço-revestimento. Além disso, os resultados foram também comparados aos resultados obtidos em análises anteriores a essa pesquisa.

Finalmente, deu-se a **conclusão do trabalho**, ratificando-se ou não as hipóteses levantadas na metodologia de pesquisa.

3 O PROBLEMA DE INTERAÇÃO MACIÇO-REVESTIMENTO

A tecnologia de revestimento de túneis muito avançou desde as primeiras formas de suporte utilizadas. Nos primórdios da exploração do meio subterrâneo, as formas de sustentação eram realizadas empiricamente. A tecnologia disponível hoje em dia abrange uma gama de soluções de suporte, permitindo o uso de revestimentos que sejam adequados para situações específicas, em função do custo, do método construtivo e do ambiente escavado. Mas, não foi apenas a tecnologia de materiais que evoluiu, a de dimensionamento também. Atualmente, não se pensa em um projeto de túneis sem a utilização de ferramentas computacionais, as quais podem representar, de forma precisa, o problema real e fornecer resultados confiáveis.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CÁLCULO

A *Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain* (2001) classifica os métodos para dimensionamento de suporte da seguinte forma:

- a) empíricos;
- b) semi-empíricos;
- c) das reações hiperestáticas;
- d) de interação maciço-revestimento.

Nos itens que seguem, os métodos citados são descritos.

3.1.1 Método Empíricos

Os métodos empíricos, ou qualitativos, permitem definir uma ordem de grandeza do dimensionamento de revestimentos a serem utilizados na execução da obra. Esses métodos são essencialmente fundamentados em descrições qualitativas do maciço e das condições de

escavação do túnel. Portanto, não existem cálculos a serem realizados, mas sim uma abordagem essencialmente empírica, baseada em diversas experiências, que não consideram a interação maciço-revestimento, nem problemas de deformações por consequência. Seu uso é aconselhável em fase de estudo do projeto e limitado a categorias particulares de terrenos. Os métodos mais recentes são o RMR (*Rock Mass Rating*), desenvolvido por Bieniawski e o método do coeficiente Q, desenvolvido por Barton. O Novo Método Austríaco de Túneis (NATM) também propõe dimensionamento empírico da estrutura (ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN, 2001, p. 76).

3.1.2 Métodos Semi-empíricos

Os métodos semi-empíricos são um conjunto de abordagens de cálculo baseadas em mecanismos de ruptura bem identificados do terreno ou do revestimento. Esses métodos, muitas vezes, também não consideram os mecanismos de interação maciço-revestimento. Os cálculos realizados consistem em determinar, num primeiro momento, o carregamento aplicado na estrutura, para após analisar sua estabilidade. Entre os principais métodos, cita-se o proposto por Rabcewicz como tendo papel importante nas primeiras aplicações do concreto projetado pelo NATM. Métodos semi-empíricos são utilizados para o dimensionamento do concreto projetado atuando como pele protetora e pele resistente, não sendo utilizáveis para dimensionamento de um anel estrutural. Podem ser citados os métodos desenvolvidos por Terzaghi e Protodiaknof como referências (ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN, 2001, p. 77).

3.1.3 Método das Reações Hiperestáticas

O método das reações hiperestáticas consiste em modelar o revestimento por barras e o terreno por molas. Dessa forma, esse método aborda diretamente as interações maciço-revestimento. Para utilizá-lo deve-se primeiramente avaliar o carregamento, através de métodos semi-empíricos, pelo método convergência-confinamento para meios contínuos ou por uma análise por blocos no caso de maciços rochosos. Após deve-se avaliar a rigidez das

molas que modelizam o terreno (ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN, 2001, p. 77).

3.1.3 Método de Interação Maciço-Revestimento

O método da interação maciço-revestimento consiste em modelar o terreno circundante como um meio contínuo, podendo ser aplicado de diferentes formas (ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN, 2001, p. 77), ou seja, através de:

- a) elementos finitos;
- b) diferenças finitas;
- c) resolução analítica nos casos mais simples.

Ele permite modelar de forma simultânea a estrutura, o terreno, as fases de realização da escavação e os mecanismos de interação. Além disso, pode ser utilizado de forma analítica para avaliação dos módulos de reações necessários para o uso do método das reações hiperestáticas. Deve-se ressaltar que o método pode ser bem sofisticado, através de modelos bidimensionais ou tridimensionais, com leis de comportamento complexas, modelagem de tirantes e consideração de descontinuidades do maciço. Todavia, pode ser pesado e dependente de diversos parâmetros de difícil apreciação. É, portanto, usualmente desejado simplificar a modelagem. Na maioria dos casos, utilizam-se modelos simplificados: bidimensionais que usam princípios do método convergência-confinamento (ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN, 2001, p. 77).

3.2 SIMPLIFICAÇÕES NO USO DO MÉTODO DE INTERAÇÃO MACIÇO-REVESTIMENTO

Conforme Graziani et al. (2005, p. 346), o projeto de túneis é geralmente baseado em esquemas supersimplificados das condições reais do processo de construção, cujas falhas locais durante a construção, se houverem, são superadas confiando fortemente na experiência

dos contratantes e consultores envolvidos no projeto. A aplicação de modelagem numérica para previsão do comportamento do túnel é ainda uma tarefa desafiante devido às seguintes questões:

- a) a modelagem do avanço da escavação e da instalação do suporte próximo à face é essencialmente um problema 3D; mesmo assim, modelos 2D em deformações planas são ainda mais populares, pois a modelagem 3D consome tempo e requer mais habilidade e experiência para a análise de resultados;
- b) as condições do solo ao longo da rota do túnel podem ser somente aproximadas por previsões anteriores ao começo da escavação;
- c) o comportamento global do túnel é significativamente afetado pelos vários detalhes da tecnologia de construção (fases de escavação, qualidade do concreto projetado e a precisão de sua aplicação) além dos parâmetros mecânicos do solo e do material suportado;
- d) o estado de tensões na camada de revestimentos como o concreto projetado é marcadamente influenciado pelo progressivo aumento de resistência, o qual ocorre simultaneamente ao aumento da carga gerada pelo avanço da escavação;
- e) fatores dependentes do tempo podem derivar desde alívio de pressões do maciço perturbado em torno da escavação, a longo prazo, bem como do comportamento viscoso do revestimento e da rocha.

A distribuição de tensões no maciço durante a execução da escavação ilustra o comportamento tridimensional do problema. Com relação à distribuição de tensões, Gomes (2006, p. 10-11) afirma o seguinte:

A abertura de um túnel em um maciço conduz, nas regiões da vizinhança da frente de escavação, a modificações tridimensionais de tensão. [...] as direções das tensões principais se encontram inicialmente paralelas ao eixo do túnel, e à medida que a face se aproxima estas direções são giradas de até 90°. As maiores mudanças de tensões se localizam a uma distância de aproximadamente 1 a 1,5 vezes o diâmetro do túnel ao redor da face. A maioria das mudanças tridimensionais de tensão é geralmente estabilizada a uma distância menor ou igual a dois diâmetros atrás da face e os valores finais se aproximam dos valores encontrados em soluções analíticas do estado plano [...].

A figura 2 ilustra a situação descrita acima.

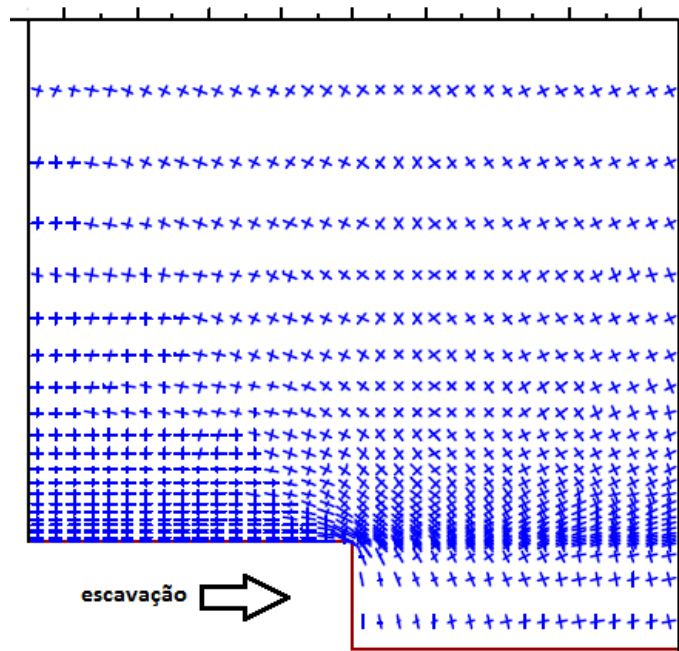


Figura 2: direção das tensões principais no maciço escavado
(adaptado de GOMES, 2006, p. 11)

Ele ainda afirma que (GOMES, p. 43-44):

A existência de simetria de revolução em relação a um determinado eixo permite simplificar o estudo de problemas tridimensionais, através de métodos de análise numérica, utilizando malhas planas. A **condição de axissimetria** da estrutura obriga que o modelo tenha infinitos planos de simetria que passem pelo eixo do túnel (eixo de simetria) e implica que suas características e carregamentos não variem com o ângulo θ , ou seja, na direção tangencial.

As simplificações relativas às condições de axissimetria estão relacionadas abaixo:

- a) condições relativas ao maciço,
 - seção circular;
 - face do túnel plana e ortogonal ao eixo;
 - maciço homogêneo;
 - comportamento isótropo;
- b) condições relativas ao revestimento,
 - extremidade do revestimento plana e ortogonal ao eixo;
 - espessura constante;
 - material homogêneo;
 - comportamento isótropo;

- c) existência de um campo inicial de tensões geostático;
- d) velocidade de escavação constante;
- e) distância de colocação do revestimento à face constante.

3.3 O MÉTODO CONVERGÊNCIA-CONFINAMENTO

O método de convergência-confinamento é um método de análise simplificada da interação entre o terreno e o suporte, o qual faz parte do grupo de métodos de interação maciço-revestimento definidos pela *Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain*. Esse método permite escapar à complexidade de um modelo em três dimensões. Diversos autores propuseram análises que contribuíram para a formulação do método: Fenner¹ (1938), Pacher² (1964), Lombardi³ (1973) e Panet e Guellec⁴ (1974).

Panet⁵ (1995 apud ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN, 2001, p. 79) introduz no método, para levar em conta nos casos bidimensionais em deformações planas, os efeitos tridimensionais inerentes à interação maciço-revestimento que se desenvolve ao longo do processo de escavação. É conveniente lembrar que o método não constitui propriamente um método de cálculo para um revestimento como o concreto projetado, caso esse não seja modelado como material não-linear, mas um método de avaliação do estado de equilíbrio entre o revestimento e o terreno.

Para a avaliação da interação por convergência-confinamento é necessário definir as curvas características do problema. As curvas características são relações entre pressão e deslocamento radial do maciço e do suporte e são duas, a de convergência do maciço e a de

1 Referência conforme dados informados na obra lida: FENNER, R. Untersuchungen zur Erkenntis des Gebirgsdruckers, Glükauf, 74, 1938.

