

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**COMPORTAMENTO DE TÚNEIS ESCAVADOS
EM MEIOS VISCOPLÁSTICOS COM RUPTURA
- SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Felipe Pinto da Motta Quevedo

Porto Alegre
2021

FELIPE PINTO DA MOTTA QUEVEDO

**COMPORTAMENTO DE TÚNEIS ESCAVADOS EM MEIOS
VISCOPLÁSTICOS COM RUPTURA - SIMULAÇÃO
NUMÉRICA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do
Sul como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor
em Engenharia.

Porto Alegre
2021

CIP - Catalogação na Publicação

de Tal, Fulano
Título Completo da Dissertação ou Tese / Fulano de
Tal. -- 201X.
XX f.
Orientador: Nome do Orientador.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 201X.

1. palavra. 2. chave. 3. coloca. 4. aqui. I. do
Orientador, Nome, orient. II. Título.

ERRATA

QUEVEDO, F. P. M. Comportamento de Túneis Escavados em Meios Viscoplásticos com Ruptura - Simulação Numérica. 2021. 63p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Folha	Linha	Onde se lê	Leia-se
1	10	auto-conclavo	autoconclavo

FELIPE PINTO DA MOTTA QUEVEDO

**COMPORTAMENTO DE TÚNEIS ESCAVADOS EM MEIOS
VISCOPLÁSTICOS COM RUPTURA - SIMULAÇÃO
NUMÉRICA**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, na área de concentração Estruturas, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 07 de março de 2021

Prof. Samir Maghous
Dr. pela École Nationale des Ponts et Chaussées
Orientador

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

Nilo Consoli
Ph.D. pela Concordia University, Canadá
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Mauro de Vasconcellos Real (FURG)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Severino Pereira Cavalcanti Marques (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Este trabalho é dedicado a minha mãe que foi meu principal suporte esse tempo todo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico (CNPq) pela oportunidade de estudar com bolsa durante esse doutorado, sem a qual, não seria possível minha dedicação nesse período de 4 anos.

Agradeço à UFRGS pela infraestrutura cedida, por possibilitar acesso à biblioteca e a artigos nacionais e internacionais gratuitamente, além da oportunidade de cursar esse doutorado na área de Estruturas com destacados colegas e professores.

Agradeço a todo o corpo docente e administrativo do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) pelo apoio e momentos de aprendizado durante esses anos todos.

Agradeço aos professores Inácio Benvegnu Morsch, Roberto Rios, Luiz Alberto Segovia e Américo Campos Filho pela força, conselhos e conversas, não só durante o doutorado, mas desde minha graduação.

Agradeço aos meus orientadores Samir Maghous e Denise Bernaud por me acolherem como orientando, me apresentarem sobre o tema, por compartilharem seu conhecimento com a paixão devida e pelo engajamento desenvolvido neste trabalho. Agradeço à vocês também a oportunidade de desenvolver meu estágio Docente.

Agradeço aos meus colegas pela companhia alegre e compartilhamento de conhecimento durante esses quatro anos: Augusto Bopsin Borges, Bárbara Chagas, Barbara Sanches, Betina Jansen, Bianca Funk, Bibiana Rossato, Bruna Spricigo, Caio..., Cássio..., Chepel, Dani Airão, Eduardo..., Eduardo Titello, Evandro..., Gabi Bianchini, Giancarlo Machado, Gustavo Ribeiro, Kellyn Pufall, Lúcia Sangali, Marcela..., Matheus Benincá, Matheus Forcelini, Matheus Wanglon, Miguelito, Paulo Baumbach, Raiza Guimarães, Rodrigo..., Rodrigo Benites Mendes, Rosi, Tonin,..

Agradeço ao suporte técnico da Engineering Simulation and Scientific Software (ESSS) pela assistência ferente às dúvidas relacionadas à utilização e customização do ANSYS.

Agradeço ao pessoal da Estádio 3, meus ex-companheiros de trabalho, não só pelo que me ensinaram, mas também pelo apoio na minha decisão de seguir esse período acadêmico na minha vida.

Agradeço aos meus amigos Rubens Salabarry e Fernanda Ribas Tweedi pela honra da companhia em momentos de tempestades.

Agradeço a minha mãe Luzia e minha irmã Rita por estarem sempre perto de mim, confiando e

incentivando os meus estudos, apesar de todas as dificuldades.

Em algum lugar, algo incrível está esperando para ser descoberto.

Carl Sagan

RESUMO

QUEVEDO, F. P. M. **Comportamento de Túneis Escavados em Meios Viscoplásticos com Ruptura - Simulação Numérica.** 2021. 63p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O projeto e verificação estrutural de túneis profundos envolvem diversos parâmetros geotécnicos bem como a necessidade de prever a convergência (fechamento) e intuir a estabilidade da seção do túnel. Contudo, o campo de deformações e tensões ao redor da cavidade depende de diversos fatores inter-relacionados, tais como, a profundidade, a geometria da seção, a anisotropia das tensões in situ, a heterogeneidade do maciço, o processo construtivo e a interação com o revestimento. Somado a essa complexidade a reologia do maciço é um fator crucial. A rigor o comportamento do maciço é composto por uma parcela instantânea (elástica ou elastoplástica) e diferida (viscosa). O objetivo principal dessa tese é formular, programar e validar, no contexto dos elementos finitos, um modelo constitutivo elastoplástico-viscoplástico geral capaz de reproduzir casos da realidade e permitir estudos sobre esse comportamento. Para a parcela instantânea serão adotados modelos elastoplásticos de Drucker-Prager e Mohr-Coulomb (bem como suas simplificações independentes da pressão, von-Mises e Tresca, respectivamente) com lei endurecimento e amolecimento multilinear governada pela variável interna coesiva. Já o comportamento diferido será estudado através de um modelo viscoplástico perfeito conforme a teoria da sobretensão de Perzyna com as mesmas superfícies da elastoplasticidade. A solução em estado plano de deformações, axissimetria e tridimensional será programada em Fortran90. O processo de escavação e colocação do revestimento é simulado através do método de ativação e desativação dos elementos finitos.

Palavras-chave: *túneis profundos, elastoplasticidade, viscoplasticidade, método dos elementos finitos, leis constitutivas.*

ABSTRACT

QUEVEDO, F. P. M. **Comportamento de Túneis Escavados em Meios Viscoplásticos com Ruptura - Simulação Numérica.** 2021. 63p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

The design and structural verification of deep tunnels involves several geotechnical parameters as well as the need to predict convergence (closure) and intuit the stability of the tunnel section. However, the field of deformations and stresses around the cavity depends on several interrelated factors, such as depth, section geometry, in situ stress anisotropy, rockmass heterogeneity, constructive process and lining interaction. Added to this complexity the rheology of the rockmass is a crucial factor. The behavior of the rockmass is composed of an instantaneous (elastic or elastoplastic) and time dependent (viscous) portion. The main objective of this thesis is to formulate, program and validate, in the context of finite elements method, a general elastoplastic-viscoplastic constitutive model capable of reproducing cases of reality and allowing studies on this behavior. For the instantenous part will be adopted elastoplastic models fo Drucker-Prager and Mohr-Coulomb (as well as their independent pressure simplifications, von-Mises and Tresca, respectively) with multilinear law hardening/softening governed by the cohesive internal variable. The time dependent behavior will be studied through a perfect viscoplastic model according to Perzyna's overstress theory with the same surfaces of elastoplasticity. The plane deformation state, axisimmetry and three-dimensional states will be programmed in Fortran 90. The process of excavation and placement of the lining is simulated through the method of activation and deactivation of tinite elements.

Keywords: *deep tunnels. elastoplasticity. viscoplasticity. finite element method. constitutive laws.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Redução da seção transversal do Túnel de Base Lyon Turin na fronteira entre frança e Itália (fonte: Barla, Bonini e Debernardi (2010, p. 41))	22
Figura 1.2 – Ruptura do suporte (perfil de aço) em uma mina de carvão na China (fonte: Manchao et al. (2015, p. 192))	22
Figura 2.1 – Organograma das etapas da pesquisa	28
Figura 3.1 – Métodos de escavação de túneis	29
Figura 3.2 – (a) <i>Cut and Cover</i> e (b) <i>Cover and Cut</i> (adaptado de: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (U.S.) (2009, p. 5-2))	30
Figura 3.3 – Etapa de execução pelo método de vala recoberta direta no projeto <i>Nordhavnsvej</i> , em Compenhague, Dinamarca (fonte: ROADTRAFFIC-TECHNOLOGY (2017, p. 1))	30
Figura 3.4 – Superior à esquerda: escavadeiras (fonte: Pierrat (2014, p. 1)); superior à direita: escarificador; inferior à esquerda: escavadeira rotativa (fonte: Mitterndorfer (2013, p. 1)) e inferior à direita: martelo hidráulico (fonte: WORD HIGHWAYS (2015, p. 1))	31
Figura 3.5 – Sequência executiva do método de construção por desmonte de rocha (adaptado de: Heinio (1999, p. 215))	32
Figura 3.6 – Superior à esquerda: perfuração; inferior à esquerda: instalação das cargas; à direita: frente de escavação após detonação (fonte: Grad (2013, p. 1)) . .	32
Figura 3.7 – Representação 3D de uma tuneladora (adaptado de: Chapman, Metje e Stärk (2018, p. 151))	33
Figura 3.8 – Ilustração do método de cravação de tubos sob um canal (adaptado de: Chapman, Metje e Stärk (2018, p. 227))	34
Figura 3.9 – À esquerda: vista de cima de um poço de macacos hidráulicos com a descida da TBM; à direita: vista frontal do túnel (fonte: Chapman, Metje e Stärk (2018, p. 227))	34

Figura 3.10 – À esquerda, simulação da falha na face de um túnel (fonte: Schofield (1980, p. 245)); à direita, o colapso progressivo da face do túnel rodoviário <i>Vadlaheidi</i> na Islândia (fonte: Reynolds (2015, p. 1))	35
Figura 3.11 – Ilustração do revestimento e elementos internos de um túnel rodoviário (adaptado de: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM (SÃO PAULO) (2005, p. 20))	36
Figura 3.12 – Ilustração de alguns elementos de pré-suporte e revestimento (adaptado de: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (U.S.) (2009, p. 9-14))	37
Figura 4.1 – Ilustração do arqueamento das tensões principais (adaptado de: França (2006, p. 10-11))	41
Figura 4.2 – Campo vetorial de deslocamentos no maciço durante a escavação de um túnel (adaptado de: França (2006, p. 12))	42
Figura 4.3 – Ilustração das medidas geométricas que compõe a convergência de uma seção circular: a) corte transversal, b) corte longitudinal	43
Figura 4.4 – Medidas da convergência em quatro direções de uma seção não circular (adaptado de: Panet (1995, p. 8))	43
Figura 4.5 – Perfil de convergências próximo à frente de escavação (adaptado de: Hanafy e Emery (1980) <i>apud</i> Couto (2011, p. 42))	44
Figura 4.6 – Número de incidentes em quatro banco de dados discriminados por autor e método de escavação (adaptado de: Špačková (2012, p. 19))	45
Figura 4.7 – Distribuição de incidentes de acordo com nove tipologias (adaptado de: Sousa (2010, p. 82))	45
Figura 4.8 – Mecanismo de ruptura por <i>Spalling</i> de um comprimento L junto à seção do túnel: detalhamento do crescimento das fissuras e flambagem de uma profundidade h da rocha no contorno da seção (adaptado de: Germanovich e Dyskin (2000, p. 267))	46
Figura 4.9 – À esquerda uma seção remanescente após moderada fragmentação e quebra em um túnel escavado com TBM e à direita uma seção em que parte do contorno apresentou instabilidade (flambagem) em um túnel escavado de forma não mecanizada (fonte: Diederichs (2007, p. 1084))	47

Figura 4.10 – Evolução da convergência do túnel Fréjus (adaptado de: Lunardi (1980, p. 17))	48
Figura 4.11 – Evolução do fechamento da seção GED (convergência) na galeria do laboratório <i>Meuse/Haute-Marne</i> (adaptado de: Guayacán-Carrillo et al. (2016, p. 103))	48
Figura 4.12 – Ensaio triaxial com medição da variação do volume para o caso de uma argila rígida (adaptado de: Rousset (1988, p. 35))	49
Figura 4.13 – Ensaio triaxial com medição da variação do volume para o caso de uma argila dúctil (adaptado de: Rousset (1988, p. 35))	50
Figura 4.14 – Deslocamentos e tensões no entorno de uma seção circular submetida às tensões iniciais geostáticas-hidrostáticas p_∞ e pressão interna p_i . À esquerda, maciço elástico e à direita, elastoplástico.	52
Figura 4.15 – Curva característica em um ensaio de fluência com os três estágios de comportamento (adaptado de: Costa (1984, p. 107))	53

LISTA DE QUADROS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NATM New Austrian Tunneling Method

abnTeX ABsurdas Normas para TeX

LISTA DE SÍMBOLOS

r	Coordenada radial no plano da seção transversal do túnel
R	Raio da seção do túnel
$u(r)$	Magnitude do deslocamento radial no interior do maciço
U	Convergência da seção do túnel
U_{max}	Convergência máxima da seção do túnel
\in	Pertence

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	DIRETRIZES DA PESQUISA	25
2.1	TEMA	25
2.2	METODOLOGIA	25
2.3	OBJETIVOS	25
2.4	DELIMITAÇÕES	26
2.5	DELINEAMENTO	27
3	ESTADO DA ARTE	29
3.1	MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO	29
3.1.1	Vala recoberta	30
3.1.2	Escavação simples	31
3.1.3	Desmonte de rocha	31
3.1.4	Tuneladora	32
3.1.5	Cravação de tubos	33
3.2	PRÉ-SUPORTES E MELHORAMENTO DO MACIÇO	34
3.3	REVESTIMENTO DE TÚNEIS	36
3.4	PRINCIPAIS ASPECTOS CONSIDERADOS EM ESTUDOS NUMÉRICOS RECENTES DE TÚNEIS	38
4	COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TÚNEIS	41
4.1	INFLUÊNCIA DA ESCAVAÇÃO E O CONCEITO DE CONVERGÊNCIA DA SEÇÃO	41
4.2	MECANISMOS DE RUPTURA EM TÚNEIS PROFUNDOS	44

4.3	INFLUÊNCIA DA REOLOGIA DO MACIÇO	49
4.3.1	Comportamento instantâneo	49
4.3.2	Comportamento diferido no tempo	52
4.3.3	Alguns estudos considerando leis elastoplásticas e viscoplásticas	54
4.4	INFLUÊNCIA DA FORMA DA SEÇÃO	54
4.5	INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DO TÚNEL	54
4.6	INFLUÊNCIA DA PROXIMIDADE DA SUPERFÍCIE	54
4.7	INFLUÊNCIA DO REVESTIMENTO E PARÂMETROS ADIMENSIONAIS	54
4.8	MÉTODO CONVERGÊNCIA-CONFINAMENTO	54
5	MODELO MECÂNICO	55
5.1	EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO LOCAL E A HIPÓTESE DA EVOLUÇÃO QUASE ESTÁTICA	55
5.2	ADMISSIBILIDADE ESTÁTICA, NATUREZA EULERIANA DO CAMPO DE TENSÕES, TRANSFORMAÇÃO GEOMÉTRICA E MEDIDA DE DEFORMAÇÃO	55
5.3	HIPÓTESE DAS PEQUENAS PERTURBAÇÕES E A DESCRIÇÃO LAGRANGEANA	55
5.4	MODELO CONSTITUTIVO ELÁSTICO	55
5.5	MODELO CONSTITUTIVO ELASTOPLÁSTICO	55
5.6	MODELO CONSTITUTIVO VISCOPLÁSTICO	55
5.7	MODELO CONSTITUTIVO ELASTOPLÁSTICO-VISCOPLÁSTICO	55
6	SOLUÇÃO DO MODELO MECÂNICO	56
6.1	FORMA FRACA DAS EQUAÇÕES DE CAMPO	56
6.2	NOTAÇÃO DE VOIGT	56

6.3	DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL EM ELEMENTOS FINITOS	56
6.4	SOLUÇÃO DO SISTEMA E DISCRETIZAÇÃO TEMPORAL	56
6.5	ALGORITMO DE ATUALIZAÇÃO DAS TENSÕES E VARIÁVEIS INTERNAS	56
6.5.1	Integração das equações constitutivas elastoplásticas	56
6.5.1.1	Esquema de integração totalmente implícito	56
6.5.1.2	Esquema de integração semi-implícito	56
6.5.2	Atualização do módulo constitutivo	56
6.5.3	Particularizando para estado plano de deformações e axis-simetria	56
6.5.4	Domínios, discretização, condições de contorno e ciclo construtivo para os modelos de verificação	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Os túneis são grandes obras de engenharia que, além de causar grande admiração, atendem a diversas finalidades, sendo a mais conhecida aquela de transpor barreiras geológicas como, por exemplo, montanhas e canais marítimos, trazendo maior eficiência no transporte de recursos e pessoas. Também devido à crescente preocupação com o meio ambiente e com a preservação da superfície, essas estruturas têm sido cada vez mais empregadas em grandes cidades, melhorando assim a mobilidade urbana como, por exemplo, em metrôs e servindo de suporte para serviços públicos, tais como redes de água, esgoto, gás e eletricidade. São também empregados em hidroelétricas, laboratórios subterrâneos e instalações profundas para armazenamento de material radioativo.