2 Referência conforme dados informados na obra lida: PACHER, F. Deformations messungen in Versuchsstollen als Mittel zur Erfoschung des Gebirgs verhaltens und zur Bemessung des Ausbaues, Felsmechanik und Ingenieursgeologie, Supplementum IV, 1964.

3 Referência conforme dados informados na obra lida: LOMBARDI, G. Dimensionning of tunnel linings with regard to constructional procedure. Tunnels and Tunneling, July 1973.

4 PANET, M.; GUELLEC, P. Contribution à l'étude du soutènement derrière le front de taille. In: 3rd CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS, 1974, Denver. **Proceedings...** v. 2, part B.

5 Referência conforme dados informados na obra lida: PANET, M. Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement. Presses de l'ENPC, Paris, 1995.

confinamento do revestimento. Conforme Gomes (2006, p. 53), elas são relações entre pressão no entorno de uma abertura e seu deslocamento radial, cujas inclinações dependerão da rigidez dos materiais. Por consequência, o equilíbrio da interação dar-se-á basicamente em função das inclinações das curvas características, na intersecção de ambas.

A **curva característica do maciço** é definida a partir da ideia que o maciço, em um primeiro momento, não está perturbado pela escavação. A escavação gera alívio de pressões e, por conseguinte, aumento dos deslocamentos radiais. Esses deslocamentos podem definir o que se chama de **convergência** de um túnel, a qual depende essencialmente dos seguintes parâmetros:

- a) distância x entre a seção de medição e a face de escavação;
- b) do tempo entre escavações sucessivas;
- c) da distância não revestida até a face do túnel d_0 .

A convergência de um túnel é um parâmetro definido como sendo a relação entre os deslocamentos radiais absolutos, em determinada seção, e o raio do túnel. É expressa da seguinte forma:

$$U = -\frac{u}{R} \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

U = convergência;

u = deslocamento radial na parede do túnel, em metros;

R = raio, em metros.

Em um diagrama pressão *versus* deslocamento, a curva característica é uma curva decrescente e está ilustrada pela figura 3. Para uma pressão inicial geostática, chamada P_∞ , o maciço apresenta convergência nula. A pressão interna, a qual também pode ser chamada também de **pressão fictícia** (P_i), pode ser entendida como a pressão que deveria ser aplicada na parede do

túnel não revestido para, quando em deformações planas, obter-se a mesma convergência de em um cálculo em três dimensões. Ao considerar a existência de uma pressão fictícia, o método convergência-confinamento substitui o problema tridimensional por um problema bidimensional em deformações planas.

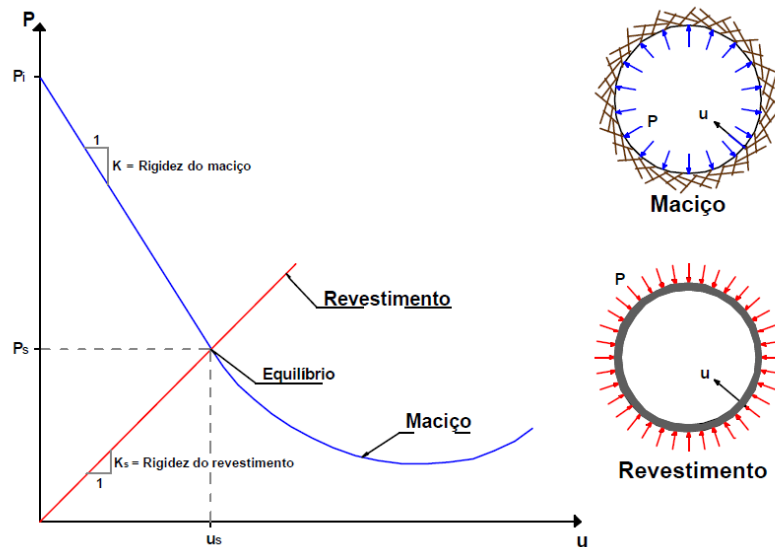


Figura 3: curvas características da interação maciço-revestimento (GOMES, 2006, p. 52)

A pressão fictícia pode ser definida pela fórmula:

$$P_i = (1-\lambda) \cdot P_\infty \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

P_i = pressão aplicada nas paredes do maciço;

λ = taxa de desconfinamento (0 a 1);

P_∞ = pressão geostática no nível da escavação.

$$P_\infty = \gamma \cdot H \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

γ = peso específico do solo;

H = profundidade.

À medida que a taxa de desconfinamento aumenta ocorre alívio de tensões no maciço que gera um deslocamento radial das paredes (u), ou seja, ocorre a convergência do maciço. Abaixo é apresentada uma ilustração do avanço da escavação.

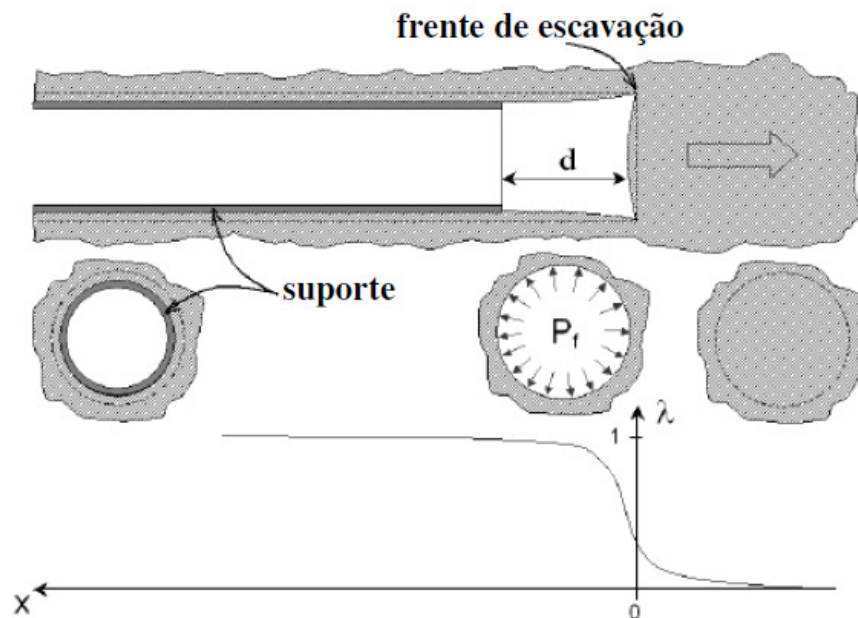


Figura 4: esquema relativo ao avanço da face de escavação ($d=d_0$)
(PANET; GUENOT⁶, 1982 apud FREITAS, 2008, p. 14)

A **curva característica do revestimento** é determinada em função do material utilizado. O revestimento se opõe à convergência das paredes do túnel exercendo uma pressão chamada de **pressão de confinamento**. Tipicamente o revestimento é colocado a certa distância (d_0) da face do túnel, a qual pode ser chamada de distância não revestida. Deslocamentos u_0 são produzidos na zona próxima à face de escavação, na região sem suporte, e estão relacionados a uma taxa de desconfinamento λ_0 (ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE

⁶ PANET, M.; GUENOT, A. Analysis of convergence behind the face of a tunnel. In: TUNNELLING'82 IMM., 1982, Brighton. **Proceeding...** London: [s. n.], 1982.

L'ESPACE SOUTERRAIN, 2002, p. 87). Esse efeito pode ser avaliado pelo método de forma gráfica conforme ilustrado pela figura 5.

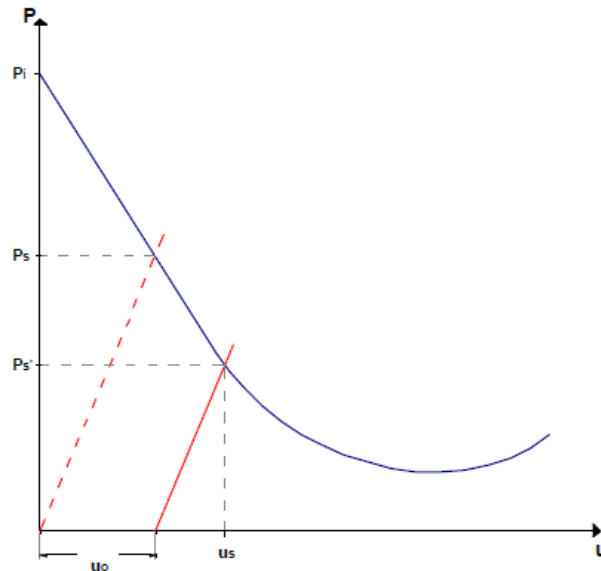


Figura 5: consideração do deslocamento u_0 pelo método convergência-confinamento (GOMES, 2006, p. 54)

Para revestimentos rígidos a curva apresenta maior inclinação e a intersecção com a curva de convergência do maciço dá-se num ponto de maior pressão de equilíbrio e menor deslocamento radial. Para revestimentos flexíveis a curva apresenta inclinação menor e a intersecção com a curva de convergência do maciço dá-se num ponto de menor pressão de equilíbrio e maior deslocamento radial. Outra análise que pode ser feita é a comparação entre revestimentos elástico-lineares e revestimentos não lineares, o que é ilustrado pela figura 6. As figuras 6 e 7 ilustram, respectivamente, o efeito da flexibilidade do revestimento no equilíbrio e a diferença entre um suporte linear e um suporte não-linear.

A curva que intercepta o ponto **A** da figura 7 representa uma curva característica de um material com comportamento linear, como o suporte pré-moldado, por exemplo. A curva que intercepta o ponto **B** representa um material com comportamento não linear, como o concreto projetado. A reta que intercepta o ponto **C** representa um revestimento que foi aplicado em um momento em que o maciço já estava comprometido estruturalmente (GOMES, 2006, p. 54-55). Cabe aqui ressaltar que, as curvas propostas por Gomes (2006, p. 54-55), para serem totalmente corretas deveriam representar a existência de deslocamentos iniciais u_0 .

profundos, já que esses estão de acordo com as condições de axissimetria. Ainda assim, Wong e Kaiser⁸ (1991 apud GOMES, 2006, p. 55) e Bernaud et al. (1994, p. 6-7) mostraram que o método não determina corretamente o parâmetro u_0 , subestimando, dessa forma, o valor da pressão de equilíbrio o que não vai ao encontro da segurança. De acordo com Bernaud et al. (1994, p. 7) e Bernaud e Rousset (1996, p. 679), em elasticidade os erros sobre a pressão de equilíbrio (P_s) ficam em torno de 20%, enquanto em plasticidade podem atingir 50%. Essa má avaliação da convergência inicial dá-se porque o método não considera a influência da rigidez K_s do revestimento na sua determinação. A figura 8, abaixo, ilustra esse problema.

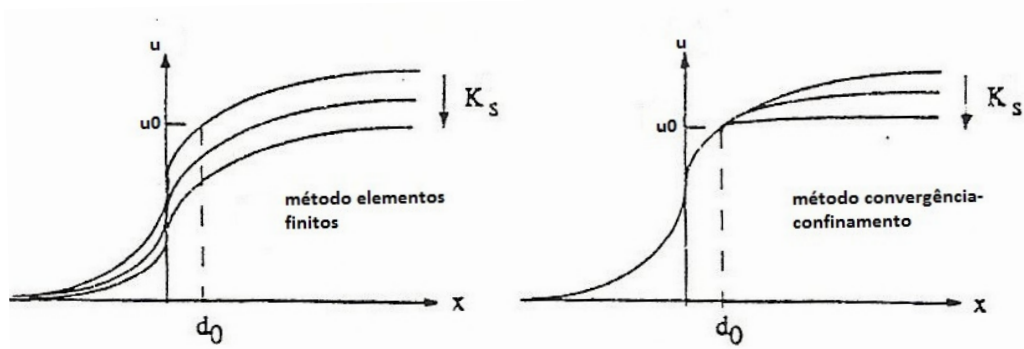


Figura 8: influência da rigidez do revestimento na convergência (adaptado de BERNAUD, 1996, p. 679)

Graziani et al. (2005, p. 346) afirmam que um acordo precisa ser encontrado entre os métodos simplificados de projeto e os métodos numéricos detalhados a fim de obter-se uma ferramenta efetivamente adequada para a prática de túneis. O método convergência-confinamento, baseado no pressuposto simplificado de túnel circular em um campo de tensões hidrostático, representa uma resposta clássica a esse requerimento. O fato dos carregamentos serem subestimados implicou o aprimoramento desse método, gerando o chamado Novo Método Implícito (NIM) por Bernaud e Rousset⁹ (1992).

Assim sendo, o método em questão é adequado para a compreensão do problema de interação, mas, para uma avaliação mais adequada, ferramentas numéricas devem ser consideradas. O programa GEOMECH91, por exemplo, é baseado no método de **ativação-desativação** em

8 WONG, R. C. K.; KAISER, P. K. Performance assessment of tunnels in cohesionless soils. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 117, n. 12, p. 1880–1901, 1991.

9 BERNAUD, D., ROUSSET, G. La nouvelle méthode implicite pour l'étude du dimensionnement des tunnels. **Revue Française Géotechnique**, [S. l.], n. 60, p. 5–26, 1992.

elementos finitos, o qual permite considerar as características tridimensionais do problema de interação. O método modela a sequência de escavação e de colocação de revestimento ao mudar as rigidezes dos elementos afetados a cada fase de construção. Os parâmetros que dimensionam o túnel são obtidos automaticamente (convergência ao equilíbrio e pressão ao equilíbrio), não sendo necessário o conhecimento prévio de u_0 . É aplicável a túneis inseridos em meios elásticos, elastoplásticos e viscoplásticos, cujos revestimentos podem ser elásticos lineares ou não (BERNAUD et al., 1994, p. 4-5).

3.4 LEI DE COMPORTAMENTO DO MACIÇO

Dadas as suas propriedades mecânicas, o maciço pode ser modelado através de três modelos básicos:

- a) elásticos;
- b) plásticos;
- c) viscosos.

De acordo com Campos Filho (2003, p. 2), o modelo elástico é o modelo um reológico básico, o qual apresenta a propriedade da elasticidade. Um material trabalhando em regime elástico, quando submetido a um carregamento, tem deformações imediatas e reversíveis. As deformações imediatas iniciam ao mesmo tempo em que suas tensões correspondentes aparecem e permanecem constantes ao longo do tempo, caso as tensões assim também permaneçam. As deformações reversíveis são aqueles que com a retirada do carregamento não mais existirão. O material estudado pode ser elástico linear ou elástico não-linear, conforme mostrado na figura 9. Na primeira situação, ele seguirá a Lei de Hooke.

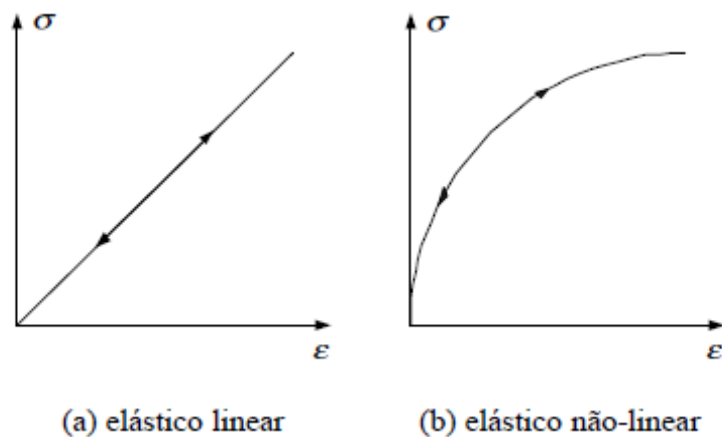


Figura 9: comportamento elástico linear e elástico não-linear
(CAMPOS FILHO, 2003, p. 2)

Segundo Campos Filho (2003, p. 2) “[...] o segundo modelo reológico básico é o plástico.”, modelo o qual apresenta o “[...] aparecimento de deformações imediatas não reversíveis, ou seja, deformações imediatas, que não desaparecem na descarga.”.

Finalmente Campos Filho (2003, p. 3) afirma que:

O modelo viscoso é o terceiro modelo reológico básico. Este modelo apresenta viscosidade que é a propriedade do aparecimento de deformações não imediatas. As deformações não aparecem simultaneamente com as tensões correspondentes e não permanecem constantes ao longo do tempo, mesmo que as tensões correspondentes o façam.

A figura 10 mostra o comportamento das deformações em um material cujas características de viscosidade estão presentes. Para uma tensão que se mantém constante conforme o tempo, as deformações correspondentes não se mantêm constantes. Isso está relacionado à existência de uma velocidade de deformação, a qual depende de uma constante η , chamada constante de viscosidade do material.

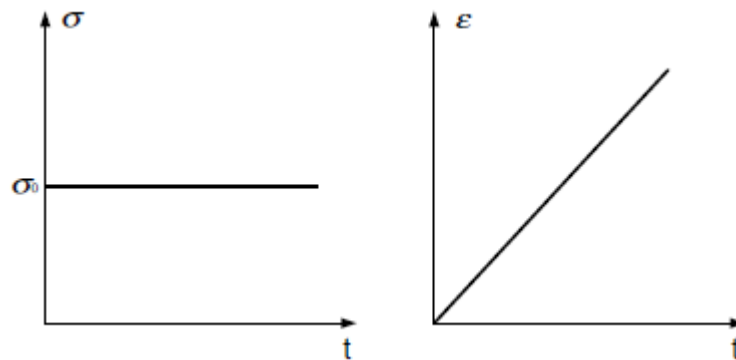


Figura 10: comportamento viscoso de um material, aumento da deformação com o tempo para uma tensão constante (CAMPOS FILHO, 2003, p. 3)

Nesse trabalho o maciço é modelado como um material elasto-viscoplástico, pelo critério de ruptura de Drucker-Prager. A deformação total do modelo, por conseguinte, é dada por duas parcelas, uma elástica e outra viscoplástica. As fórmulas 4, 5 e a figura 11 se referem as deformações:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{vp} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

ε = deformação total;

ε_e = deformação elástica;

ε_{vp} = deformação viscoplástica.

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \frac{1}{\eta} \left\langle \frac{F(\sigma, t)}{F_0} \right\rangle \frac{\partial G(\sigma)}{\partial \sigma} \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

$\dot{\varepsilon}^{vp}$ = taxa de deformação viscoplástica;

$F(\sigma, t)$ = critério de viscoplasticidade;

F_0 = critério de referência;

$G(\sigma)$ = potencial viscoplástico;

η = viscosidade do material;

$\langle \rangle$ = o valor positivo da expressão é válido, o negativo é considerado nulo.

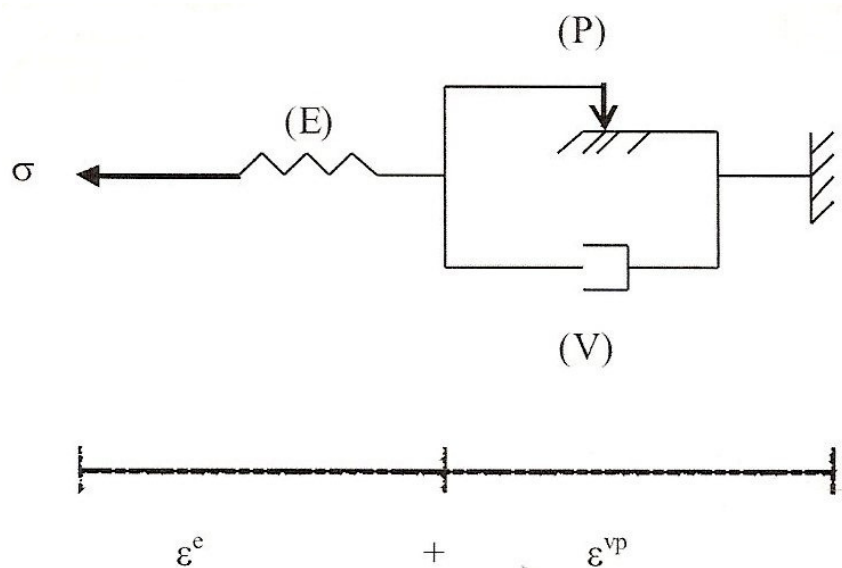


Figura 11: representação do modelo elasto-viscoplástico
(BERNAUD, 2010, p. 3)

3.5 CONCRETO PROJETADO COMO REVESTIMENTO DE TÚNEIS

O emprego do concreto projetado como suporte de túneis propagou-se na Europa no começo dos anos 1960, no período no qual se desenvolviam os métodos de cálculo visando melhor avaliar o processo da interação solo-estrutura no dimensionamento das estruturas. A ideia de utilizar revestimentos de túneis constituídos de uma associação do concreto projetado e tirantes foi introduzida em 1956 pelo engenheiro austríaco L. von Rabcewicz, na ocasião da construção de túneis de autoestradas próximas à Caracas (ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN, 2001, p. 69).

Graziani et al. (2005, p. 345) afirmam que o concreto projetado é considerado como material fundamental para o suporte de túneis escavados pelos métodos convencionais em maciços

frágeis. A camada de concreto projetado é geralmente aplicada próxima da face do túnel a fim de reduzir o deslocamento das redondezas e limitar deformações a curto prazo. Graças ao aumento da resistência conforme o tempo e às propriedades de deformação do concreto projetado jovem, as condições das tensões no revestimento podem satisfazer os requisitos de segurança mesmo em massas de rocha de má qualidade, nas quais grandes deformações têm maior probabilidade de ocorrer antes que o maciço atinja seu equilíbrio.