Há, no entanto, um risco intrínseco associado a essas grandes obras, uma vez que o subsolo é em grande parte desconhecido e possui um comportamento complexo. Apesar de muitas dessas construções serem finalizadas com sucesso, ocorrem incidentes que levam a atrasos, custos excessivos e, em alguns casos, consequências mais significativas, tais como, danos em patrimônios de terceiros e perdas de vidas. Esses imprevistos estão relacionados a uma série de fatores que vão desde incertezas geológicas, cálculos inadequados, processo construtivo inapropriado e insuficiente monitoramento das deformações in loco. Não obstante, uma parte destes acidentes está relacionada com a dificuldade em prever e modelar o comportamento mecânico dessas grandes obras.

Um dos comportamentos de difícil modelagem e ainda estudado é justamente a interação entre o comportamento instantâneo e o diferido dessas estruturas. Este comportamento pode ter um impacto significativo nas deformações e estabilidade da cavidade. A plastificação no entorno do maciço, o fechamento gradual da seção do túnel, a extrusão da face de escavação e a sobrecarga sobre o revestimento, podem se desenvolver durante o tempo construtivo, no curto prazo, ou ainda, meses e anos após a construção do túnel no médio e longo prazo. Esse comportamento pode causar deformações excessivas (Figura 1.1), danos ao revestimento (Figura 1.2) e, em alguns casos, pela magnitude dos efeitos, acarretar o colapso da região no entorno do túnel.



Figura 1.1 – Redução da seção transversal do Túnel de Base Lyon Turin na fronteira entre frança e Itália (fonte: Barla, Bonini e Debernardi (2010, p. 41))



Figura 1.2 – Ruptura do suporte (perfil de aço) em uma mina de carvão na China (fonte: Manchao et al. (2015, p. 192))

Além da estabilidade da cavidade, a tecnologia escolhida para escavação é altamente influenciada pela magnitude dessa condição diferida no tempo. Por exemplo, em escavações com tuneladoras (TBM - *Tunnel Boring Machines*), as pressões que se desenvolvem sobre a blindagem podem causar uma série de dificuldades como o aprisionamento da máquina (tal como visto em Ramoni

e Anagnostou (2010a, 2010b)). É sabido também que suportes flexíveis ou que apresentam um comportamento diferido no tempo (perfis metálicos deslizantes ou concreto projetado) são mais adequados do que suportes rígidos, uma vez que permitem um certo grau de acomodação dessas deformações diferidas.

Muitos estudos consideram leis constitutivas empírico-experimentais, viscoelásticas ou ainda viscoplásticas em suas análises diferidas no tempo, contudo, todos esses modelos partem de um comportamento instantâneo elástico o que pode não corresponder com a realidade, uma vez que o maciço pode possuir um comportamento instantâneo elastoplástico.

Em vista da importância do tema para a comunidade geotécnica de túneis, a presente tese buscará estudar e modelar o comportamento diferido no tempo, considerando um modelo viscoplastico, conjuntamente com o comportamento instantâneo dado por um modelo elastoplástico.

Além dessa introdução, esse trabalho está dividido em mais 7 capítulos.

O capítulo 2 tem a finalidade de esclarecer o mais objetivamente possível o que se pretende desenvolver nessa tese, explicitando o tema, os objetivos que se pretende alcançar, as delimitações que serão adotadas e o delineamento de como se dará o trabalho.

O capítulo 3 foi introduzido com o intuito de apresentar brevemente alguns aspectos do estado da arte de túneis. Portanto, esse capítulo resume brevemente os métodos de escavação, os elementos e técnicas de pré-suporte, os revestimentos e principais aspectos considerados em estudos numéricos recentes. Portanto, esse capítulo é opcional aos leitores mais experientes e pode ser ignorado sem prejuízo ao entendimento do trabalho restante.

O capítulo 4 tem por finalidade instruir o leitor no comportamento mecânico de túneis e seus conceitos fundamentais. Esse capítulo está dividido de acordo com os principais fatores que influenciam o campo de tensões e deformações no entorno dessas estruturas, tais como, o processo de escavação, o comportamento reológico do maciço, a forma da seção, a profundidade do túnel, a proximidade da superfície e a interação com o revestimento. Nesse capítulo será dada uma maior ênfase na reologia do maciço, caracterizando o comportamento instantâneo e diferido, que são justamente os comportamentos almejados no modelo proposto dessa tese. Também será apresentado alguns estudos que consideraram leis elastoplástica-viscoplástica no comportamento do maciço.

O capítulo 5 descreve o modelo teórico que será implementado esclarecendo as principais hipóteses e explicando as leis constitutivas que serão adotadas (elástica, elastoplástica e viscoplástica) da forma mais genérica possível e em separado. No final desse capítulo é descrito então o modelo constitutivo acoplado elastoplástico-viscoplástico que será desenvolvido nessa tese.

O **capítulo 6** se refere a solução numérica do modelo teórico que se pretende implementar. Portanto, descreve a discretização espacial em elementos finitos, incluindo os tipos de elementos que serão utilizados, o método de solução do sistema não linear e o algoritmo de integração das leis constitutivas. Esse último é um dos principais focos do trabalho, uma vez que nele será feita a junção entre o modelo elastoplástico (instantâneo) e o viscoplástico (diferido). Também nesse capítulo é apresentado as malhas propostas para as análises de túneis profundos (estado plano de deformação, tridimensional e axissimétrico) bem como as condições de contorno utilizadas e a descrição do processo de escavação e colocação do revestimento pelo método da ativação e desativação de elementos.

O **capítulo 7** mostra algumas validações do programa até então implementado, primeiramente apresentando alguns testes genéricos demonstrando a correta aplicação as condições de contorno e posteriormente a comparação com a solução analítica para túneis profundos elastoplásticos-viscoplásticos desenvolvida por Piepi (1995). Essa validação é apenas parcial, uma vez que essa solução considera o comportamento elastoplástico-viscoplástico perfeito associado obedecendo apenas ao critério de Tresca. Contudo, é importante para demonstrar que o algoritmo acoplado está funcionando.

Por fim, o **capítulo 8** faz o fechamento do presente texto de qualificação apresentando algumas conclusões preliminares, perspectivas e cronograma.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

2.1 TEMA

O tema dessa tese é o estudo das deformações induzidas pelo processo construtivo de túneis profundos em maciços que apresentam comportamento instantâneo e diferido no tempo.

2.2 METODOLOGIA

A metodologia consiste em uma **abordagem teórica** derivada da mecânica do contínuo cuja solução será obtida de forma **numérica** através do **método dos elementos finitos**.

2.3 OBJETIVOS

O **objetivo principal** desta pesquisa consiste em formular e programar um modelo constitutivo elastoplástico-viscoplástico para analisar as deformações instantâneas e diferidas induzidas pelo processo de escavação em túneis profundos, incorporando a interação tridimensional entre o maciço e o revestimento.

Como **objetivos secundários** têm-se:

- a) desenvolvimento de um *software* em *Fortran90* baseado no método dos elementos finitos capaz de fazer análises tridimensionais considerando as etapas construtivas;
- b) generalizar esse *software* para análises em estado plano de deformações e axissimetria, uma vez que essas análises são rápidas, do ponto de vista computacional, e comuns em diversos estudos na literatura;
- c) formular um algoritmo de integração das leis constitutivas capaz de lidar conjuntamente com o comportamento diferido e instantâneo do maciço;
- d) incorporar diversas leis de comportamento (elásticas, elastoplásticas, viscoplásticas e elastoplásticas-viscoplásticas) no *software* para verificações e validações;
- e) verificar o *software* com problemas mais simples utilizando o GEOME91 e o

ANSYS;

- f) calibração do *software* com ensaios reais e validação com estudos de casos envolvendo túneis profundos que constam na literatura.

2.4 DELIMITAÇÕES

Os túneis podem sofrer influência da superfície como, por exemplo, deformações adicionais devido às cargas superficiais, e, inclusive, intervirem nelas e suas estruturas através de recalques superficiais ocasionados pela execução do túnel. Contudo, apesar da generalidade dos modelos desenvolvidos no presente trabalho, será dado enfoque nos túneis profundos, portanto, **não é considerada a influência de estruturas superficiais ou recalques na superfície induzidos pela escavação.**

Embora o maciço em que um túnel está imerso possa apresentar descontinuidades, em muitos casos, seu comportamento global pode ser simulado efetivamente como um **meio contínuo**. Apesar do comportamento complexo do maciço, que é função também de diversas propriedades que variam espacialmente, nesse trabalho é considerado um **maciço homogêneo e isotrópico**. Em vista disso, o **maciço é considerado monofásico** com seu comportamento instantâneo e diferido **modelado fenomenologicamente através de uma lei reológica** elástica, elastoplástica, viscoplástica e elastoplástica-viscoplástica, **não considerando, portanto, outras abordagens como, por exemplo, as da poro mecânica e as que tratam da influência do fluxo de água**.

É também sabido que, em geral, o estado de tensões internas em um maciço é extremamente complexo, devido aos movimentos tectônicos, descontinuidades e heterogeneidades. Em busca de generalidade do *software* nesse sentido, almejando também análises de casos reais, é implementado um **estado anisotrópico de tensões iniciais**. Além disso, as análises iniciam de **uma configuração de referência indeformada**.

Como é visto no Capítulo 4, a velocidade de escavação e colocação do revestimento é uma variável importante quando se tem fenômenos diferidos no tempo. Essa velocidade depende de diversos fatores relacionados à dificuldade de escavação do maciço e ao cronograma de execução da obra. Contudo, nesse trabalho, apesar da generalidade, diferentemente da prática usual de execução de túneis, **a velocidade de avanço da face de escavação é considerada constante**.

Apesar de um túnel poder atravessar um perfil litológico heterogêneo, o que pode exigir um revestimento e técnicas de pré-suporte especializados para cada região, no presente estudo, o **revestimento consiste em um modelo único de espessura constante** (sem distinção entre revestimento primário e secundário) ao longo de todo o eixo longitudinal do túnel.

Principalmente em escavações não mecanizadas, é comum a frente de escavação apresentar parcializações de modo a estabilizar ou diminuir as deformações dessa zona. Apesar disso, nesse trabalho a escavação é feita à seção plena, plana e vertical sem considerar nenhuma técnica ou elemento de pré-suporte.

Os modelos incorporados no programa são: **elástico, elastoplástico, viscoplástico e elastoplástico-viscoplástico**. Estão implementados para o maciço os modelos clássicos elastoplásticos (von-Mises, Drucker-Prager, Tresca e Mohr-Coulomb) e o modelo viscoplástico de Perzyna (1966) com as mesmas superfícies de escoamento do modelo elastoplástico, contudo, não necessariamente com os mesmos parâmetros. **Para o revestimento é utilizado o modelo elástico linear**.

A evolução das deformações se dá de forma **quase-estática**, portanto, não são considerados os termos iniciais (densidade e aceleração) ou excitações dinâmicas (como seria, por exemplo, em uma análise considerando terremotos e explosões). Além disso, é considerada a **hipótese das pequenas perturbações**.

2.5 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica sobre túneis e o tema da tese;
- b) pesquisa bibliográfica sobre os modelos constitutivos elastoplásticos e viscoplásticos que foram implementados;
- c) pesquisa bibliográfica sobre a solução do problema no contexto de elementos finitos;
- d) desenvolvimento do *software* de elementos finitos;
- e) verificação do *software* com soluções analíticas, GEOMECH91 e ANSYS;
- f) validação do modelo em estudos de casos que constam na literatura;
- g) estudo da diferença entre considerar o modelo elastoplástico-viscoplástico em relação a outros modelos mais simples.

O organograma da Figura 2.1 ilustra a relação entre as etapas durante o trabalho.

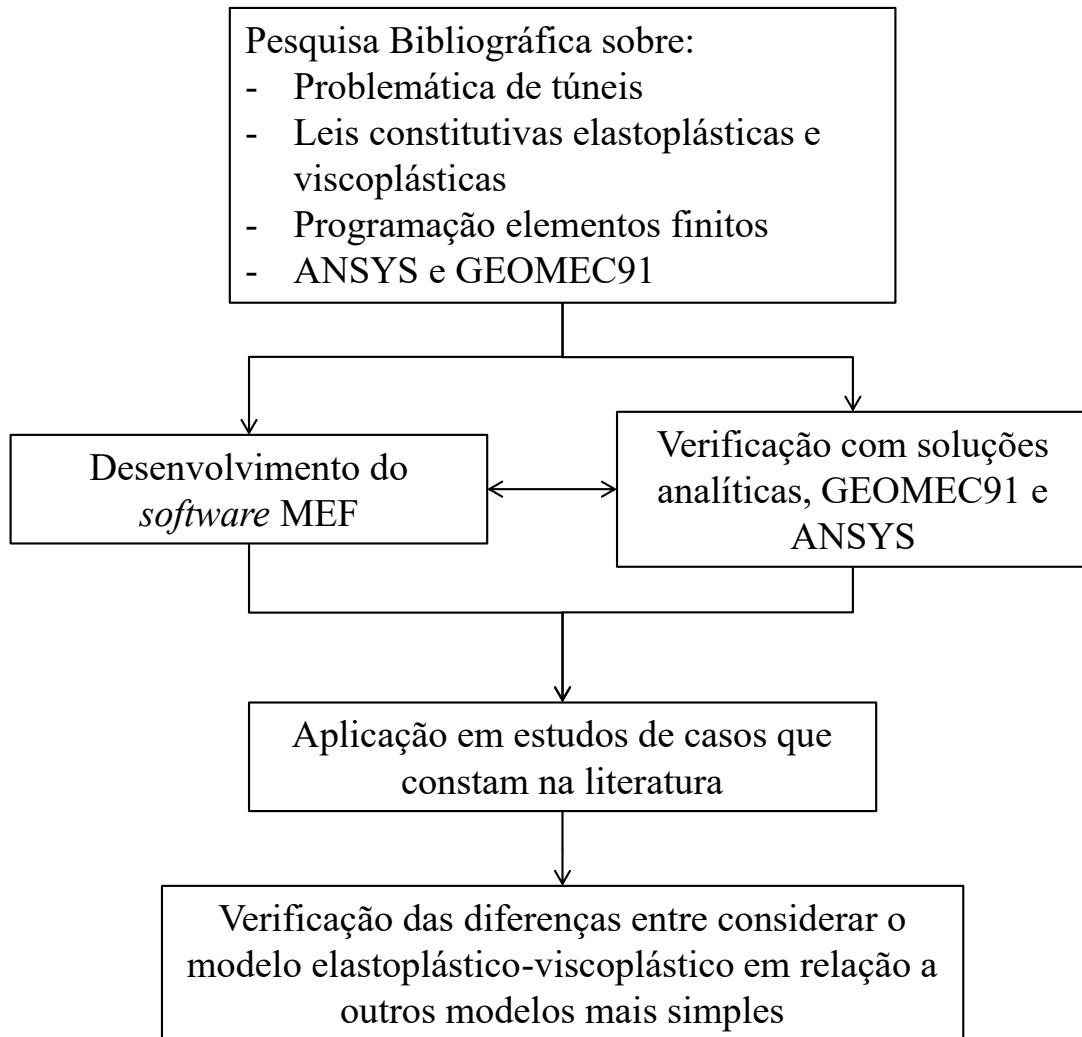


Figura 2.1 – Organograma das etapas da pesquisa

3 ESTADO DA ARTE

3.1 MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO

Há diversas formas de se executar túneis, tanto profundos quanto superficiais. Durante a escolha do método de escavação, o engenheiro deve levar em conta diversos fatores, tais como: geometria da seção, comprimento do túnel, condições geológicas, nível da água, restrições quanto às vibrações, estabilidade da cavidade, riscos de assentamentos superficiais, hipóteses de projeto, segurança dos operários, viabilidade ambiental e econômica. Em vista dessa complexidade é possível utilizar mais de um método de escavação ao longo do eixo do túnel. A Figura 3.1 resume os principais métodos de escavação.