Gomes (2006, p. 1) ratifica a importância do uso do concreto projetado como material de revestimento e afirma que ele é utilizado de forma ampla pela Engenharia na estabilização de túneis, tanto em estágio primário ou final. Trata-se de uma opção de suporte econômica e prática, visto que sua instalação pode ser realizada rapidamente. Seu princípio de funcionamento está na procura da estabilidade da cavidade através de um alívio de pressão controlada, transformando o material do maciço circundante em um elemento portante.

A *Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain* (2001, p. 69) classifica o uso do concreto projetado em três categorias, ou seja, como:

- a) pele protetora;
- b) pele resistente;
- c) anel estrutural.

Em terrenos pouco fraturados e suficientemente resistentes, com relação ao estado de constantes naturais reinantes antes da escavação, seu papel se limitará a um simples efeito de pele protetora destinada a prevenir fenômenos de alteração física, hidráulica ou química do maciço exposto pela escavação. Em terrenos relativamente menos resistentes, poderá ser introduzido, além do concreto projetado como pele de proteção, tirantes que o tornarão uma pele resistente. Por fim, em alguns casos, em terrenos frágeis e profundos, o concreto projetado, frequentemente armado, deverá ele mesmo ter papel de proteção e deverá ser dimensionado como tal, caracterizando-se como um anel de estrutura. O anel de estrutura de concreto projetado é empregado principalmente em quatro configurações (ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN, 2001, p. 69, 72):

- a) limitação de deformações elastoplásticas do terreno;

- b) confinamento de terrenos não atirantáveis;
- c) confinamento de terrenos expansíveis;
- d) reparação de túneis antigos.

Em solos heterogêneos e rochas saturadas, o equilíbrio da cavidade, após escavação, não pode ser atendida somente pela aplicação rápida de um confinamento que se oponha às deformações excessivas do maciço. O objetivo principal do anel de estrutura em concreto projetado é de garantir uma parte do confinamento necessária graças ao contato contínuo mantido com o terreno. Como anel de estrutura, os principais parâmetros do concreto projetado como suporte são (ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN, 2001, p. 72):

- a) a resistência mecânica a curto e longo prazo;
- b) a deformabilidade.

Esses dois parâmetros citados acima são, portanto, os parâmetros chave para definição da lei de comportamento do concreto projetado. Dado a mudança das características desse material ao longo do tempo, esses parâmetros devem levar em conta essa propriedade. Gomes (2006, p. 2) afirma que as rotinas de cálculo, que são utilizadas geralmente no dimensionamento do suporte de túneis, não consideram a existência do fator tempo, nem os efeitos tridimensionais do carregamento na região da face de escavação. Deve-se levar em conta que para os métodos de cálculo de deslocamentos, é necessário a introdução de um valor de módulo para caracterizar o comportamento do concreto projetado. Segundo a *Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain* (2001, p. 73) a dificuldade, nesse caso, é de utilizar um método de cálculo que permita considerar, de maneira relativamente simples, a evolução simultânea das características do concreto e do carregamento imposto pelo terreno ao longo do trabalho de escavação.

3.5.1 Resistência Mecânica

A resistência à compressão simples é uma das principais propriedades que descrevem o concreto projetado. Ele é um material que se comporta de maneira dúctil em idades inferiores

a um dia. Quando a sua resistência é atingida, ele tem ainda uma significativa resistência residual e a sua ruptura completa dar-se-á a uma grande deformação. Em outras palavras, quando ainda jovem, tem alta capacidade de absorver as deformações do maciço escavado. Na idade de ruptura, ele se torna frágil e menos deformável (GOMES, 2006, p. 17 e 22).

Usualmente as fórmulas propostas pela *Österreichischer Betonverein*¹⁰ (1989 apud MESCHKE et al., 1996, p. 3161) são utilizadas para modelar o comportamento em função do tempo relativo à compressão simples do concreto projetado. Elas estão expressas a seguir.

Para a compressão simples e $t \leq 24\text{h}$:

$$f_{\text{cu}}(t) = f_{\text{cu}}^{(1)} \left(\frac{t + 0.12}{24} \right)^{0.72453} \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

$f_{\text{cu}}(t)$ = compressão simples num tempo t ;

$f_{\text{cu}}^{(1)}$ = compressão simples após 24h;

t = tempo em horas.

Para a compressão simples e $t > 24\text{h}$:

$$f_{\text{cu}}(t) = a_c \exp \left(-\frac{b_c}{t} \right) \quad (\text{fórmula 7})$$

$$a_c = \frac{f_{\text{cu}}^{(28)}}{\exp(\ln(\kappa)/27)} \quad (\text{fórmula 8})$$

¹⁰ ÖSTERREICHISCHER BETONVEREIN. *Richtlinien für Spritzbeton*.. [S. l.], 1989. Teil I

$$b_c = -\frac{672}{27} \ln(\kappa) \quad (\text{fórmula 9})$$

$$\kappa = f_{cu}^{(1)} / f_{cu}^{(28)} \quad (\text{fórmula 10})$$

Onde:

$f_{cu}(t)$ = compressão simples num tempo t ;

$f_{cu}^{(1)}$ = compressão simples após 24h;

$f_{cu}^{(28)}$ = compressão simples aos 28 dias;

t = tempo em horas.

3.5.2 Módulo de Elasticidade

Outro parâmetro fundamental para modelar o concreto projetado considerando suas propriedades dependentes do tempo é o módulo de elasticidade. Gomes (2006, p. 24) afirma que:

Uma alta rigidez do revestimento resulta geralmente numa alta absorção de carga do maciço suportada por este, em contraste com valores não tão altos de resistência à compressão são necessário para tal função. [...] a utilização de aceleradores de resistência que promovem além de uma alta resistência a pequena idades, também resultam numa alta rigidez, neste mesmo período de tempo.

Usualmente as fórmulas propostas pelo *Comité Euro-International du Béton*¹¹ (1990 apud MESCHKE et al., 1996, p. 3159) são utilizadas para modelar o comportamento em função do tempo relativo ao módulo de elasticidade do concreto projetado.

A expressão do módulo de elasticidade é:

¹¹ COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. *Model Code*. Lausanne, 1990. Bulletin d'Information.

$$E(t) = E^{(28)}\beta_E(t) \quad (\text{fórmula 11})$$

Sendo o parâmetro β_E para $t \leq 28$ dias:

$$\beta_E = \left(a_E + \frac{b_E}{t} \right)^{-0.5} \quad (\text{fórmula 12})$$

Onde:

$$a_E = 0,85;$$

$$b_E = 100,8;$$

t = tempo em horas.

E o parâmetro β_E para $t > 28$ dias:

$$\beta_E = 1 \quad (\text{fórmula 13})$$

4 ANÁLISE PARAMÉTRICA

Alguns estudos já foram realizados com finalidade de estabelecer a influência de parâmetros no comportamento da interação entre o maciço e seu suporte. Um deles, conduzido por Graziani et al. (2005, p. 368), realizou uma análise paramétrica com concreto projetado como revestimento inserido em meio elastoplástico, resultando nas seguintes constatações:

- a) o aumento da taxa de escavação implica a redução dos carregamentos bem como a suavização do perfil de tensões-deformações no anel de concreto projetado;
- b) a rigidez relativa entre o solo e o sistema de suporte é um fator de grande influência no equilíbrio do carregamento;
- c) o deslocamento do solo afeta mais a pré-convergência da parede do túnel do que as condições de carregamento e convergência após instalação do suporte;
- d) a influência do comportamento plástico do concreto projetado é observado somente em túneis muito profundos, onde os carregamentos finais frequentemente geram o máximo deslocamento do anel de concreto projetado.

Em trabalho realizado por Bernaud (2010, p. 6-7, 12-13) foi avaliado o comportamento da escavação de um túnel cujo maciço é viscoplástico com as seguintes características:

- a) $E = 500 \text{ MPa}$;
- b) $\nu = 0,4$;
- c) $C = 1 \text{ MPa}$;
- d) $\eta = 1 \times 10^7 \text{ MPa.s}$;
- e) $P_{\infty} = 4 \text{ MPa}$.

As características mecânicas do concreto projetado:

- a) $\nu = 0,3$;
- b) $f_{cu}(1) = 6 \text{ MPa}$;

c) $f_{cu}(28) = 20 \text{ MPa}$;

d) $\eta = 1 \times 10^7 \text{ MPa.s}$.

Ao módulo de elasticidade aos 28 dias do concreto projetado foram dados três valores:

a) 300 MPa;

b) 3.000 MPa;

c) 30.000 MPa.

Foi estudada uma única distância entre a colocação de revestimento e a face que foi de $2/3$ do raio e o passo de escavação de $1/3$ do raio, o qual tinha valor de 1m. Esse estudo concluiu que para esses parâmetros:

a) revestimentos viscoplásticos apresentam maiores convergências;

b) para rigidezes elevadas a convergência apresenta variações importantes conforme a distância à face do túnel;

c) a convergência diminui com o aumento da velocidade de escavação.

No presente trabalho foi realizado um estudo semelhante, ou seja, cálculo em viscoplasticidade e cálculo em elasticidade, com os seguintes parâmetros para o maciço:

a) $E = 500 \text{ MPa}$;

b) $\nu = 0,4$;

c) $C = 1 \text{ MPa}$;

d) $\eta = 1 \times 10^7 \text{ MPa.s}$;

e) $P_{\infty} = 4,5 \text{ MPa}$;

f) $\Phi = 15^{\circ}$.

Sendo, portanto, a pressão do maciço que apresenta um valor diferente com relação ao estudo anterior, além da presença de um ângulo de atrito. Esses parâmetros podem caracterizar uma

argila profunda, por exemplo. As variáveis do concreto projetado, para esse trabalho, estão apresentadas abaixo:

- a) $v = 0,3$;
- b) $f_{cu}(1) = 6 \text{ MPa}$;
- c) $f_{cu}(28) = 20 \text{ MPa}$;
- d) $\eta = 1 \times 10^7 \text{ MPa.s}$.

Ao módulo de elasticidade do concreto projetado foram dados três valores:

- a) 300 MPa;
- b) 3.000 MPa;
- c) 30.000 MPa.

A diferença básica entre o estudo realizado por Bernaud (2010) está na avaliação da influência da distância de colocação do revestimento à face (d_0), já que aquele trabalho avaliou somente a distância de $2/3$ do raio para d_0 . Aqui são apresentados resultados para as curvas de convergência para os seguintes valores de d_0 :

- a) $2/3$ de R;
- b) $4/3$ de R.

Para cada valor de d_0 foram feitos cálculo para quatro velocidades (v) de escavações:

- a) 1 m/dia;
- b) 5 m/dia;
- c) 10 m/dia;
- d) 20 m/dia.

Outra avaliação, aqui feita, é a influência da viscosidade nas curvas de convergência. Foram avaliados os seguintes valores para viscosidade (η) para uma dada velocidade (v) e uma dada distância de colocação de revestimento à face (d_0):

a) $\eta = 1 \times 10^5$ MPa.s;

b) $\eta = 1 \times 10^6$ MPa.s;

c) $\eta = 1 \times 10^7$ MPa.s.

O passo de escavação aqui considerado também é de 1/3 do valor do raio.

4.1 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

Assim como existem diversos métodos simplificados para a análise da interação maciço-revestimento, existem diversos métodos numéricos, os quais continuam a se desenvolver dado o avanço das tecnologias computacionais. Nesse trabalho foi usado o programa GEOMECH91 proposto por Bernaud (1991). Trata-se de uma análise axissimétrica em duas dimensões do processo de execução de um túnel, o qual considera as sequências de escavação e a colocação do revestimento. O modelo proposto pode ser definido da seguinte maneira (BERNAUD; ROUSSET, 1996, p. 675-676):

- a) o processo de escavação é simulado pela **desativação** da rigidez dos elementos que representam o solo removido durante a fase de escavação. Isso se dá pela significativa redução do módulo de elasticidade (E);
- b) a colocação do suporte através do processo de **ativação** a uma dada distância d_0 da face do túnel. Isso se dá pela substituição das características dos elementos da parede. Nesse momento os elementos têm suas tensão e deformação nulas.

A malha utilizada contém 1298 elementos com 9 nós. No programa, primeiramente ela é construída, após os contornos da zona a escavar e da zona de revestimento são previstos. O comprimento da malha é superior à distância de influência da face do túnel, assim os efeitos de bordo podem ser desprezados (BERNAUD, 2010, p. 5-6). A figura 12 ilustra um esquema semelhante à malha utilizada.

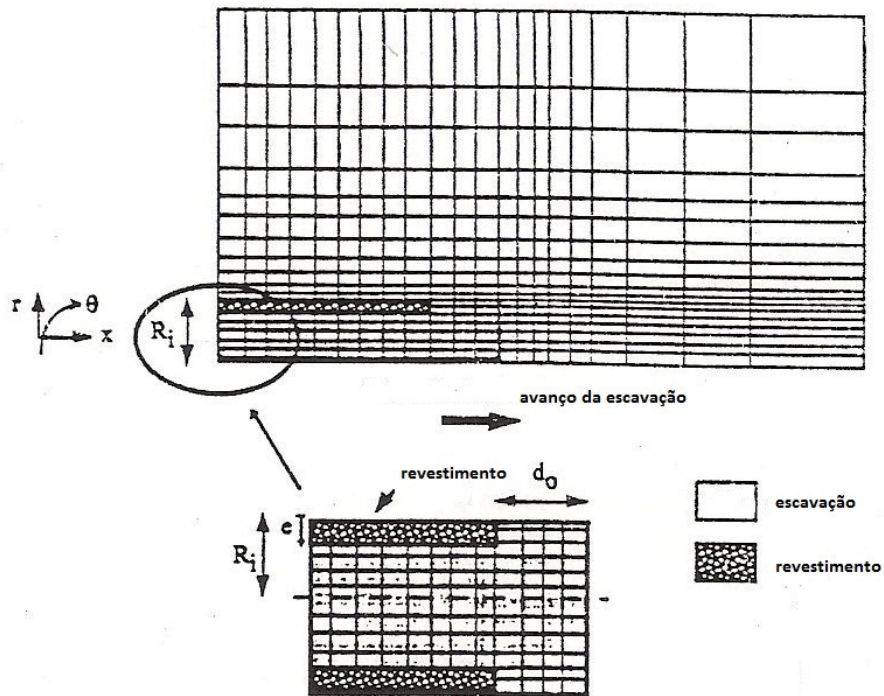


Figura 12: ilustração de um esquema de malha utilizada em rotina computacional GEOMEQ91 (adaptado de BERNAUD; ROUSSET, 1996, p. 675)

Tendo como base o esquema das figuras 13 e 14, pode-se explicar o procedimento de cálculo empregado para a distância de $2/3$ do raio, por exemplo. Em determinada escavação, os elementos <109>, <110>, <173>, <174> e <175> têm suas propriedades anuladas e tornam-se elementos escavados. Os elementos <114> e <113>, no mesmo momento, têm suas propriedades, as quais foram anuladas na escavação anterior, substituídas pelas propriedades do concreto projetado. Dessa forma, os elementos <109>, <110>, <111>, <112>, <170>, <171>, <172>, <173>, <174> e <175> vão constituir o trecho não revestido dessa etapa de escavação.

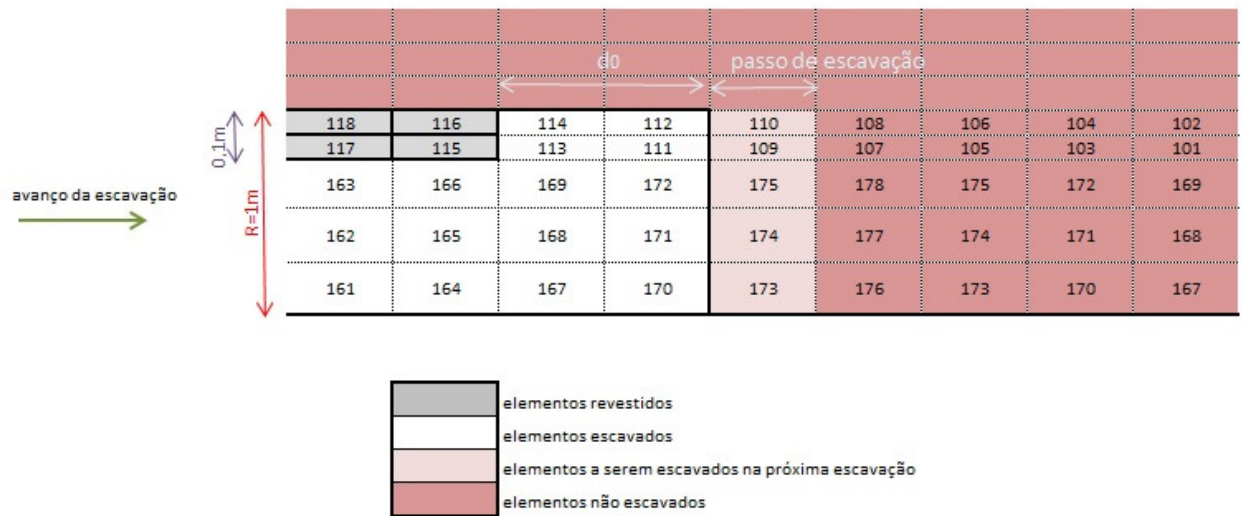


Figura 13: esquema da malha utilizada em uma escavação <i>.</i>

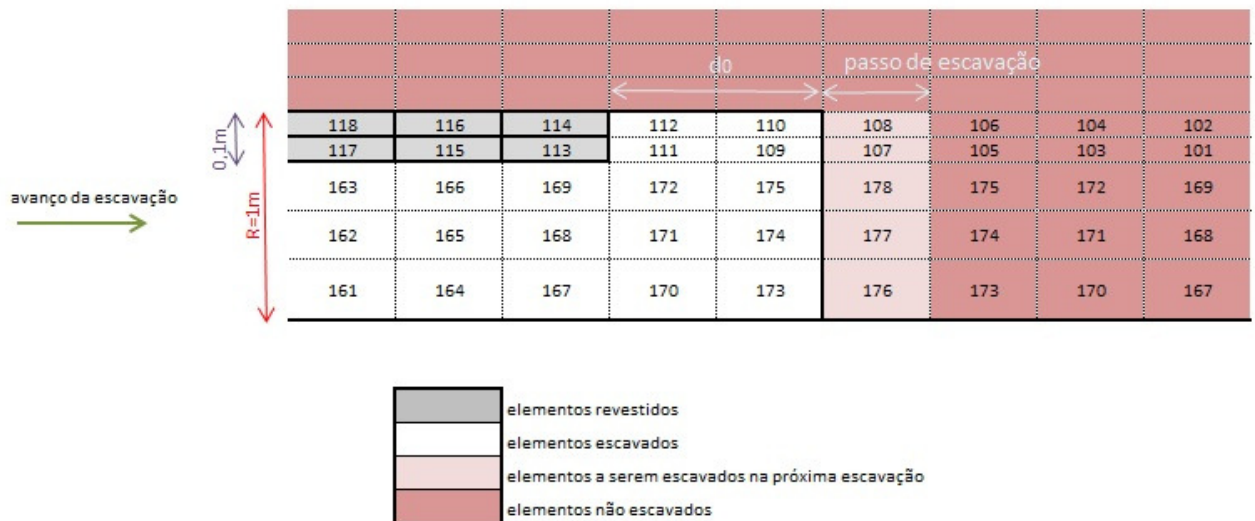


Figura 14: esquema da malha utilizada em uma escavação <i+1>

Como dados de saída, o programa fornece as curvas de convergência para cada escavação e a curva em tempo de estabilização. São realizadas 36 escavações com passo de escavação $1/3$ do raio, o qual possui 1 metro. Como o passo de escavação é constante, a velocidade de escavação é dada em função dos intervalos de tempo adequados das paradas de escavação. A figura 15 exemplifica resultados típicos do cálculo para uma situação específica.

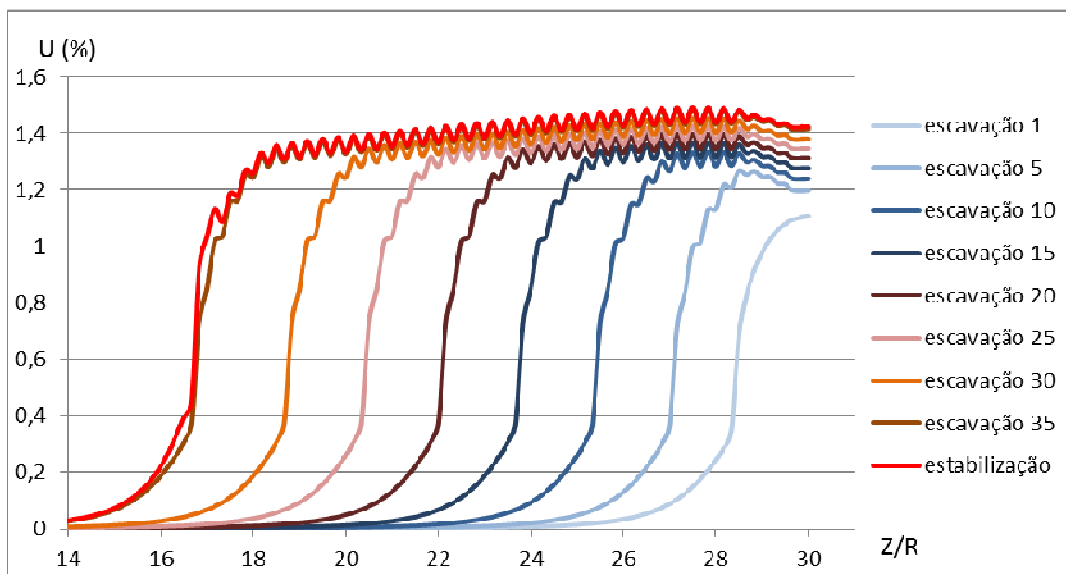


Figura 15: curvas de convergência em determinadas escavações para $v=5$ m/dia, $d_0=(4/3)R$, $E=30.000$ MPa, modelo viscoplástico

4.2 INFLUÊNCIA DA RIGIDEZ DO REVESTIMENTO

Revestimentos mais rígidos estão relacionados a menores deslocamentos finais do conjunto maciço-suporte. Aqui a rigidez do revestimento é representada pelo módulo de Young do concreto projetado, cujos valores estão apresentados no início do capítulo. A figura 16 mostra a influência da rigidez nos deslocamentos finais do sistema maciço-suporte para a velocidade de 20 m/dia.