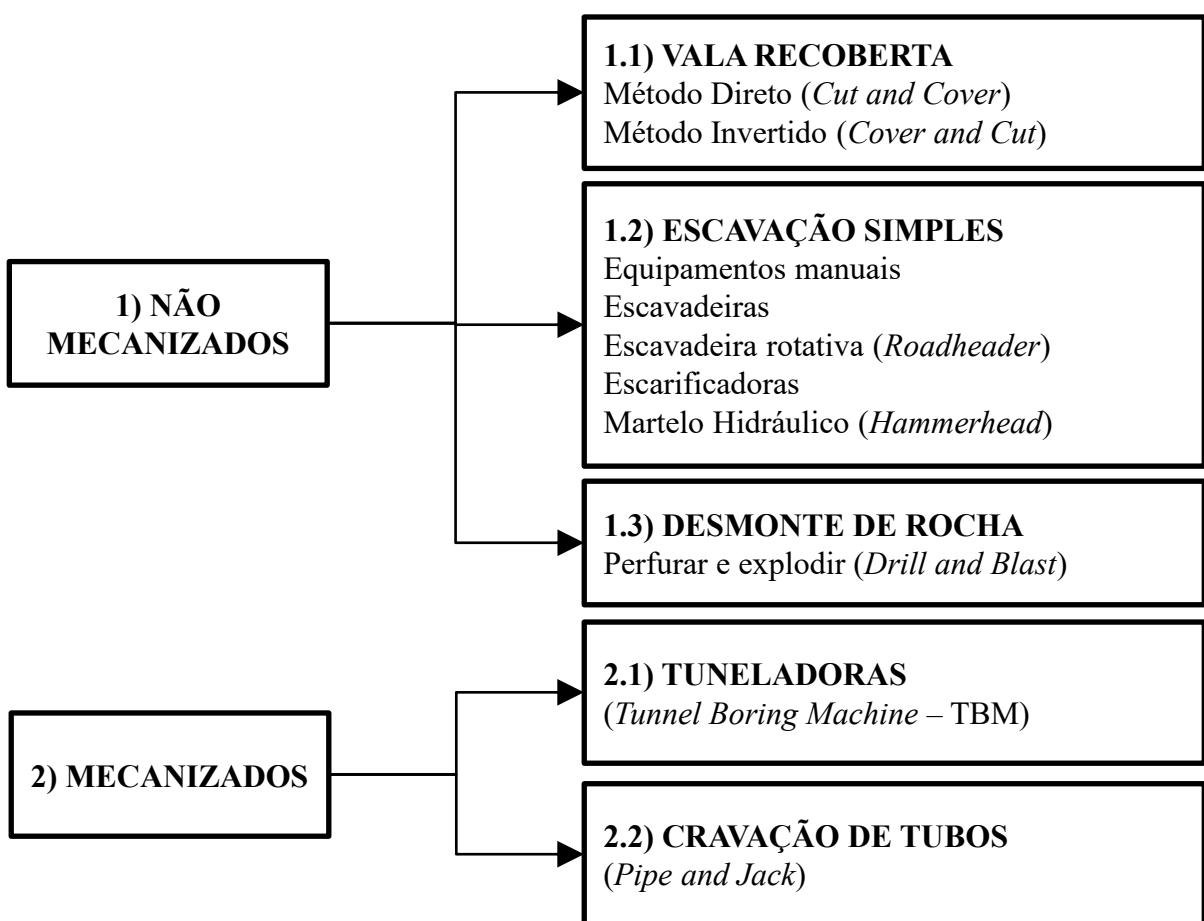


Figura 3.1 – Métodos de escavação de túneis

Os métodos se dividem em dois grandes grupos: 1) não mecanizados (convencionais) e 2) mecanizados. A diferença é que este último é caracterizado pela presença de tuneladoras, que são

máquinas especializadas em adentrar a frente de escavação. Os métodos ditos “não mecanizados” não possuem essas máquinas especializadas e podem ser agrupados em: vala recoberta, escavação simples e desmonte de rocha.

3.1.1 Vala recoberta

O método da vala recoberta é utilizado preferencialmente para túneis superficiais. Pode ser executado de duas formas: direta (*Cut and Cover*) ou invertida (*Cover and Cut*). A Figura 3.2 e Figura 3.3 ilustram esse método.

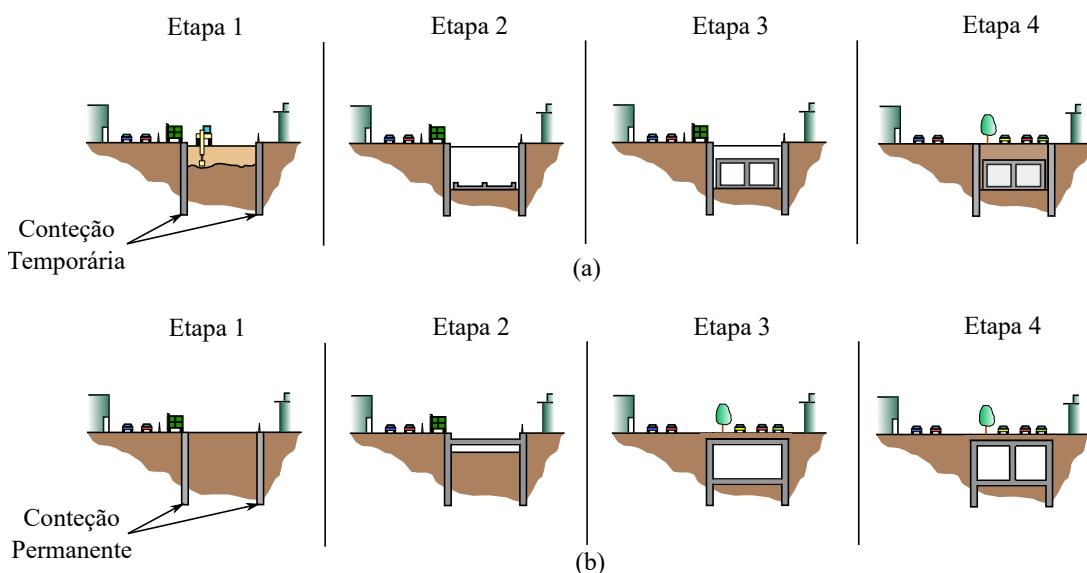


Figura 3.2 – (a) *Cut and Cover* e (b) *Cover and Cut* (adaptado de: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (U.S.) (2009, p. 5-2))



Figura 3.3 – Etapa de execução pelo método de vala recoberta direta no projeto *Nordhavnsvej*, em Compenhague, Dinamarca (fonte: ROADTRAFFIC-TECHNOLOGY (2017, p. 1))

Como o presente trabalho está delimitado aos túneis profundos esse método de escavação estará fora do escopo desta tese. Além disso, o comportamento mecânico desse túnel é diverso daqueles profundos que, tal como será visto no Capítulo 4, mobilizam a resistência do maciço na estabilidade da cavidade.

3.1.2 Escavação simples

A escavação simples é o método que permite maior flexibilidade quanto à geometria da seção e é ideal para escavar galerias de formatos complexos como, por exemplo, estações e conexões. Essa escavação pode ser feita com uma combinação de ferramentas que vão desde manuais até equipamentos mecânicos, como escavadeira simples, escavadeira rotativa (*Roadheader*), escarificador e martelo hidráulico (*Hammerhead*) (Figura 3.4). A produtividade desse método varia, mas dificilmente ultrapassa 10m/dia de avanço.

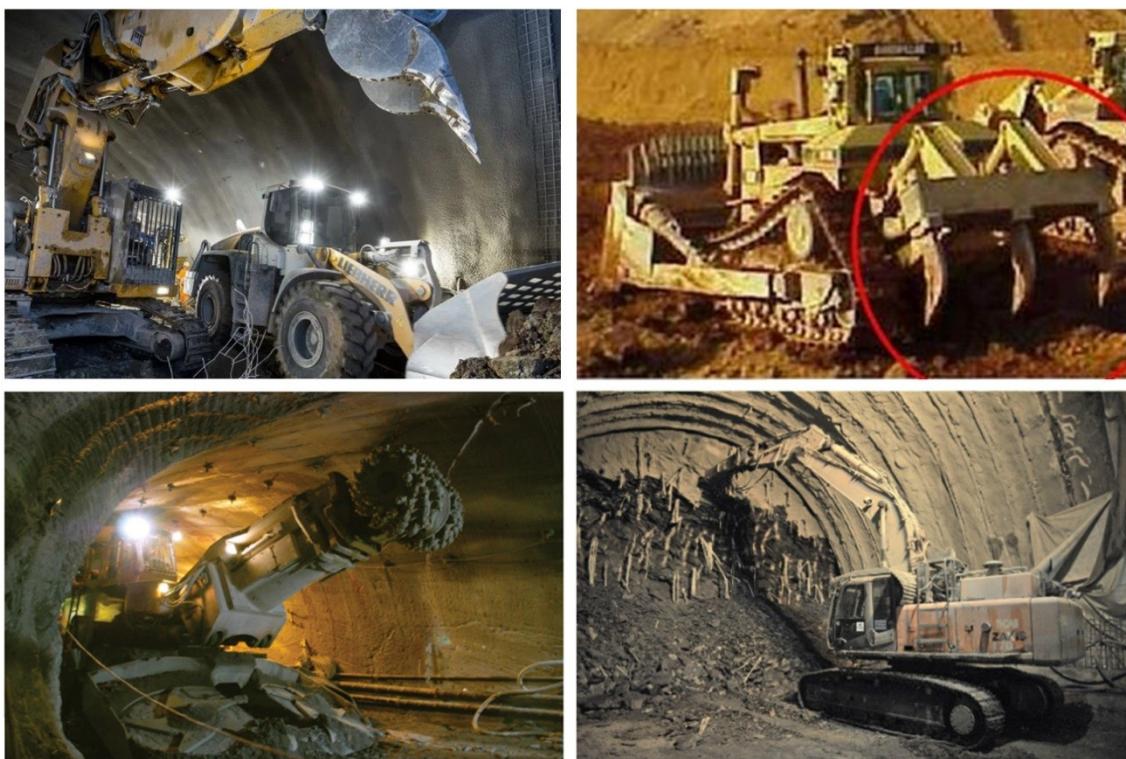


Figura 3.4 – Superior à esquerda: escavadeiras (fonte: Pierrat (2014, p. 1)); superior à direita: escarificador; inferior à esquerda: escavadeira rotativa (fonte: Mitterndorfer (2013, p. 1)) e inferior à direita: martelo hidráulico (fonte: WORD HIGHWAYS (2015, p. 1))

3.1.3 Desmonte de rocha

Quando há dificuldade de penetração no maciço, é necessário utilizar o método de perfuração e detonação, que consiste em perfurar, instalar o material explosivo e detonar a frente de escavação.

O ciclo desse método é ilustrado na Figura 3.5 e Figura 3.6.

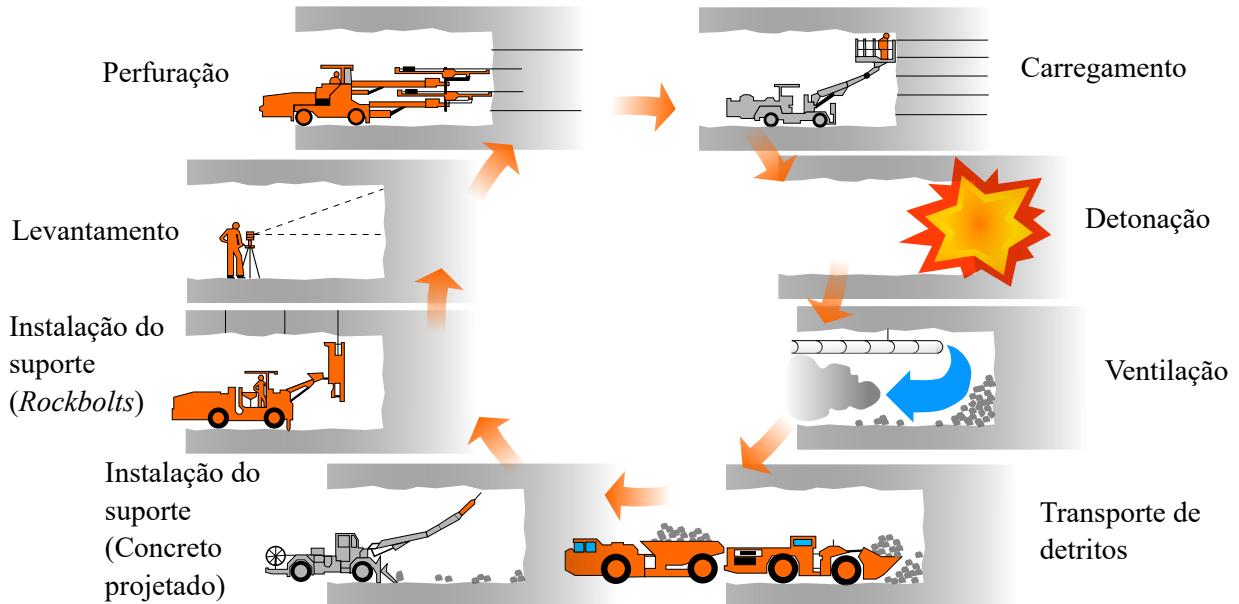


Figura 3.5 – Sequência executiva do método de construção por desmonte de rocha (adaptado de: Heiniö (1999, p. 215))



Figura 3.6 – Superior à esquerda: perfuração; inferior à esquerda: instalação das cargas; à direita: frente de escavação após detonação (fonte: Grad (2013, p. 1))

3.1.4 Tuneladora

As tuneladoras, tal como ilustrada na Figura 3.7, nada mais são do que a evolução do método de escavação com plataformas de Marc Brunel desenvolvido em 1843 (durante a construção do túnel subfluvial sob o rio Tâmisa em Londres). Hoje em dia, essa escavação é totalmente mecanizada e possui excelente regularidade da superfície escavada. A produtividade depende de

vários fatores (diâmetro da seção do túnel, condições do maciço, potência e tamanho da máquina, tipo de revestimento e experiência das equipes) e pode atingir até 20m/dia (BROX, 2017, p. 98). Geralmente possuem maquinário acoplado para executar o revestimento em concreto projetado ou pré-moldado. Quando o maciço a ser escavado é pouco resistente utiliza-se um escudo (*Shield*) ou lama sob pressão imediatamente anterior à frente de escavação para evitar o colapso da cavidade. As principais desvantagens são os custos e a dificuldade de transporte da máquina.