Pode-se perceber que para baixos valores do módulo de elasticidade, os deslocamentos, ao final da construção do túnel, ainda não estão estabilizados. Nessa situação o comportamento viscoso dos materiais mantém-se após o término da escavação, e o completo desenvolvimento dos deslocamentos é atingido em determinado tempo. Esse fenômeno é atenuado em função do aumento da rigidez do revestimento. Para uma rigidez muito alta, não há diferença entre a curva ao término de escavação e a curva em estabilização. Com relação à influência da velocidade, para velocidades menores, as curvas de final de escavação e de estabilização tendem a se aproximar. A figura 17 exemplifica o comportamento das curvas para a velocidade 5 m/dia.

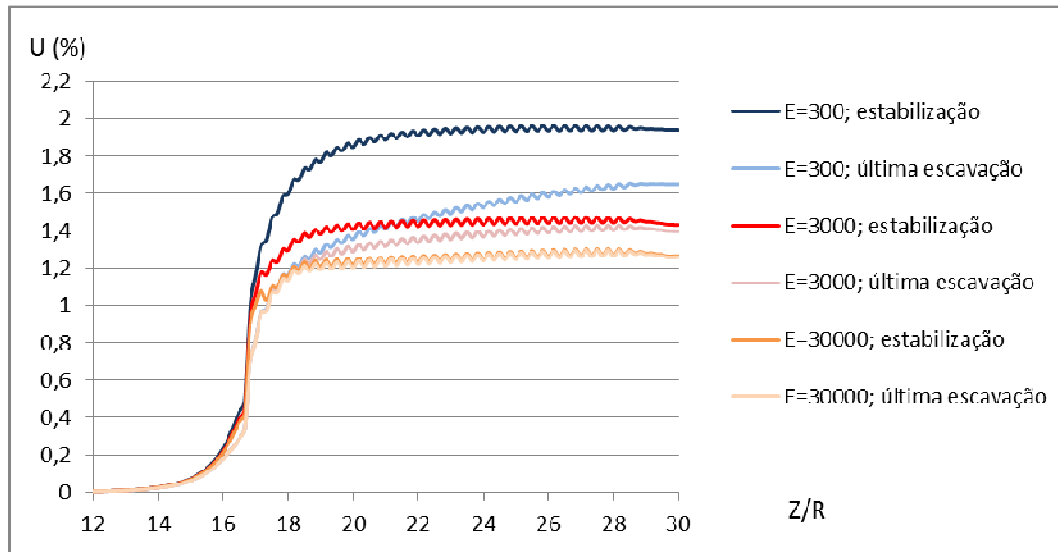


Figura 16: gráfico das curvas de convergência em função do módulo de elasticidade para $v=20$ m/dia, $d_0=(4/3)R$, modelo viscoplástico

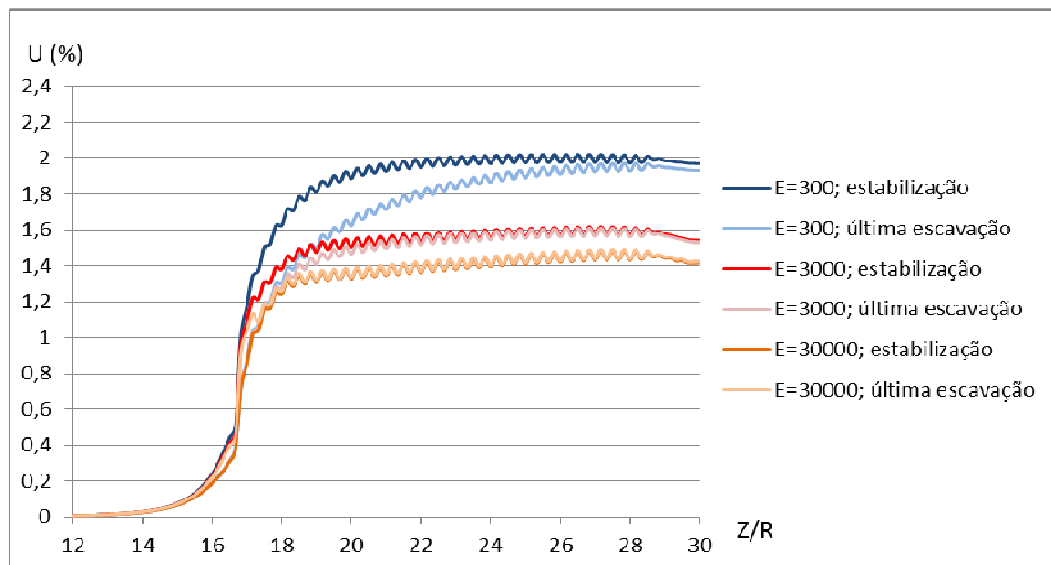


Figura 17: gráfico das curvas de convergência em função do módulo de elasticidade para $v=5$ m/dia, $d_0=(4/3)R$, modelo viscoplástico

4.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ESCAVAÇÃO E DA DISTÂNCIA DE COLOCAÇÃO DO REVESTIMENTO À FACE

A velocidade de escavação é parâmetro fundamental na formação dos deslocamentos radiais finais, quando da etapa de estabilização. Isso se mostra mais claro para menores velocidades.

Menores velocidades, para um passo de escavação constante, ocorrem devido ao tempo entre duas escavações sucessivas ser maior, permitindo, nesse intervalo, deslocamentos iniciais nos trechos não revestidos, como ilustrado pela figura 18.

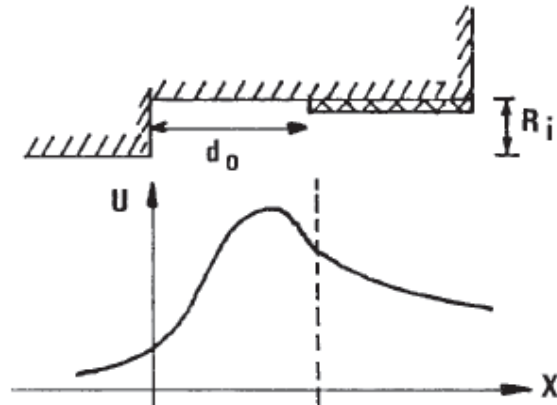


Figura 18: deslocamentos iniciais em trecho não revestido (BERNAUD, 1991, p. 207)

Além disso, durante a parada de escavação, dadas as características viscoplásticas dos materiais, os deslocamentos continuam de forma global (figura 19).

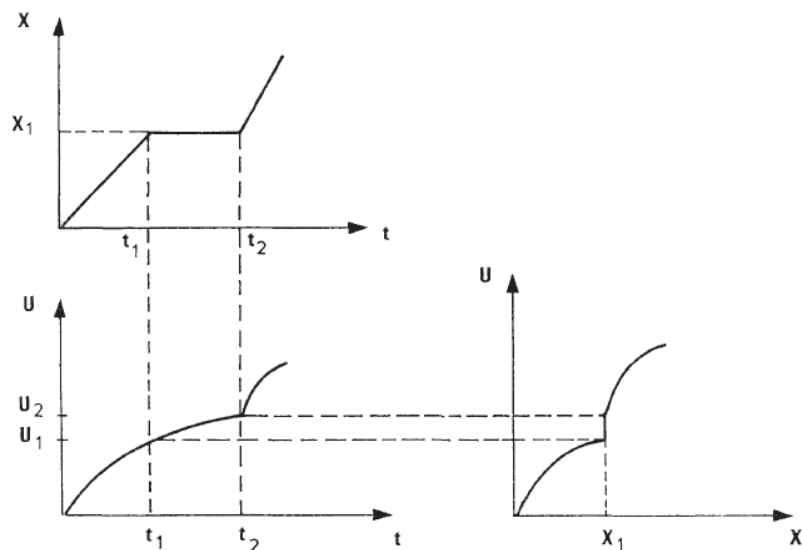


Figura 19: efeito da parada de escavação nos deslocamentos radiais (BERNAUD, 1991, p. 196)

Todavia, para baixas rigidezes de revestimento, a velocidade não se apresenta como parâmetro decisivo em convergências finais, na situação analisada, mas tem influência importante em valores maiores da rigidez. As figuras 20 a 22 apresentam gráficos com os resultados dos cálculos realizados e demonstram esse fenômeno.

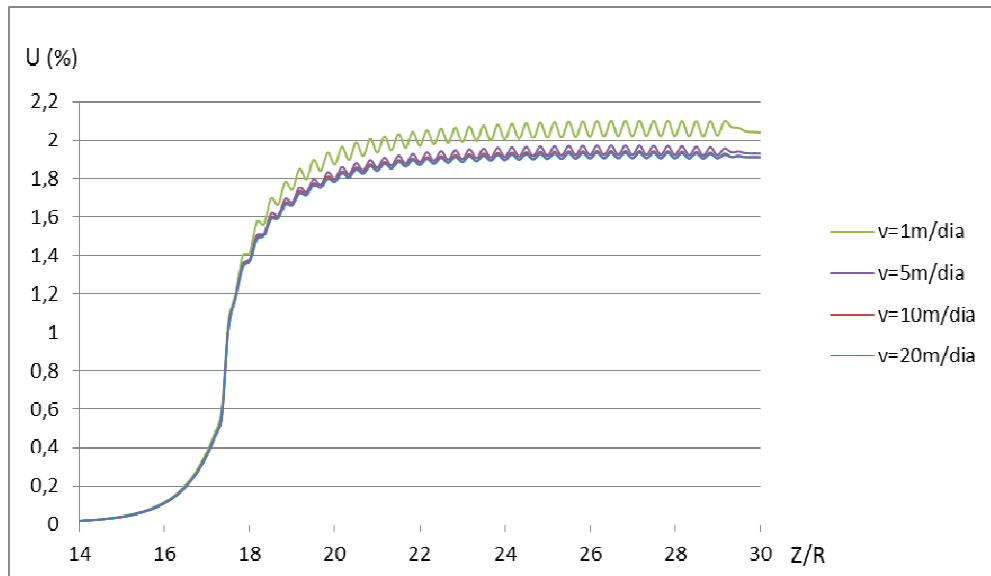


Figura 20: gráfico de convergências para $E=300$ MPa, $d_0=(2/3)R$, em tempo de estabilização, modelo viscoplástico

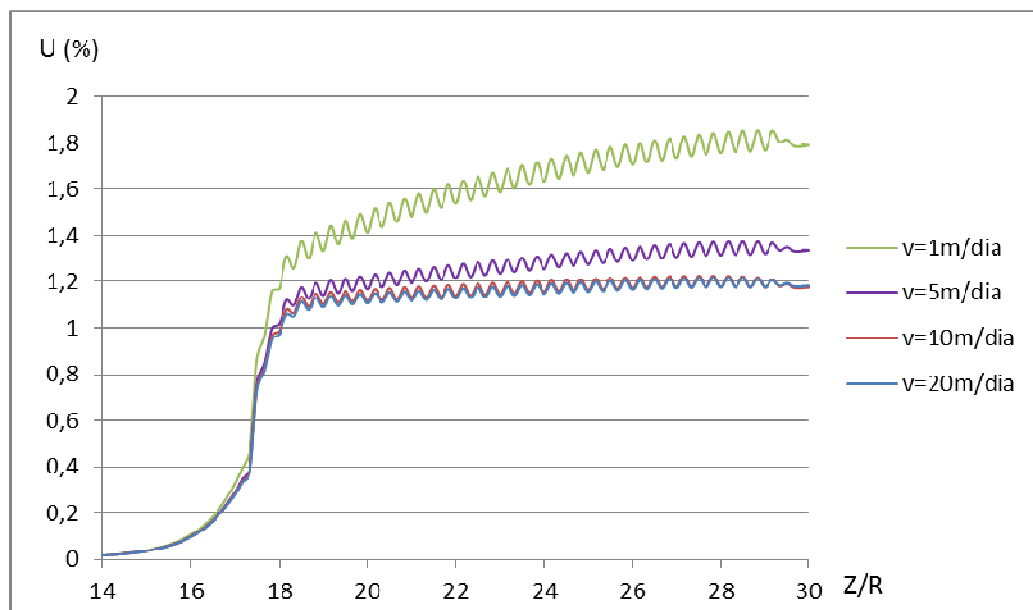


Figura 21: gráfico de convergências para $E=30.000$ MPa, $d_0=(2/3)R$, em tempo de estabilização, modelo viscoplástico

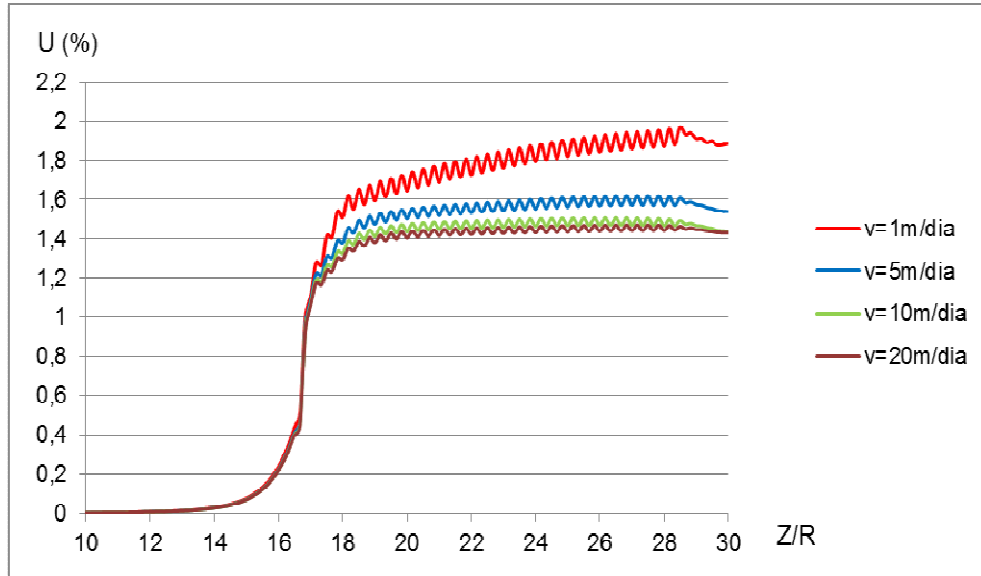


Figura 22: gráfico de convergências para $E=30.000$ MPa, $d_0=(4/3)R$, em tempo de estabilização, modelo viscoplástico

Com relação ao d_0 , quanto maior for a distância entre o fim da colocação do revestimento com a face do túnel, maiores serão as convergências iniciais naquela região em período de parada. Por consequência, a curva de convergência final, em período de estabilização, apresentará deslocamentos maiores quanto maior for a distância d_0 . As figuras 23 e 24 ilustram esse fenômeno. Para baixos módulos de elasticidades, todavia, essa diferença não se verifica, principalmente para distâncias mais afastadas da face de escavação.

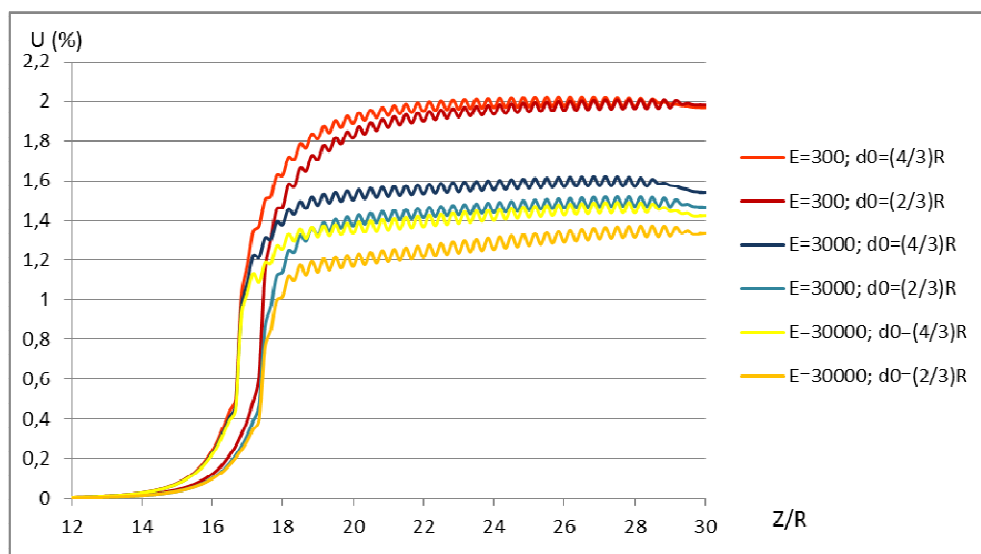


Figura 23: gráfico da diferença entre curvas de convergência em função de d_0 para $v=5$ m/dia em estabilização

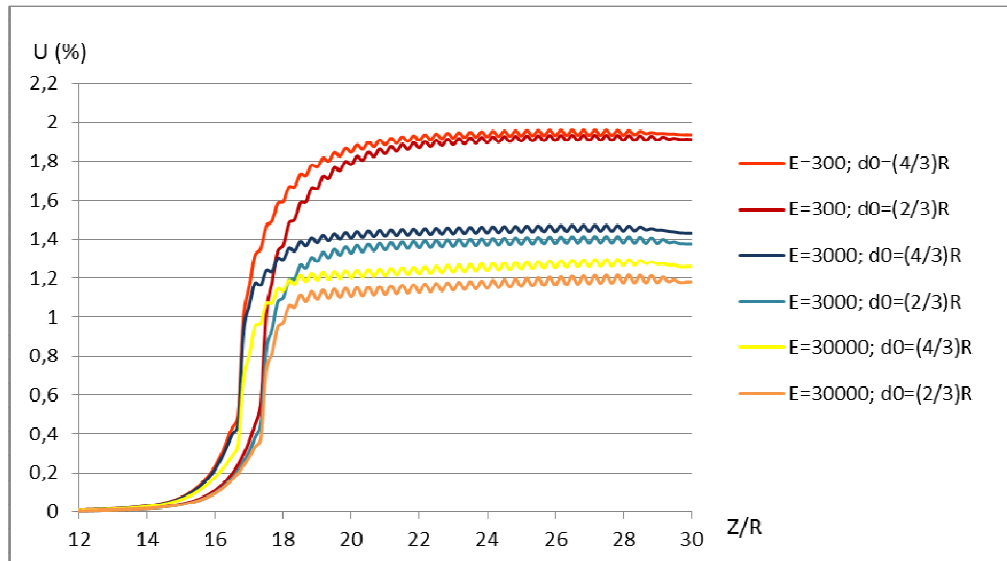


Figura 24: gráfico da diferença entre curvas de convergência em função de d_0 para $v=20$ m/dia em estabilização

4.4 INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE

A taxa de deformação viscoplástica em um material viscoplástico é definida pela fórmula:

$$\dot{\varepsilon}^{vp} = \frac{1}{\eta} \left\langle \frac{F(\sigma, t)}{F_0} \right\rangle \frac{\partial G(\sigma)}{\partial \sigma} \quad (\text{fórmula 5})$$

A taxa de deformação viscoplástica, portanto, é inversamente proporcional à viscosidade. Ou seja, para valores maiores da constante de viscosidade, os deslocamentos finais, em fase de estabilização, serão menores, conforme ilustrado na figura 25.

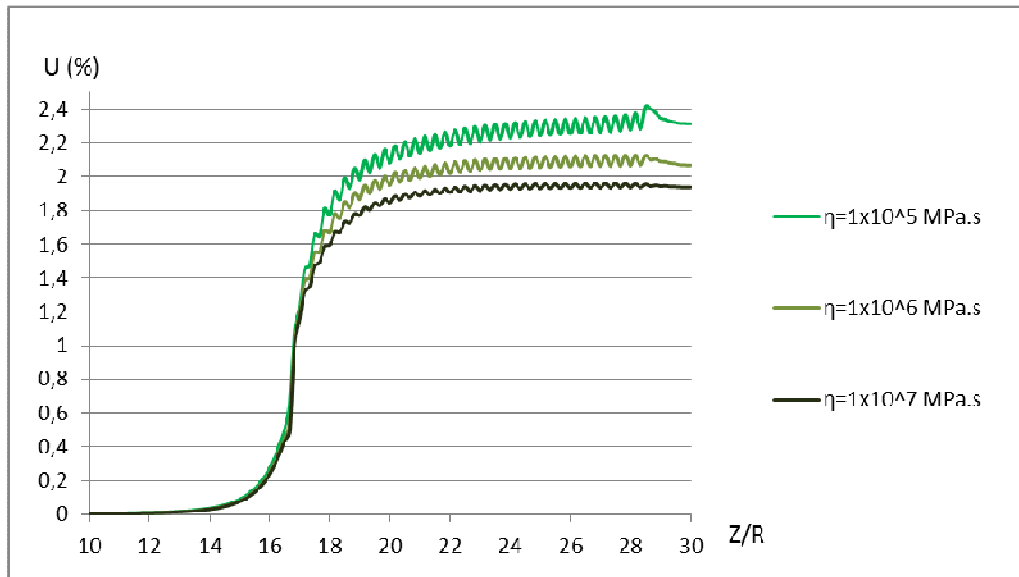


Figura 25: gráfico da diferença entre curvas de convergência em função da viscosidade para $v=20$ m/dia, $d_0=(2/3)R$ e $E=300$ MPa

4.5 CONCRETO PROJETADO MODELADO EM ELASTICIDADE

Além do modelo viscoplástico utilizado para o concreto projetado, o modelo elástico, com o módulo de elasticidade variando com o tempo, foi utilizado para caracterizar o material. Dessa forma é possível comparar resultados obtidos com ambos os modelos e demonstrar o efeito acoplado do problema de interação maciço-revestimento em meio viscoplástico. Abaixo, a figura 26 demonstra os resultados obtidos para uma velocidade de 20 m/dia e distância não-revestida de $2/3$ do raio.