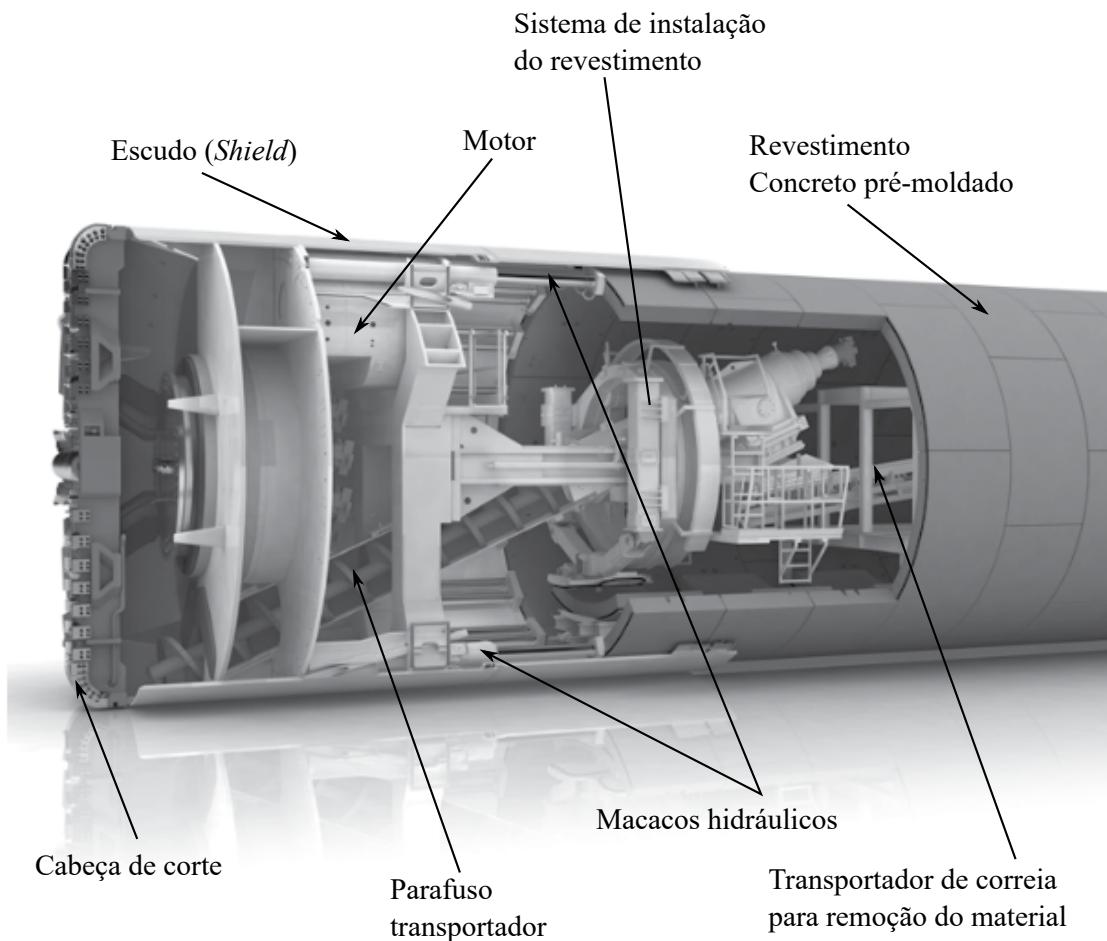


Figura 3.7 – Representação 3D de uma tuneladora (adaptado de: Chapman, Metje e Stark (2018, p. 151))

3.1.5 Cravação de tubos

Por fim, o método mecanizado de cravação de tubos consiste em conectar dois poços cravando tubos com auxílio de macacos hidráulicos, uma parede de reação e uma pequena tuneladora (com ou sem escudo). Esse método é comum quando se tem poucas distâncias a vencer, túneis superficiais e solos brandos. São, portanto, preferencialmente utilizados em obras de fornecimento de água, esgoto, eletricidade e gás nos centros urbanos. A Figura 3.8 e Figura 3.9 ilustram esse método de escavação.

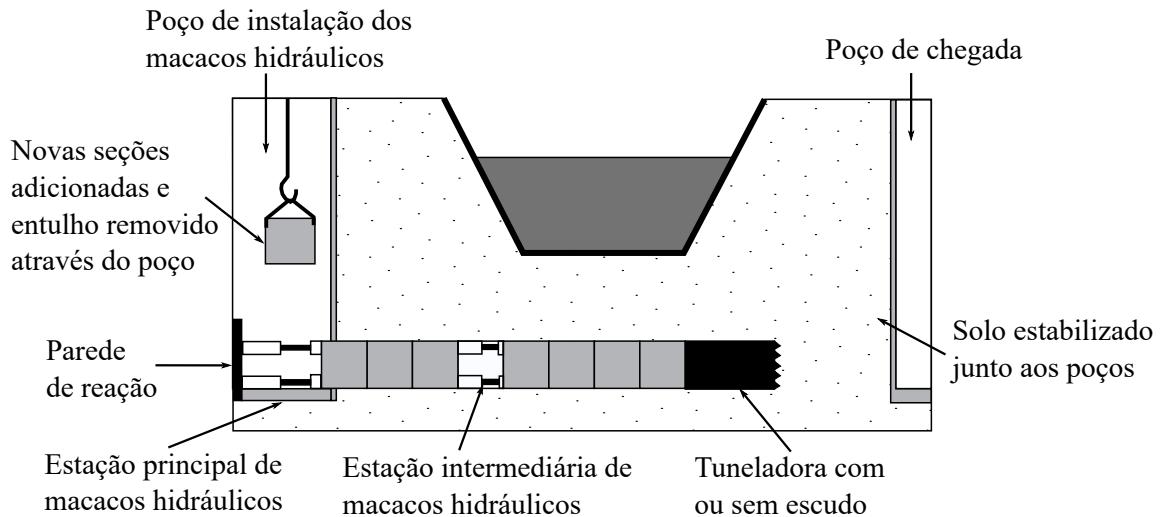


Figura 3.8 – Ilustração do método de cravação de tubos sob um canal
(adaptado de: Chapman, Metje e Stark (2018, p. 227))

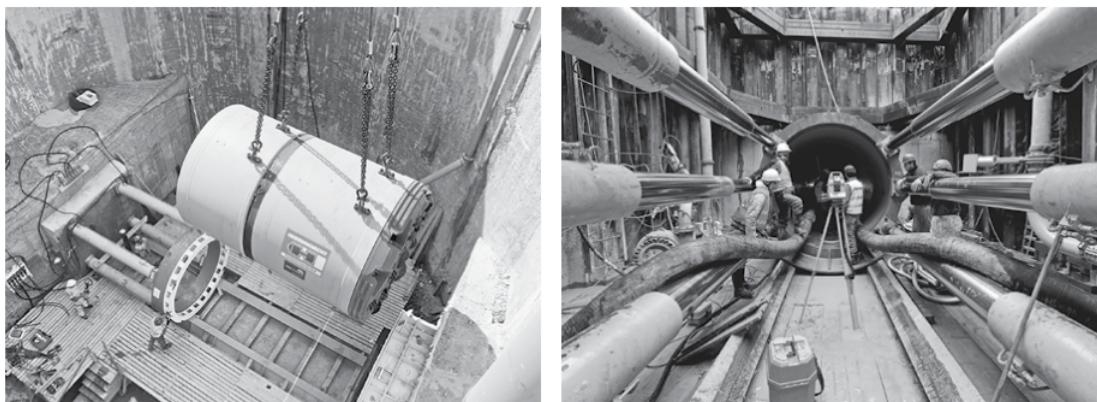


Figura 3.9 – À esquerda: vista de cima de um poço de macacos hidráulicos com a descida da TBM; à direita: vista frontal do túnel
(fonte: Chapman, Metje e Stark (2018, p. 227))

Como este trabalho está delimitado aos túneis profundos, esse método de escavação estará fora do escopo dessa tese. Apesar de mobilizar a resistência do maciço possuí condições de contorno bem diversas de túneis profundos.

3.2 PRÉ-SUPPORTES E MELHORAMENTO DO MACIÇO

O termo **pré-suporte** não comprehende apenas os elementos físicos, mas também técnicas que são utilizadas visando à estabilidade do maciço antes de iniciar a etapa de escavação da face de avanço do túnel. São comumente empregados em maciços ou regiões do maciço que apresentam riscos de desabamentos iminentes (Figura 3.10).



Figura 3.10 – À esquerda, simulação da falha na face de um túnel (fonte: Schofield (1980, p. 245)); à direita, o colapso progressivo da face do túnel rodoviário *Vadlaheidi* na Islândia (fonte: Reynolds (2015, p. 1))

Alguns exemplos de técnicas de pré-suporte são:

- a) **enfilagens**: instalação de barras, placas ou perfis de aço no interior do maciço, logo acima do perímetro da seção de escavação;
- b) **escavação parcializada**: criação de taludes ou nichos de escavação sustentados com concreto projetado;
- c) **tirantes frontais**: consiste na instalação de tirantes de fibra de vidro ou injeções de concreto na face de escavação. Comumente utilizados quando o túnel tem que passar por zonas instáveis como, por exemplo, falhas geológicas;
- d) **pré-confinamento com ar comprimido**: consiste em aplicar ar com uma determinada pressão no interior da galeria de escavação. Essa técnica é comum em solos moles ou saturados com água;
- e) **técnicas de melhoramento**: injeção de nata de cimento sobre pressão (*Jet Grouting*) ou consolidação do solo por meio do congelamento com nitrogênio líquido (ou com salmoura), injeções químicas, ou ainda, rebaixamento do lençol freático.

Mais detalhes sobre essas técnicas podem ser encontradas em FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (U.S.) (2009, p. 9-36), Maidl, Thewes e Maidl (2013, p. 21) e em Chapman, Metje e Stärk (2018, p. 77). Como neste trabalho estamos interessados na modelagem da lei constitutiva do maciço não serão consideradas essas técnicas na modelagem.

3.3 REVESTIMENTO DE TÚNEIS

O revestimento de um túnel (também conhecido como suporte) tem como finalidade atender critérios operacionais de manutenção e de estabilidade da cavidade a curto, médio e longo prazo quando o maciço por conta própria não atende esses critérios. O revestimento é composto por um **revestimento primário** e, quando necessário, um **revestimento secundário**. A Figura 3.11 ilustra os elementos de uma seção típica de um túnel rodoviário.

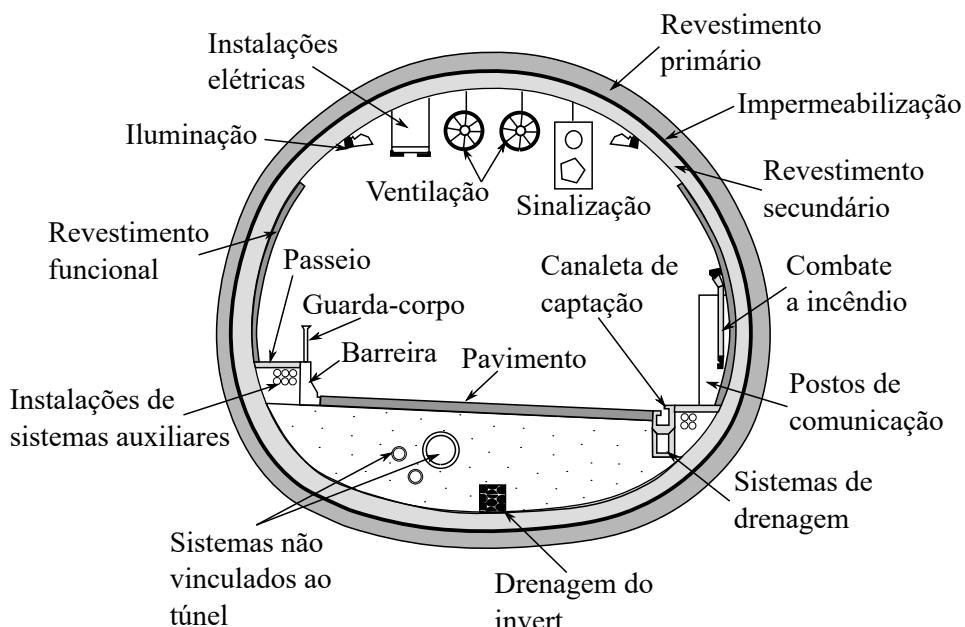


Figura 3.11 – Ilustração do revestimento e elementos internos de um túnel rodoviário (adaptado de: DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM (SÃO PAULO) (2005, p. 20))

O **revestimento primário** compreende os elementos físicos de suporte inicial (aplicados imediatamente após a escavação), com a finalidade de manter a cavidade do túnel estável. Contudo, quando os elementos de suporte inicial não são suficientes para estabilização da cavidade no médio e longo prazo, adicionam-se mais elementos constituindo assim o **revestimento secundário**. Quando se utiliza o revestimento secundário, o revestimento primário é comumente projetado com a finalidade exclusiva de garantir a estabilidade local da cavidade do túnel durante o período construtivo. Contudo, ambos contribuem para a estabilidade de médio e longo prazo.

É comum utilizar um ou mais de um dos seguintes elementos de suporte:

- tirantes radiais:** são cabos (*Cablebolts*) ou chumbadores (*Rockbolts*) ancorados ao longo do perímetro do túnel de forma mecânica (por atrito) e/ou química (com epóxi ou graute). Esses elementos podem estar tensionados (ativos) ou não (passivos) e serem permanentes ou temporários;

- b) **cintas metálicas:** são treliças ou trechos anelares metálicos (unidos entre si de forma rígida por parafusos, por soldagem, ou ainda, com uma união flexível podendo deslizar em suas juntas) instalados com um determinado espaçamento ao longo do comprimento longitudinal do túnel;
- c) **concreto projetado:** consiste em aplicar uma ou várias camadas de concreto (com ou sem fibras) sobre a superfície escavada do túnel. A superfície pode ainda conter telas metálicas ou cintas metálicas que ficarão embutidas nas camadas de concreto;
- d) **concreto pré-moldado:** consiste em instalar trechos anelares pré-fabricados de concreto;
- e) **concreto armado:** consiste em aplicar concreto e uma malha composta por vergalhões de aço no contorno da seção.

A Figura 3.12 ilustra alguns desses elementos.

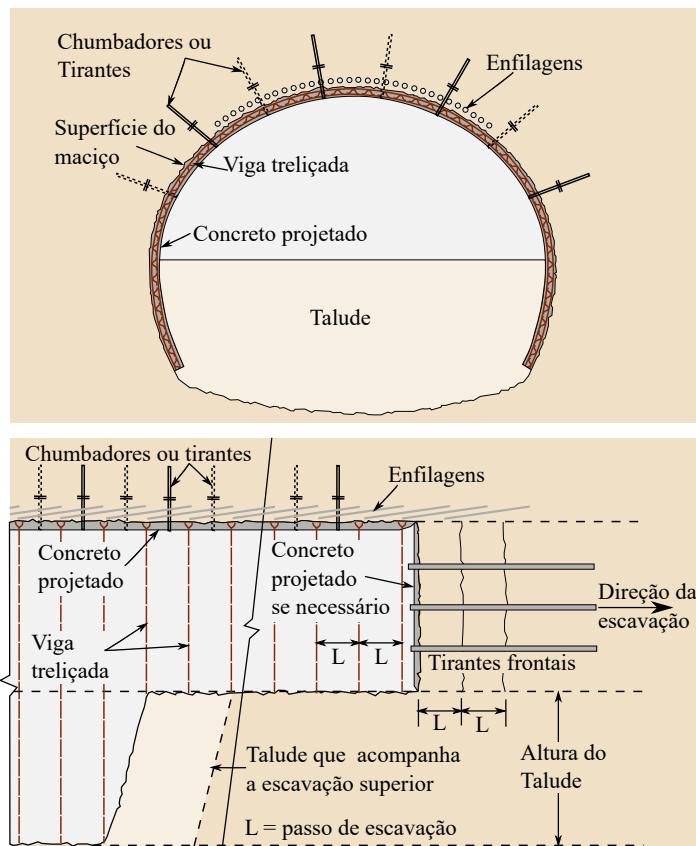


Figura 3.12 – Ilustração de alguns elementos de pré-suporte e revestimento (adaptado de: FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (U.S.) (2009, p. 9-14))

Como este trabalho está delimitado às leis constitutivas do maciço, não será abordado a diferen-

ciação entre o revestimento primário e secundário. Além do mais, nos modelos desenvolvidos, o revestimento consiste de um material homogêneo, isotrópico e de espessura constante. E a escavação é feita a seção plena, plana e vertical.

3.4 PRINCIPAIS ASPECTOS CONSIDERADOS EM ESTUDOS NUMÉRICOS RECENTES DE TÚNEIS

A rigor o estado e evolução do campo de tensões e deformações durante e após a escavação de um túnel irá depender dos seguintes fatores:

- a) **Comportamento dos materiais:** propriedades hidro-mecânicas e reológicas do maciço e do revestimento;
- b) **Condições geológicas:** estado de tensões *in situ*, heterogeneidade e grau de anisotropia do maciço bem como orientação, forma e comportamento das descontinuidades no seu interior, presença e fluxo de água, poro-pressão e movimentos sísmicos;
- c) **Interações com estruturas próximas:** fundações de edifícios, assentamentos superficiais, encontro com galerias, proximidade de outros túneis e sistemas subterrâneos;
- d) **Aspectos construtivos:** forma da seção transversal, velocidade de escavação, técnicas de pré-suporte, instante da instalação do revestimento e a distância não revestida durante o avanço da escavação.

Além desses fatores, como a trajetória das tensões próxima à face de escavação é tridimensional, envolvendo um bulbo de descompressão, túneis são estruturas rigorosamente tridimensionais.

Dentre as abordagens mais gerais que buscam prever o comportamento dos túneis, frente a todos esses fatores, estão as **teóricas-experimentais derivadas da mecânica do contínuo**. Contudo, as **soluções analíticas** dos modelos derivados dessa abordagem, apesar de úteis no entendimento do fenômeno e verificação numérica, são também limitadas a uma série de hipóteses simplificativas, tais como, domínio infinito, maciço isotrópico e homogêneo, seção circular, estado plano de deformações, ausência da interação entre o maciço e o revestimento, bem como leis constitutivas mais simples. Em vista disso, para contornar essas limitações, desde a década de 60, cada vez mais vem se utilizando **soluções numéricas** que agregam mais generalidades. E nas últimas décadas, com a ampliação da capacidade de computação, tem-se aumentado os estudos considerando o aspecto tridimensional dessas estruturas. Pode-se dizer que as soluções numéricas ganharam espaço frente às analíticas justamente devido à capacidade de incorporar todos os fatores listados

acima. E, dentre os métodos numéricos, o mais difundido e utilizado é o **método dos elementos finitos**. Os desenvolvimentos numéricos e aplicações recentes geralmente consideraram um ou mais dentre os seguintes aspectos:

- a) **simulação do processo construtivo:** procuram considerar a influência da construção de uma forma realista através da ativação e desativação dos elementos finitos, onde a cada ciclo construtivo é feita uma análise desativando-se os elementos que correspondem a região escavada do maciço e ativando-se aqueles referentes ao revestimento. Exemplos recentes podem ser encontrados na grande maioria de estudos que consideram a interação entre o maciço e o revestimento, tais como: Zhong et al. (2016) e Quevedo (2017);
- b) **simulação de um domínio espacial complexo:** modelos em geral tridimensionais, que procuram incorporar a influência da frente de escavação, da intersecção com galerias ou da presença de túneis próximos como, por exemplo, Chakeri et al. (2011), Do et al. (2014) e ainda, quando se trata de túneis superficiais, assentamentos na superfície e interação com estruturas da superfície como, por exemplo, Augarde e Burd (2001), Burd et al. (2000), Mroueh e Shahrour (2003), Xin e Zengrong (2009) e Ferrão, Jensen e Bernaud (2020);
- c) **comportamento dos materiais:** procuram implementar e estudar a influência de diversas leis constitutivas, tanto para o maciço quanto para o revestimento. Nesse item os mais variados aspectos do maciço e do revestimento são frequentemente abordados. Leis constitutivas elásticas, elastoplásticas perfeitas, com amolecimento, como em Purwodihardjo e Cambou (2003); viscoelásticas, tais como encontradas em Quevedo (2017); viscoplásticas, conforme Bernaud (1991), Roateşti (2014) e Quevedo (2017); ou ainda, viscoplásticas com fator de dano como em Pellet e Roosefid (2007) são apenas alguns poucos exemplos. Pode-se ter ainda leis que consideram acoplamento hidro-mecânico como em Chan e Ou (2008) e Leem e Kemeny (1999) bem como leis empíricas ou parâmetros de danos diretamente sobre as propriedades dos materiais, como em Schweiger, Marcher e Schädlich (2014) para considerar o comportamento diferido;
- d) **influência do pré-suporte e do revestimento primário:** estudos que tentam incorporar os efeitos causados pelos elementos e técnicas que servem para estabilizar a cavidade antes e durante a escavação como, por exemplo, tirantes frontais, enfilagens, congelamento, escavação parcializada e iteração com o escudo da tuneladora. Nesses estudos, os elementos físicos de pré-suporte podem ser incorporados de forma discreta (o que exige malhas bastante refinadas), incorporada no interior do elemento finito ou introduzida na lei constitutiva do maciço de forma homogeneizada. Essa

última abordagem é utilizada, por exemplo, por Bernaud et al. (2009) e Couto (2011) para considerar tirantes radiais e frontais.

- e) **problemas dinâmicos:** estudos que tem por finalidade implementar e estudar os efeitos das vibrações induzidas por trem, explosões na proximidade ou sismos como, por exemplo, em Chan e Ou (2008).
- f) **métodos numéricos alternativos:** embora o método dos elementos finitos seja o mais difundido, existem outros métodos de solução numérica como o das diferenças finitas e o método dos elementos de contorno. Outras abordagens menos convencionais também são utilizadas como o método das redes neurais, como, por exemplo, Shi, Ortigao e Bai (1998) e métodos discretos, como em Maynar e Rodríguez (2005). Uma revisão mais completa de diversos modelos e métodos numéricos utilizados em mecânica das rochas pode ser encontrada em Jing (2003).

A presente tese estará focada apenas nos três primeiros itens acima, sendo o terceiro item o de maior interesse, devido a modelagem da lei constitutiva elastoplástica-viscoplástica do maciço.

4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TÚNEIS

4.1 INFLUÊNCIA DA ESCAVAÇÃO E O CONCEITO DE CONVERGÊNCIA DA SEÇÃO

De uma forma geral, do ponto de vista do maciço, a escavação de um túnel nada mais é do que uma perturbação no seu estado natural de equilíbrio devido à remoção de parte do maciço. Essa perturbação induzirá o maciço a uma nova configuração de equilíbrio que mobilizará tensões tangenciais desviando, dessa forma, a direção das tensões principais no entorno da escavação. Através desse **arqueamento das tensões**, o próprio maciço participa da sustentação da cavidade. Esse arqueamento pode ser decomposto em dois arcos longitudinais (contidos nos planos horizontal e vertical) e um arco transversal (no plano perpendicular ao eixo do túnel), tal como mostrado na Figura 4.1.

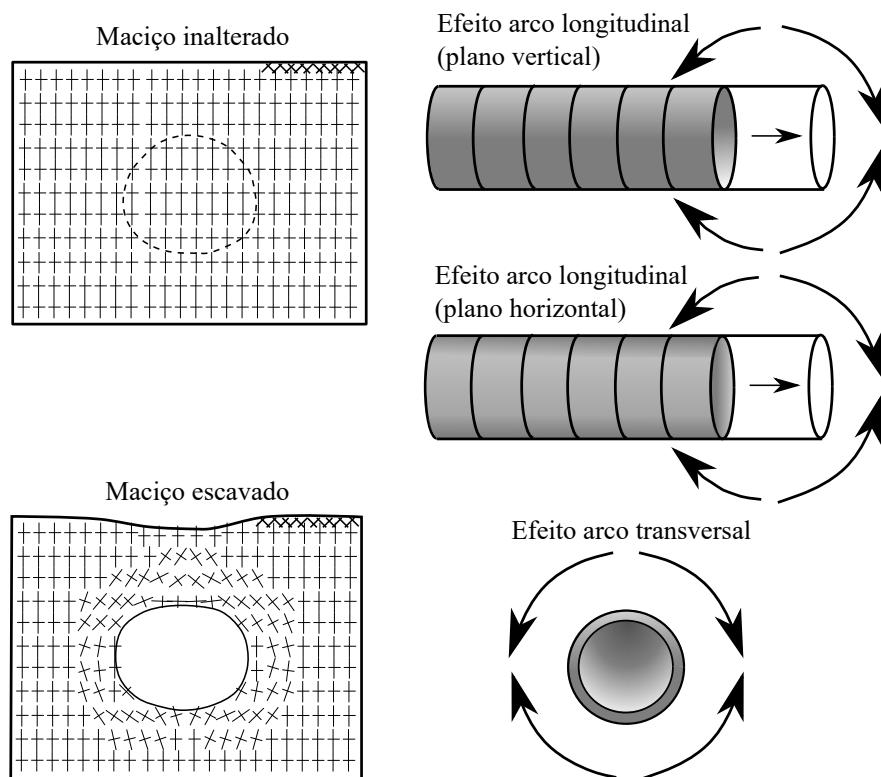


Figura 4.1 – Ilustração do arqueamento das tensões principais (adaptado de: França (2006, p. 10-11))

A presença dos três arcos na zona que acompanha a frente de escavação faz com que essa região tenha um campo de deslocamentos tridimensional convergente em direção à face de escavação.

No entanto, conforme essa frente avança e se afasta, apenas o arqueamento transversal se mantém, fazendo com que o campo de deslocamentos seja bidimensional contido no plano transversal ao eixo do túnel. Em vista disso, é conveniente caracterizar três zonas no interior do maciço: uma zona não perturbada pela escavação, uma zona de influência da frente de escavação e uma zona livre dessa influência (Figura 4.2).

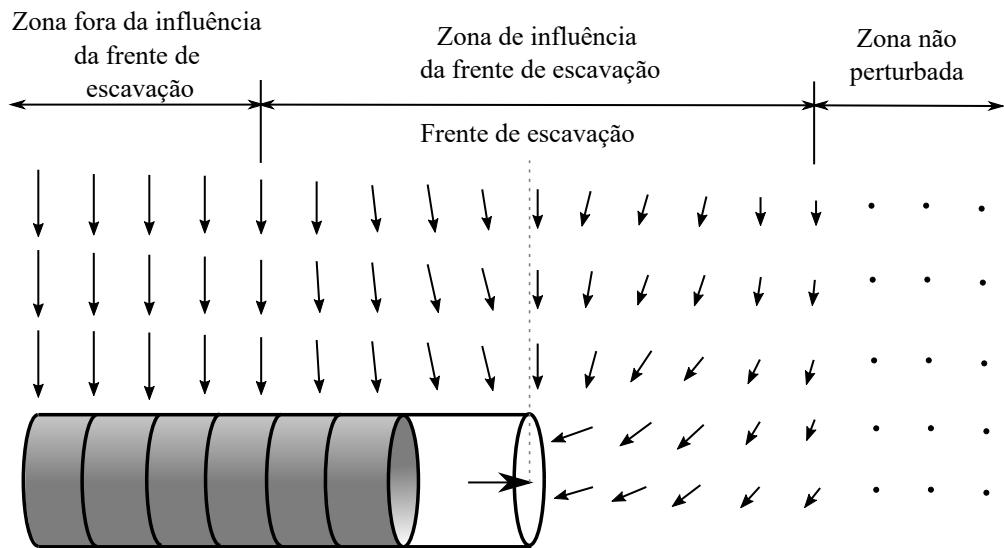


Figura 4.2 – Campo vetorial de deslocamentos no maciço durante a escavação de um túnel (adaptado de: França (2006, p. 12))

O parâmetro geométrico mais simples e representativo do comportamento de um túnel é o fechamento de sua cavidade, também conhecido como **convergência**. Se um túnel circular estiver em um maciço homogêneo, isotrópico, submetido a um estado de tensões inicial geostático hidrostático, o campo de deslocamentos no entorno de uma seção fora da zona de influência da frente de escavação estará contido no plano transversal e será puramente radial, podendo ser expresso por uma função $u(r)$. Nesse caso, a convergência U é definida pela razão entre o deslocamento da cavidade e seu raio inicial $U = -u(r = R)/R$. A presença do sinal negativo é opcional e serve para que a convergência fique positiva se a seção diminuir, ou seja, $u(R) < 0$ (Figura 4.3).

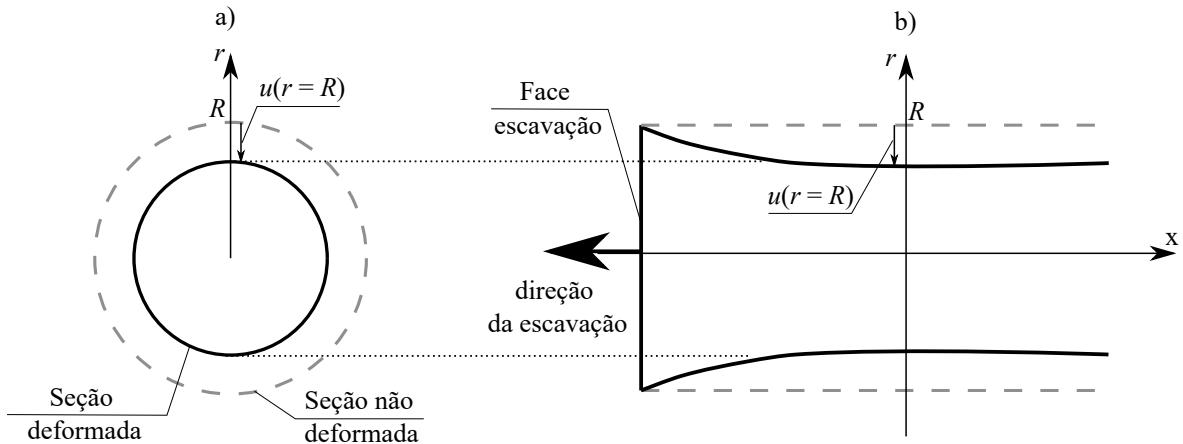


Figura 4.3 – Ilustração das medidas geométricas que compõe a convergência de uma seção circular: a) corte transversal, b) corte longitudinal

Dependendo da anisotropia das tensões *in situ* ou do formato da seção, sua deformada pode não ser radial e, na prática, podem-se usar varias medidas para compor o cálculo da convergência da seção, como exemplificado na Figura 4.4.

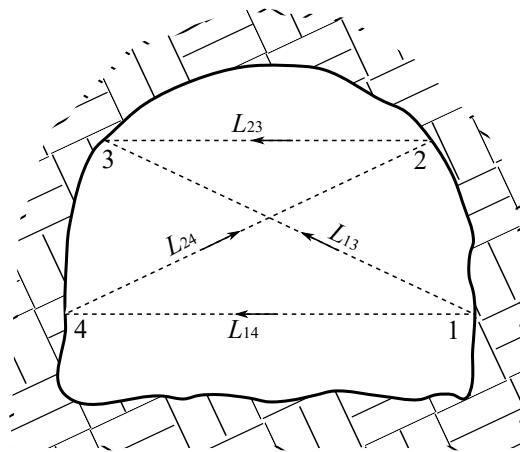


Figura 4.4 – Medidas da convergência em quatro direções de uma seção não circular (adaptado de: Panet (1995, p. 8))

Outro aspecto importante para determinar a influência da escavação e caracterizar o comportamento global do túnel é a representação gráfica das convergências ao longo do seu eixo longitudinal, conhecida como **perfil de convergências**. Por exemplo, com o objetivo de quantificar a extensão da zona de influência da frente da escavação, Hanafy & Emery (1980) graficaram o perfil de convergências do seu modelo de um túnel circular em um maciço homogêneo, isotrópico e elástico linear (Figura 4.5).