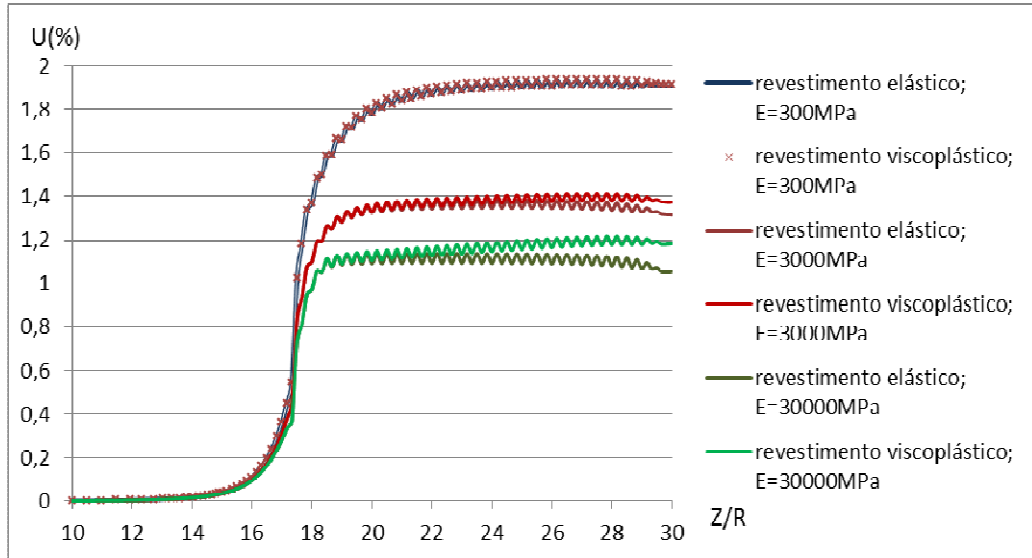


Figura 26: gráfico da diferença entre curvas de convergência do modelo utilizado para o revestimento para $v=20\text{m/dia}$ e $d_0=(2/3)R$

É possível verificar que para essa situação pouca diferença existe entre os modelos utilizados, sendo que, para uma baixa rigidez do revestimento, essa diferença não existe e, para uma alta rigidez do revestimento, ela se faz presente, mas na ordem de 0,18% do raio. A figura 27 traz o resultados para uma situação limite aqui estudada, que é a menor velocidade, 1 m/dia, associada à maior distância não revestida, de $4/3$ do raio, com o módulo de elasticidade de $E=30.000\text{ MPa}$. Nessa situação, a diferença entre ambos os modelos é mais expressiva.

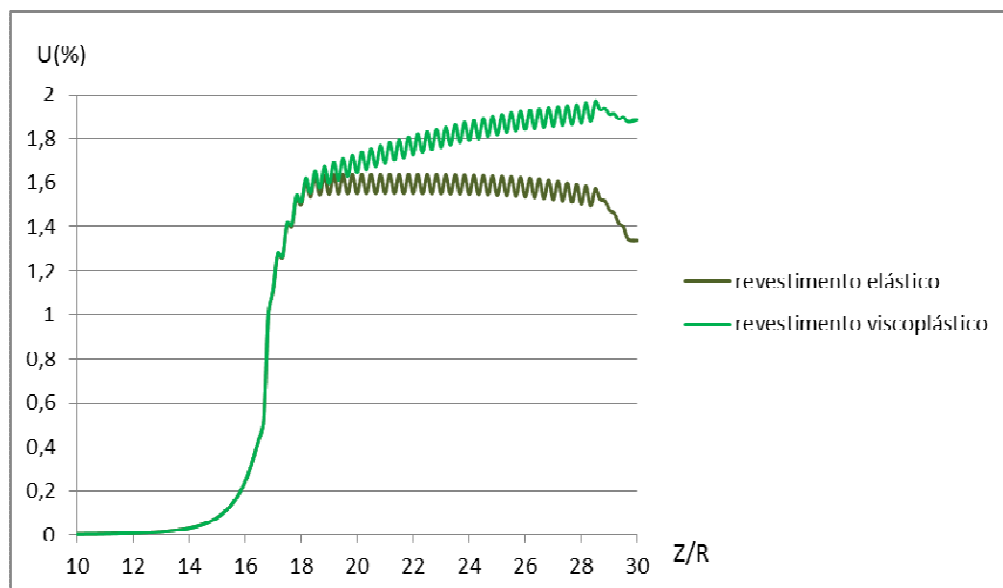


Figura 27: gráfico da diferença entre curvas de convergência do modelo utilizado para o revestimento para $v=1\text{m/dia}$, $d_0=(4/3)R$ e $E=30.000\text{MPa}$

5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi analisado de que forma a velocidade de escavação, a distância de colocação do revestimento à face, a rigidez do revestimento e a viscosidade dos materiais influenciam o comportamento dos deslocamentos radiais de um túnel profundo revestido por concreto projetado. O cálculo numérico realizado levou em consideração as condições de axissimetria, bem como um módulo de elasticidade e resistência, do concreto projetado, dependentes do tempo.

A velocidade de escavação é um importante parâmetro da interação maciço-revestimento, pois uma maior taxa de escavação está associada a menores valores de deslocamentos globais da estrutura. Esse fenômeno se torna mais evidente conforme maior for a rigidez do revestimento utilizado. Ao contrário, para baixos valores da rigidez do revestimento ($E=300\text{MPa}$, por exemplo), não existe diferença significativa nas curvas de convergência, para os parâmetros considerados. Nessa situação, os deslocamentos são definidos de forma mais importante pelo alívio de pressão do maciço.

A distância de colocação do revestimento à face, ou distância não revestida, também pode ser uma fator importante para o desenvolvimento dos deslocamentos finais da estrutura, conforme sua ordem de grandeza. Maiores distâncias não revestidas contribuem para maiores valores finais dos deslocamentos radiais. Uma distância não revestida maior associada a uma velocidade menor acarreta, por conseguinte, uma situação limite com relação a esses deslocamentos.

Em situações cujo revestimento possui baixa rigidez, os efeitos a longo prazo, os que ocorrem após o término da escavação, são mais significativos. Foi visto que há uma boa diferença entre as curvas de convergência da última escavação e de estabilização, quando o revestimento tinha o seu módulo de elasticidade igual a 300MPa . Para valores de rigidez maiores, os efeitos a longo prazo tendem a diminuir. Além disso, para menores velocidades os efeitos a longo prazo tendem também a diminuir.

O presente trabalho mostrou também o efeito da influência da viscosidade numa situação específica, mas cujo comportamento é semelhante para todas as situações. Uma maior

viscosidade dos materiais está associada a menores valores da convergência do sistema maciço-revestimento. Aqui é ressaltado que ambos os materiais, maciço e concreto projetado, tiveram o mesmo valor para o parâmetro viscosidade.

Em uma última análise realizada, foi verificado que, para os casos em que a taxa de escavação é baixa e a rigidez do revestimento é alta, há diferença entre o modelo em elasticidade e o modelo viscoplástico utilizados para o concreto projetado. A diferença é pouco significativa para velocidades maiores e valor de rigidez baixo. Isso mostra a importância da correta definição do modelo a ser utilizado para o concreto projetado dadas as circunstâncias.

Os resultados aqui apresentados têm por finalidade apresentar o comportamento da interação maciço-revestimento em diversas situações de escavação. Trabalhos futuros poderão avaliar a influência de parâmetros aqui não avaliados, como os relativos ao maciço, por exemplo, bem como complementar o trabalho, analisando uma distância de colocação do revestimento à face igual a zero e outra igual a 2 vezes o raio, por exemplo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN.

Recommandations de l'AFTES GT20R1F1: conception et dimensionnement du béton projeté utilisé en travaux souterrains. Paris, 2001.

_____. **Recommandations de l'AFTES GT7R6F1:** La méthode convergence-confinement. Paris, 2002.

BERNAUD, D. **Tunnels profonds dans les milieux viscoplastiques:** approches expérimentales et numériques. 1991. 345 f. Tese (Doctorat en Structures et Matériaux) – Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

_____. Simulação numérica de um túnel revestido com concreto projetado. 2010. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, n. 34, 2010, San Juan, Argentina. **Anais...** Porto Alegre: Associação Sul Americana de Engenharia Estrutural. p. 1-13.

BERNAUD, D.; BENAMAR, I.; ROUSSET, G. La “nouvelle méthode implicite” pour le calcul des tunnel dans les milieux élastoplastiques et viscoplastiques. **Revue Française de Geotechnique**. [Paris], n. 68, p. 3-19, 1994.

BERNAUD, D.; ROUSSET, G. The “New Implicit Method” for tunnel analysis. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**. John Wiley & Sons, [S. l.], v. 20, p. 673-690, 1996.

CAMPOS FILHO, A. **Fundamentos da Análise de Estruturas de Concreto pelo Método dos Elementos Finitos**. [Porto Alegre]: 2003. 45 f. Disponível em: <<http://chasqueweb.ufrgs.br/~americo/topicos>> Acesso em: 20 maio 2011.

FREITAS, J. C. A. **Método dos elementos de contorno aplicado à análise de escavações em túneis utilizando modelos aproximados bidimensionais**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Estrutural) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

GOMES, R. A. M. P. **Análise de túneis considerando o comportamento dependente do tempo na interação maciço-suporte para meios contínuos**. 2006. 305 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

GRAZIANI, A.; BOLDINI, D.; RIBACCHI, R. Practical estimate of deformations and stress relief factors for deep tunnels supported by shotcrete. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, Vienna, v. 38, n. 5, p. 345-372, 2005.

MESCHKE, G.; KROPIC, C.; MANG, H. A. Numerical analyses of tunnel by means of viscoplastic material model for shotcrete. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**. John Wiley & Sons, [S. l.], v. 39, p. 3145-3162, 1996.