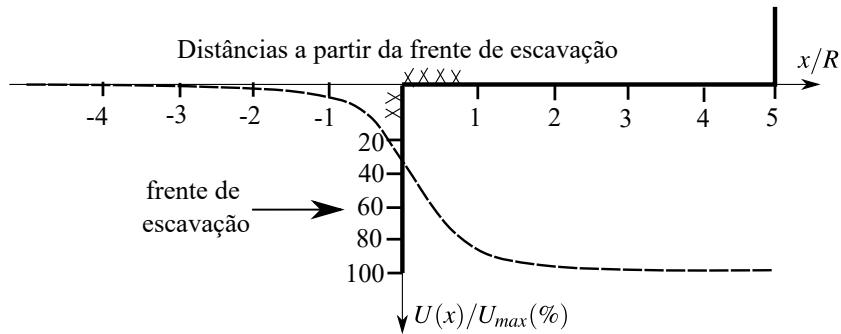


Figura 4.5 – Perfil de convergências próximo à frente de escavação (adaptado de: Hanafy e Emery (1980) *apud* Couto (2011, p. 42))

Como se pode ver na Figura 4.5, dentro das hipóteses dos autores, a partir de cinco raios da face de escavação a convergência atinge seu valor máximo U_{max} . Já na face, em $x/R = 0$, a convergência é superior à 35% do valor máximo, sendo que a um raio de distância a convergência é de aproximadamente 80% da total e quase 100% se tiver ultrapassado dois raios (Hanafy e Emery (1980) *apud* Couto (2011, p. 42)).

4.2 MECANISMOS DE RUPTURA EM TÚNEIS PROFUNDOS

A execução de túneis se tornou bastante segura após os preceitos filosóficos e teóricos do método empírico NATM (*New Austrian Tunneling Method*) desenvolvido por Rabcewicz (1964a, 1964b e 1965) e Rabcewicz e Golser (1973). E cada vez mais os estudos numéricos vêm ajudando os projetistas na tomada de decisões seguras durante a fase de projeto e execução. Contudo, apesar dessa abordagem empírica e numérica ter diminuído significativamente o número de incidentes estes ainda existem. Compilados de acidentes podem ser encontrados em estudos da Health and Safety Executive (HSE) (1996) e de pesquisadores como Stallmann (2005), Seidenfuß (2006) e Sousa (2010), tal como reunido por Špačková (2012) na Figura 4.6.

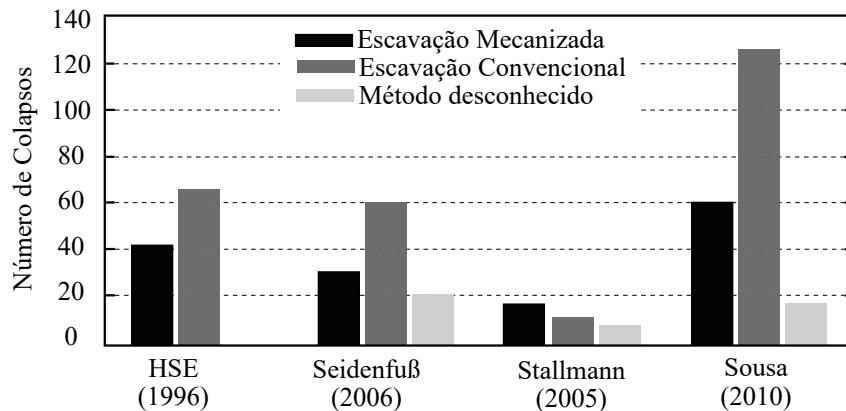


Figura 4.6 – Número de incidentes em quatro banco de dados descriptivados por autor e método de escavação (adaptado de: Špačková (2012, p. 19))

Sousa (2010), por exemplo, agrupou os incidentes, tanto de túneis profundos como superficiais, em nove tipos, tal como apresentado na Figura 4.7.

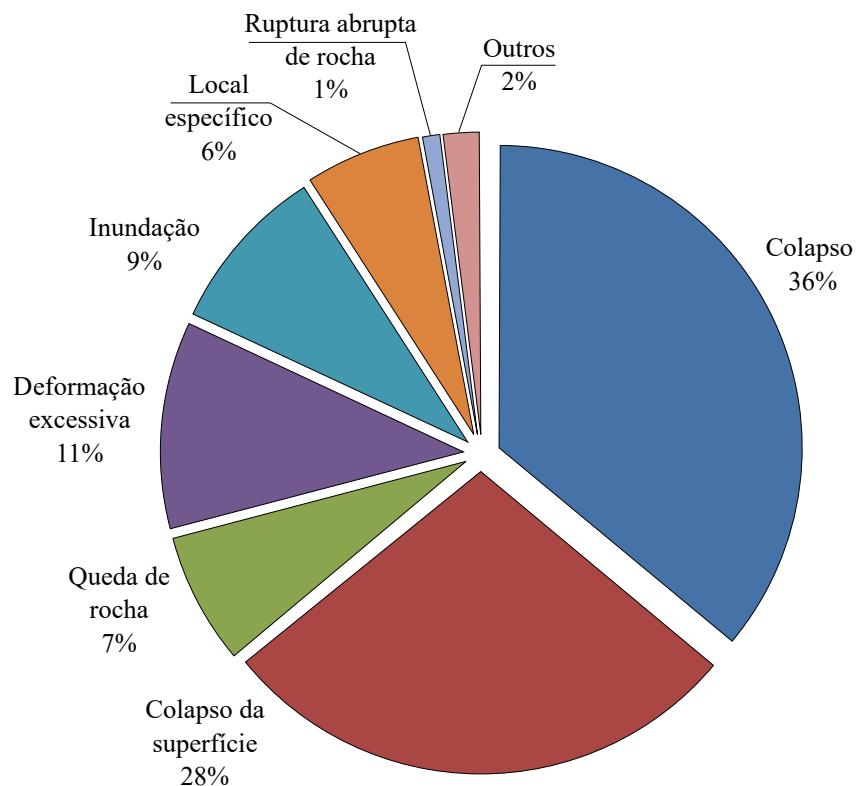


Figura 4.7 – Distribuição de incidentes de acordo com nove tipologias (adaptado de: Sousa (2010, p. 82))

Contudo, de forma geral, no comportamento de túneis profundos executados em maciços aparentemente contínuos, ou seja, ausência de grandes descontinuidades ou acidentes geológicos,

identifica-se dois mecanismos principais de colapso (ou ruptura): *Spalling* (descamação ou fragmentação) e *Squeezing* (deformações excessivas diferidas no tempo).

O *Spalling* é preponderante em maciço muito resistente, inicialmente pouco fraturado, no qual o nível de energia para iniciar a fissuração e consequente propagação costuma ser alto. Durante a redistribuição das tensões, causada pela escavação, as fissuras vão se desenvolvendo e destacando regiões da rocha no contorno da seção. Essas sofrem então uma descamação, ou ainda, ruptura por flambagem e tem-se, nesse último caso, uma repentina liberação de energia. Uma ruptura abrupta da rocha (*rockburst*). Esse comportamento é refletido na curva tensão-deformação de uma amostra do maciço, por um significativo amolecimento após o pico de resistência, caracterizando, dessa forma, a rocha como frágil (KLEINE, 2007, p. 83). A Figura 4.8 exemplifica esse mecanismo e a Figura 4.9 mostra a seção após tal colapso.

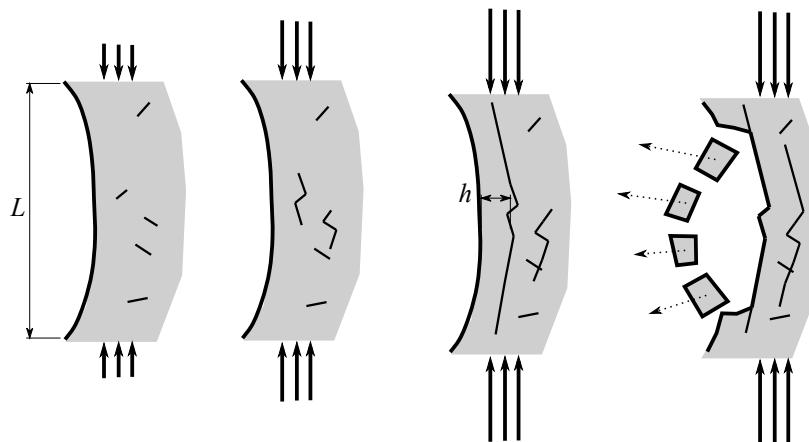


Figura 4.8 – Mecanismo de ruptura por *Spalling* de um comprimento L junto à seção do túnel: detalhamento do crescimento das fissuras e flambagem de uma profundidade h da rocha no contorno da seção (adaptado de: Germanovich e Dyskin (2000, p. 267))

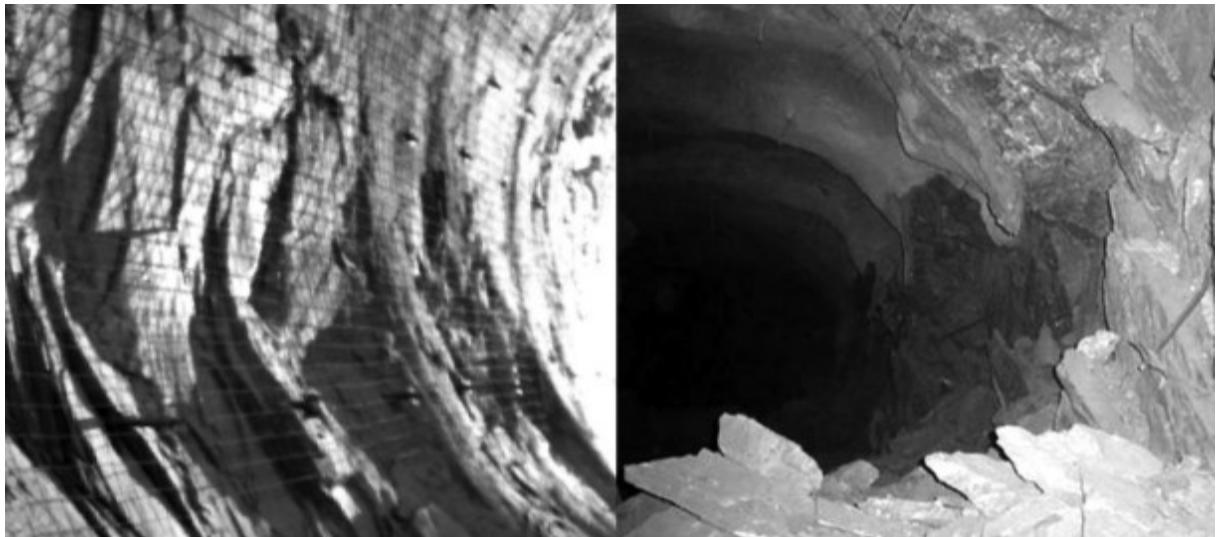


Figura 4.9 – À esquerda uma seção remanescente após moderada fragmentação e quebra em um túnel escavado com TBM e à direita uma seção em que parte do contorno apresentou instabilidade (flambagem) em um túnel escavado de forma não mecanizada (fonte: Diederichs (2007, p. 1084))

Já o *Squeezing* é um modo de falha relacionado ao cisalhamento e encontrado principalmente em túneis profundos em condições de grandes tensões *in situ*. Inicia-se quando a fissuração está suficientemente avançada, causando uma diminuição nas propriedades mecânicas do maciço, sem gerar instabilidade no contorno da seção. Essa diminuição das características mecânicas associada ao desenvolvimento da fissuração é progressiva e controlada, em especial, devido ao confinamento que reina no maciço. Ao contrário do primeiro mecanismo, a energia armazenada pela redistribuição das tensões é dissipada de forma gradual por deformações. Esse comportamento está intimamente relacionado com o fenômeno de fluência descrito na próxima seção a qual comprehende um dos comportamentos que se pretende modelar e estudar nessa tese.

A Figura 4.10 ilustra a evolução da convergência por esse fenômeno. Tal comportamento também é visto em galerias para estocagem de rejeitos radioativos em maciços argilosos profundos. Essas argilas possuem baixa condutividade hidráulica, portanto, pouca difusão molecular, sendo ideais para estocar esse material. Porém, apresentam esse comportamento diferido e que pode comprometer o projeto no longo tempo requerido para estabilização desse material radioativo. Estudos como os de Rousset (1988) e Armand et al. (2013) são alguns exemplos de investigações nesse sentido. Laboratórios como o HADES na Bélgica e *Meuse/Haute-Marne* (Figura 4.11) em Paris, são exemplos de túneis para estocagem radioativa que apresentam esse fenômeno.

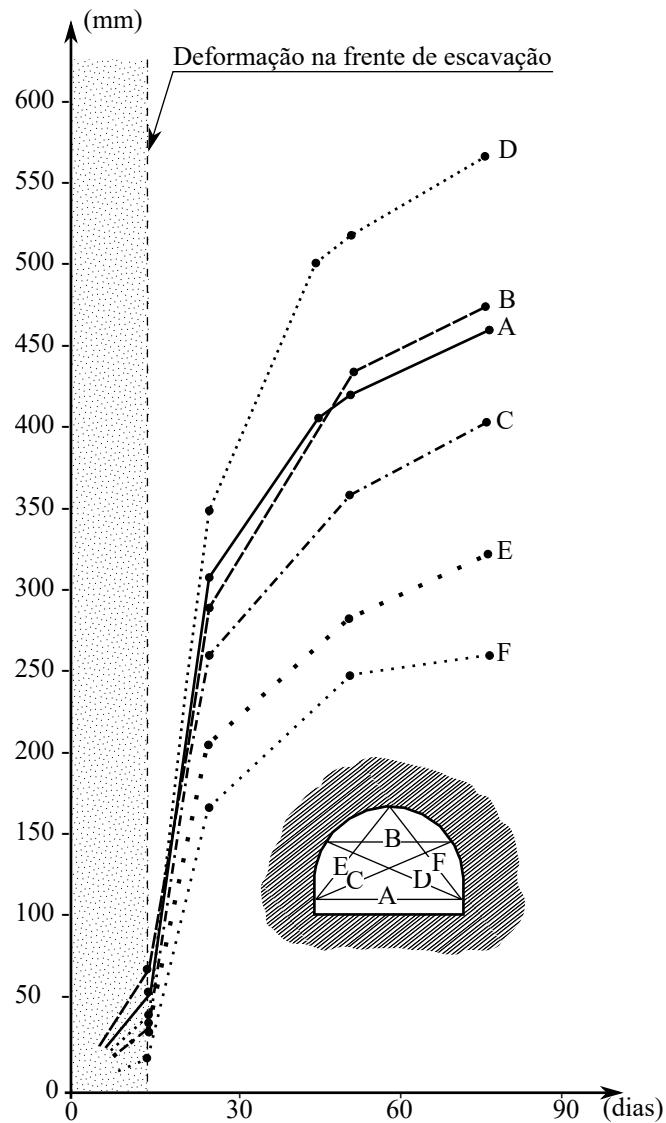


Figura 4.10 – Evolução da convergência do túnel Fréjus (adaptado de: Lunardi (1980, p. 17))

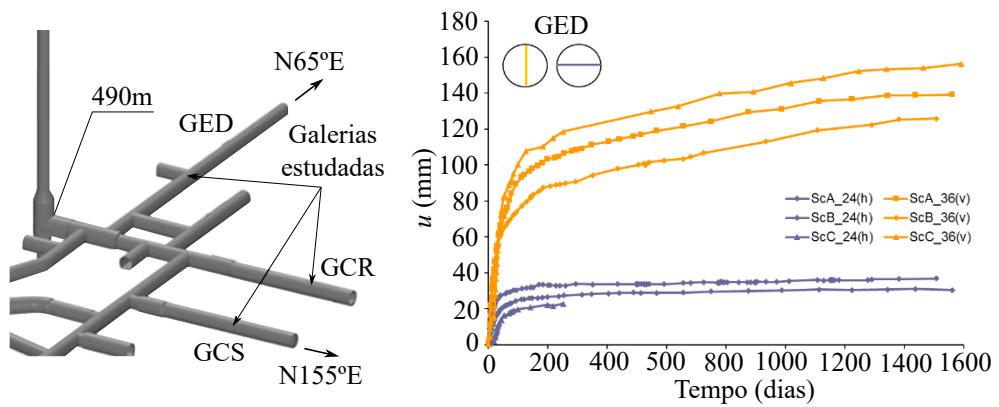


Figura 4.11 – Evolução do fechamento da seção GED (convergência) na galeria do laboratório *Meuse/Haute-Marne* (adaptado de: Guayacán-Carrillo et al. (2016, p. 103))

4.3 INFLUÊNCIA DA REOLOGIA DO MACIÇO

4.3.1 Comportamento instantâneo

Para caracterizar o comportamento de curto prazo do maciço, o ensaio triaxial associado à medição da variação do volume é comumente utilizado. Esse ensaio clássico na mecânica das rochas permite estudar as diferentes fases do comportamento: elástica, plástica, ruptura e pós ruptura. As medidas da variação do volume permitem fazer estudos de outros aspectos do comportamento, como o coeficiente de Poisson e a dilatância. Esse ensaio, de forma resumida, consiste em submeter uma amostra cilíndrica do maciço a um estado de tensões triaxial hidrostático e, após atingido esse estado, leva-lá à ruptura através do aumento da carga axial (o desviador). Rousset (1988), por exemplo, caracterizou o comportamento de curto prazo de maciços argilosos profundos em frágil (argila rígida) e dúctil (argila plástica). Um maciço rígido pode ser visto na Figura 4.12.

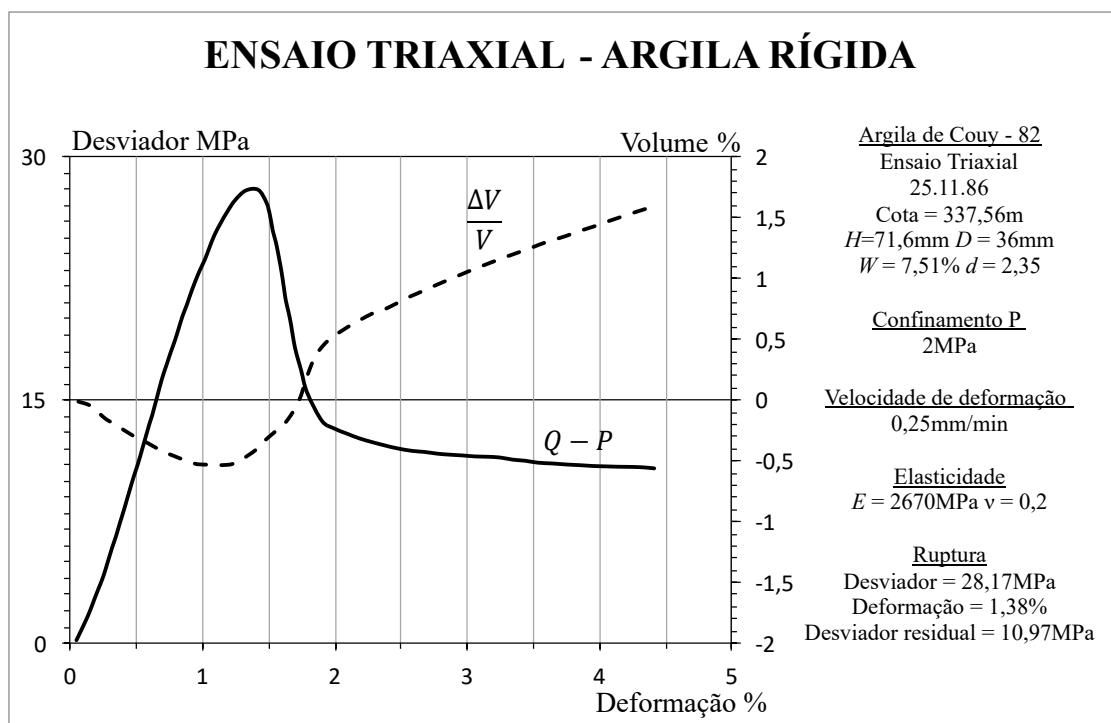


Figura 4.12 – Ensaio triaxial com medição da variação do volume para o caso de uma argila rígida (adaptado de: Rousset (1988, p. 35))

No comportamento da Figura 4.12 pode-se destacar as seguintes fases (ROUSSET, 1988, p. 34):

- fase elástica** ($0 \leq \epsilon \leq 0,8\%$): o comportamento do maciço é linear elástico e, ao mesmo tempo, o volume da amostra diminui linearmente, os dois parâmetros

elásticos, módulo de Young e Poisson, são facilmente obtidos;

- b) **fase pré-ruptura** ($0,8\% \leq \varepsilon \leq 1,3\%$): o desviador continua aumentando, mas a curva $Q - P$ não é mais linear, indicando que fenômenos irreversíveis passam a ocorrer. Ao mesmo tempo, a taxa de redução do volume diminui. Nessa fase também pode-se notar que os fenômenos irreversíveis ocorrem primeiro na curva $\Delta V/V$, em torno de 0,8% da deformação enquanto o desviador é de 65% do seu valor máximo e sua dependência ainda é linear;
- c) **fase de ruptura** ($1,3\% \leq \varepsilon \leq 1,6\%$): o desviador cai acentuadamente, o que reflete a fragilidade do comportamento dessa argila. Enquanto isso, o volume da amostra aumenta drasticamente;
- d) **fase pós-ruptura** ($1,6\% \leq \varepsilon \leq 5\%$): o desviador evolui pouco e mantém um valor residual de 40% do desvio máximo. Esta resistência residual ocorre pelo atrito ao deslizamento na superfície de ruptura que apareceu durante o carregamento. Nessa fase, o volume da abertura aumenta muito, o que reflete o comportamento altamente dilatante do material (2% superior ao volume original na deformação de 5%).

Já para um maciço argiloso dúctil, o comportamento é diferente, tal como mostrado na Figura 4.13.

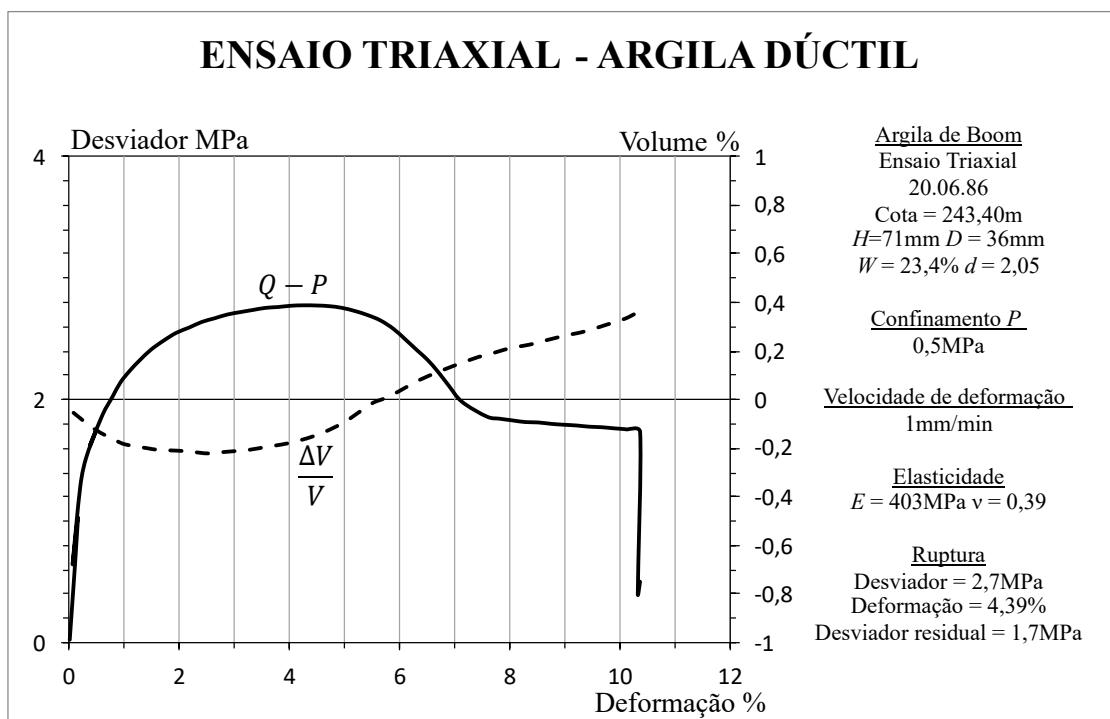


Figura 4.13 – Ensaio triaxial com medição da variação do volume para o caso de uma argila dúctil (adaptado de: Rousset (1988, p. 35))

No comportamento da Figura 4.13 pode-se destacar as seguintes fases (ROUSSET, 1988, p. 35):

- a) **fase elástica** ($0 \leq \varepsilon \leq 0,3\%$): pode-se ver que para esse caso, onde ambas as curvas são lineares, é uma fase muito pequena;
- b) **fase plástica com endurecimento** ($0,3\% \leq \varepsilon \leq 2\%$): durante essa fase o desviador continua a aumentar, mas a uma taxa decrescente. Da mesma forma, a redução do volume também teve sua taxa diminuída, mas o comportamento segue ainda de contração;
- c) **fase plástica perfeita** ($2\% \leq \varepsilon \leq 5\%$): o desviador agora segue quase constante e o volume da amostra acompanha o comportamento. Essa fase conduz a uma deformação significativa, superior a 5%;
- d) **fase plástica com amolecimento** ($5\% \leq \varepsilon \leq 8\%$): a resistência da amostra diminui gradualmente até um platô residual e o volume começa a aumentar;
- e) **fase plástica residual** ($8\% \leq \varepsilon \leq 10\%$): o desviador é agora novamente constante, cerca de 60% do valor máximo. O volume da amostra aumenta sensivelmente tendo uma dilatância moderada.

Para um maciço homogêneo, isotrópico e elástico linear a solução analítica para o campo de deslocamentos e tensões no entorno de uma seção circular afastada da zona de influência da face de escavação é conhecida desde Lamé (1852) e Kirsch (1898), sendo que este último generalizou a solução para um estado de tensões *in situ* anisotrópico.

Contudo, como visto nas figuras acima, a massa rochosa não é um material perfeitamente elástico e dependendo da magnitude das tensões *in situ* e do desvio das tensões causada pela escavação, o túnel pode apresentar uma zona plastificada ao redor da cavidade. Quando a seção é circular, o maciço homogêneo, isotrópico, elastoplástico, com tensões iniciais geostáticas-hidrostáticas, essa zona plástica é circular e caracterizada por um raio plástico y . Figura 4.14 ilustra a solução analítica de um maciço elástico e um elastoplástico. Apesar de a solução depender da forma da lei constitutiva elastoplástica, em geral, para túneis não revestidos, há uma diminuição nas tensões ao redor da cavidade e um aumento na convergência.

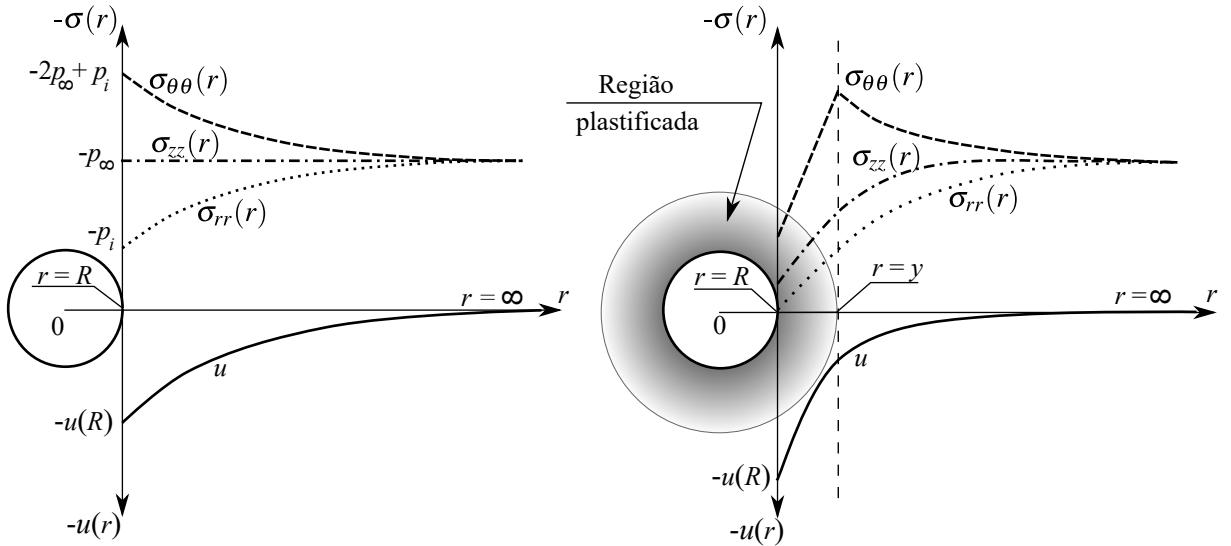


Figura 4.14 – Deslocamentos e tensões no entorno de uma seção circular submetida às tensões iniciais geostáticas-hidrostáticas p_∞ e pressão interna p_i . À esquerda, maciço elástico e à direita, elastoplástico.

Algumas soluções analíticas considerando leis elastoplásticas específicas para túneis não revestidos podem ser encontradas, por exemplo, em Salençon (1969), Hoek e Brown (1980), Brown et al. (1983), Detournay e Fairhurst (1987), Carranza-Torres e Fairhurst (1999), Carranza-Torres (2004), Sharan (2003), Sharan (2005) e Alejano et al. (2009).

Um dos objetivos desta tese é justamente implementar um algoritmo geral para considerar esse comportamento instantâneo elastoplástico conjuntamente com o fenômeno diferido no tempo.

4.3.2 Comportamento diferido no tempo

O comportamento viscoso do maciço, caracterizado pela deformação contínua no tempo, mesmo sobre tensão e temperatura constantes, é denominado **fluênci** (*Creep*). E ocorre devido aos deslizamentos no interior do maciço ou ainda por transporte e difusão de massa fluída. Em solos argilosos com condições drenadas, parte da fluênci é dada conjuntamente com a dissipação de poro-pressão. Em maciços rochosos, com pouca umidade, essa condição está bastante relacionada com o avanço de trincas e fissuras sobre grande confinamento. Esse comportamento é geralmente caracterizado através de um ensaio triaxial de fluênci com uma amostra do maciço. Nesse teste, sobre condições de temperatura e umidade controladas, registram-se as deformações axiais da amostra temporalmente, mantendo-se uma pressão hidrostática e um dado desviador constante. Dessa forma, tem-se a curva típica apresentada na Figura 4.15.

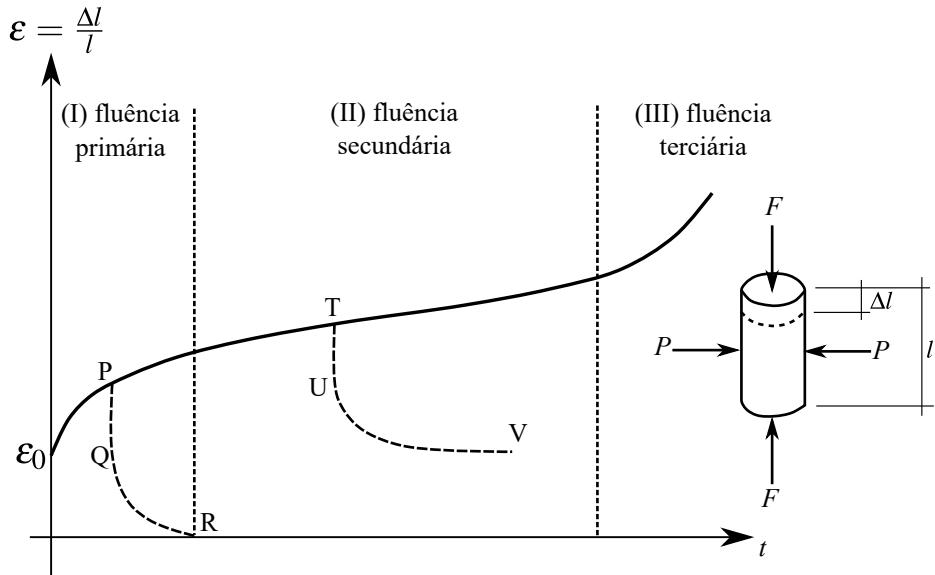


Figura 4.15 – Curva característica em um ensaio de fluência com os três estágios de comportamento (adaptado de: Costa (1984, p. 107))

Conforme pode-se ver na figura acima, no instante de aplicação da carga axial o corpo de prova sofre uma deformação instantânea inicial ϵ_0 elástica ou, dependendo do nível das tensões, elastoplástica. Conforme o tempo avança as deformações continuam aumentando, porém, a uma taxa decrescente. Esse estágio é chamado de **fluência primária** (ou transitente), pois em seguida a taxa de deformação diminui até ficar constante iniciando dessa forma o segundo estágio chamado de **fluência secundária** (permanente ou estacionária). Após essa fase, que pode consumir a maior parte do tempo, as deformações podem evoluir para o terceiro estágio chamado de **fluência terciária** (instável), onde a taxa de deformação passa a aumentar até que o material atinge a ruptura (COSTA, 1984). Contudo, dependendo do nível das tensões, nem sempre a amostra apresenta os três estágios, podendo, inclusive, haver uma estabilização das deformações no tempo.

Além desses estágios de comportamento citados, a recuperação das deformações é outro fenômeno característico de materiais em regime de fluência. Se durante a fluência primária for retirado a carga F o corpo recuperará a sua configuração original seguindo a trajetória PQR, sendo o trecho PQ uma recuperação rápida e instantânea e o trecho QR uma recuperação lenta, assintótica e completa (salvo se houverem deformações plásticas durante o carregamento). Nesse caso, em que a recuperação é completa, o maciço está em regime viscoelástico. Contudo, se a descarga for feita no segundo estágio, haverá o mesmo comportamento instantâneo (trecho TU) e assintótico (trecho UV), mas a recuperação pode não ser mais completa. Nesse caso, evidencia-se o material comportando-se em seu regime viscoplastico (COSTA, 1984). Um exemplo típico desse ensaio pode ser visto na Figura 4.16

4.3.3 Alguns estudos considerando leis elastoplásticas e viscoplásticas

4.4 INFLUÊNCIA DA FORMA DA SEÇÃO

4.5 INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DO TÚNEL

4.6 INFLUÊNCIA DA PROXIMIDADE DA SUPERFÍCIE

4.7 INFLUÊNCIA DO REVESTIMENTO E PARÂMETROS ADIMENSIONAIS

4.8 MÉTODO CONVERGÊNCIA-CONFINAMENTO

5 MODELO MECÂNICO

- 5.1 EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO LOCAL E A HIPÓTESE DA EVOLUÇÃO QUASE ESTÁTICA
- 5.2 ADMISSIBILIDADE ESTÁTICA, NATUREZA EULERIANA DO CAMPO DE TENSÕES, TRANSFORMAÇÃO GEOMÉTRICA E MEDIDA DE DEFORMAÇÃO
- 5.3 HIPÓTESE DAS PEQUENAS PERTURBAÇÕES E A DESCRIÇÃO LAGRANGEANA
- 5.4 MODELO CONSTITUTIVO ELÁSTICO
- 5.5 MODELO CONSTITUTIVO ELASTOPLÁSTICO
- 5.6 MODELO CONSTITUTIVO VISCOPLÁSTICO
- 5.7 MODELO CONSTITUTIVO ELASTOPLÁSTICO-VISCOPLÁSTICO

6 SOLUÇÃO DO MODELO MECÂNICO

6.1 FORMA FRACA DAS EQUAÇÕES DE CAMPO

6.2 NOTAÇÃO DE VOIGT

6.3 DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL EM ELEMENTOS FINITOS

6.4 SOLUÇÃO DO SISTEMA E DISCRETIZAÇÃO TEMPORAL

6.5 ALGORITMO DE ATUALIZAÇÃO DAS TENSÕES E VARIÁVEIS INTERNAS

6.5.1 Integração das equações constitutivas elastoplásticas

6.5.1.1 Esquema de integração totalmente implícito

6.5.1.2 Esquema de integração semi-implícito

6.5.2 Atualização do módulo constitutivo

6.5.3 Particularizando para estado plano de deformações e axissimetria

6.5.4 Domínios, discretização, condições de contorno e ciclo construtivo para os modelos de verificação

REFERÊNCIAS

- ALEJANO, L. R.; RODRIGUEZ-DONO, A.; ALONSO, E.; FDEZ.-MANÍN, G. Ground reaction curves for tunnels excavated in different quality rock masses showing several types of post-failure behaviour. **Tunnelling and Underground Space Technology**, Pergamon, v. 24, n. 6, p. 689–705, nov 2009. ISSN 08867798. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779809000686>>. Acesso em: 24 mar. 2021. Citado na página 52.
- ARMAND, G.; NOIRET, A.; ZGHONDI, J.; SEYEDI, D. M. Short- and long-term behaviors of drifts in the Callovo-Oxfordian claystone at the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, Chinese Academy of Sciences, v. 5, n. 3, p. 221–230, jun 2013. ISSN 16747755. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775513000395>>. Acesso em: 24 mar. 2021. Citado na página 47.
- AUGARDE, C. E.; BURD, H. J. Three-dimensional finite element analysis of lined tunnels. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 25, n. 3, p. 243–262, 2001. ISSN 03639061. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/nag.127>>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.
- BARLA, G.; BONINI, M.; DEBERNARDI, D. Time dependent deformations in squeezing tunnels. **International Journal of Geoengineering Case Histories**, v. 2, n. 1, p. 40–65, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4417/IJGCH-02-01-03>>. Acesso em: 09 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 22.
- BERNAUD, D. **Tunnels profonds dans les milieux viscoplastiques: approches expérimentale et numérique**. 354 p. Tese (Doutorado) — Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1991. Disponível em: <<https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00529719>>. Acesso em: 11 mar. 2021. Citado na página 39.
- BERNAUD, D.; MAGHOUS, S.; BUHAN, P. de; COUTO, E. A numerical approach for design of bolt-supported tunnels regarded as homogenized structures. **Tunnelling and Underground Space Technology**, Elsevier Ltd, v. 24, n. 5, p. 533–546, 2009. ISSN 08867798. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2009.02.002>>. Acesso em: 18 mar. 2021. Citado na página 40.
- BROWN, E. T.; BRAY, J. W.; LADANYI, B.; HOEK, E. Ground Response Curves for Rock Tunnels. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 109, n. 1, p. 15–39, 1983. ISSN 0733-9410. Disponível em: <[https://sci-hub.do/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:1\(15\)](https://sci-hub.do/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:1(15))>. Acesso em: 24 mar. 2021. Citado na página 52.
- BROX, D. **Practical Guide to Rock Tunneling**. London: CRC Press Taylor e Francis Group, 2017. 274 p. ISBN 9781315210117. Citado na página 33.
- BURD, H. J.; HOULSBY, G. T.; AUGARDE, C. E.; LIU, G. Modelling tunnelling-induced settlement of masonry buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering**, v. 143, n. 1, p. 17–29, 2000. ISSN 13532618. Disponível em:

<<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/full/10.1680/geng.2000.143.1.17>>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.

CARRANZA-TORRES, C. Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Elsevier BV, v. 41, n. SUPPL. 1, p. 1–11, may 2004. ISSN 13651609. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160904001583>>. Acesso em: 24 mar. 2021. Citado na página 52.

CARRANZA-TORRES, C.; FAIRHURST, C. The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Elsevier Science Ltd, v. 36, n. 6, p. 777–809, sep 1999. ISSN 01489062. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0148906299000479>>. Acesso em: 24 mar. 2021. Citado na página 52.

CHAKERI, H.; HASANPOUR, R.; HINDISTAN, M. A.; ÜNVER, B. Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 70, n. 3, p. 439–448, 2011. ISSN 14359529. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-010-0333-8>>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.

CHAN, A.; OU, J. Three-Dimensional Numerical Analysis of a Dynamic Structure, Saturated Soil and Pore Fluid Interaction Problem. In: PAPADRAKAKIS, M.; TOPPING, B. H. V. (Ed.). **Trends in Engineering Computational Technology**. Stirlingshire: Saxe-Coburg Publications, 2008. cap. 17, p. 335–353. Disponível em: <<https://www.ctresources.info/csets/chapter.html?id=18>>. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.

CHAPMAN, D.; METJE, N.; STÄRK, A. **Introduction to tunnel construction**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press Taylor e Francis Group, 2018. ISBN 9781315120164. Citado 4 vezes nas páginas 11, 33, 34 e 35.

COSTA, A. M. da. **Uma aplicação de métodos computacionais e princípios de mecânica das rochas no projeto e análise de escavações destinadas à mineração subterrânea**. 1488 p. Tese (Doutorado), 1984. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/teses-de-doutorado/128-1984/718-alvaro-maia-da-costa>>. Acesso em: 25 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 53.

COUTO, E. C. **Um modelo tridimensional para túneis escavados em rocha reforçada por tirantes passivos**. 141 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/38962/000822209.pdf?...1>>. Acesso em: 18 mar. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 12, 40 e 44.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM (SÃO PAULO). **Instrução de Projeto para elaboração de túneis subterrâneos (NATM)**. São Paulo, 2005. 52 p. Disponível em: <<http://www.portaldageotecnica.com.br/wp-content/uploads/2018/05/Projeto-de-T{ú}nel-Instruções-{~}{a}o-de->>. Acesso em: 11 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 36.

DETOURNAY, E.; FAIRHURST, C. Two-dimensional elastoplastic analysis of a long, cylindrical cavity under non-hydrostatic loading. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and**, Pergamon, v. 24, n. 4, p. 197–211, aug 1987. ISSN 01489062. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0148906287901756>>. Acesso em: 24 mar. 2021. Citado na página 52.

DIEDERICHS, M. S. The 2003 Canadian Geotechnical Colloquium: Mechanistic interpretation and practical application of damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 44, n. 9, p. 1082–1116, sep 2007. ISSN 0008-3674. Disponível em: <<http://www.nrcresearchpress.com/doi/10.1139/T07-033>>. Acesso em: 23 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 47.

DO, N. A.; DIAS, D.; ORESTE, P.; DJERAN-MAIGRE, I. Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground. **Tunnelling and Underground Space Technology**, Elsevier Ltd, v. 42, p. 40–51, 2014. ISSN 08867798. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2014.02.001>>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (U.S.). **Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels — Civil Elements**. Fhwa-nhi-1. Books Express Publishing, 2009. 702 p. ISBN 1782661727. Disponível em: <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/Tunnel/pubs/nhi09010/tunnel_manual.pdf>. Acesso em: 09 mar. 2021. Citado 5 vezes nas páginas 11, 12, 30, 35 e 37.

FERRÃO, W. C.; JENSEN, B. M.; BERNAUD, D. Numerical modeling of shallow tunnels: analysis of the surface settlements. In: **Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering**. Foz do Iguaçu: ABMEC, 2020. p. 7. ISSN 2675-6269. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/217231>>. Acesso em: 18 mar. 2021. Citado na página 39.

FRANÇA, P. T. **Estudo do comportamento de túneis: análise numérica tridimensional com modelos elasto-plásticos**. 185 p. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, aug 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-08122006-151549>>. Acesso em: 19 mar. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 12, 41 e 42.

GERMANOVICH, L.; DYSKIN, A. Fracture mechanisms and instability of openings in compression. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 37, n. 1-2, p. 263–284, jan 2000. ISSN 13651609. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1365160999001057>>. Acesso em: 23 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 46.

GRAD, P. **Pioneering drill+blast work in Hong Kong - TunnelTalk**. 2013. 1 p. Disponível em: <<https://www.tunneltalk.com/Hong-Kong-4Dec2013-Pioneering-double-deck-blasting-method-for-successful-South-Island-Line-drill-blast-excavation.php>>. Acesso em: 10 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 32.

GUAYACÁN-CARRILLO, L. M.; SULEM, J.; SEYEDI, D. M.; GHABEZLOO, S.; NOIRET, A.; ARMAND, G. Analysis of Long-Term Anisotropic Convergence in Drifts Excavated in Callovo-Oxfordian Claystone. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 49, n. 1, p. 97–114, 2016. ISSN 07232632. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00603-015-0737-7>>. Acesso em: 24 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 48.

HANAFY, E. A.; EMERY, J. J. Advancing face simulation of tunnel excavations and lining placement. In: **Canadian Rock Mechanics Symposium (Proceedings)**. [S.I.]: CIM, 1980. v. 18, n. 6, p. 119–125. ISSN 01489062. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 44.

Health and Safety Executive (HSE). **Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels: A review of sprayed concrete lined tunnels with particular reference to London clay**. [S.I.], 1996. 137 p. Disponível em: <<https://www.hse.gov.uk/pubns/natm.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2021. Citado na página 44.

HEINIÖ, M. **Rock Excavation Handbook.** [S.l.]: Sandvik Tamrock, 1999. 364 p. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 32.

HOEK, E.; BROWN, E. T. **Underground Excavations in Rock.** London: CRC Press, 1980. 532 p. ISBN 9781482288926. Disponível em: <<http://libgen.rs/book/index.php?md5=A31AA664D8C93E11BC9181B7A6C024FA>>. Acesso em: 24 mar. 2021. Citado na página 52.

JING, L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 40, n. 3, p. 283–353, 2003. ISSN 13651609. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160903000133>>. Acesso em: 18 mar. 2021. Citado na página 40.

KIRSCH, G. Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre. **Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure**, v. 42, p. 797–807, 1898. Citado na página 51.

KLEINE, A. **Modélisation numérique du comportement des ouvrages souterrains par une approche viscoplastique.** 313 p. Tese (Doutorado) — Institut National Polytechnique de Lorraine, Lorraine, nov 2007. Disponível em: <<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752829/document>>. Acesso em: 23 mar. 2021. Citado na página 46.

LAMÉ, G. **Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides.** Paris: Bachelier, 1852. 384 p. Disponível em: <<https://archive.org/details/leonssurlathori09lamgoog/page/n1/mode/2up>>. Acesso em: 24 mar. 2021. Citado na página 51.

LEEM, J.; KEMENY, J. Finite element micromechanical-based model for hydro-mechanical coupling. In: **The 37th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS).** OnePetro, 1999. Disponível em: <<https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA99/All-ARM-A99/ARMA-99-0153/130892>>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.

LUNARDI, P. Application de la mécanique des roches aux tunnels autoroutiers exemple des tunnels du Fréjus (côté Italie) et du Gran Sasso. **Revue Française de Geotechnique**, n. 12, p. 43, 1980. Disponível em: <<https://www.geotechnique-journal.org/articles/geotech/pdf/1980/03/geotech1980012p5.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 48.

MAIDL, B.; THEWES, M.; MAIDL, U. **Handbook of Tunnel Engineering Volume I : Structures and Methods.** 1. ed. Berlin: Wilhelm Ernst e Sohn, 2013. I. 455 p. ISBN 9783433030486. Citado na página 35.

MANCHAO, H.; Leal e Sousa, R.; MÜLLER, A.; VARGAS, E.; Ribeiro e Sousa, L.; XIN, C. Analysis of excessive deformations in tunnels for safety evaluation. **Tunnelling and Underground Space Technology**, Elsevier Ltd, v. 45, p. 190–202, jan 2015. ISSN 08867798. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2014.09.006>>. Acesso em: 09 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 22.

MAYNAR, M. J.; RODRÍGUEZ, L. E. Discrete Numerical Model for Analysis of Earth Pressure Balance Tunnel Excavation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 10, p. 1234–1242, 2005. ISSN 1090-0241. Disponível em: <[https://sci-hub.do/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:10\(1234\)](https://sci-hub.do/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1234))>. Acesso em: 18 mar. 2021. Citado na página 40.

MITTERNDORFER, K. H. **Roadheaders in Tunneling - Tunnel Business Magazine**. 2013. 1 p. Disponível em: <<http://tunnelingonline.com/roadheaders-tunneling/>>. Acesso em: 03 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 31.

MROUEH, H.; SHAHOUR, I. A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures interaction. **Computers and Geotechnics**, v. 30, n. 3, p. 245–253, 2003. ISSN 0266352X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266352X02000472>>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.

PANET, M. **CALCUL DES TUNNELS PAR LA MÉTHODE CONVERGENCE-CONFINEMENT**. [S.l.]: Presses De L'école Nationale Des Ponts Et Chaussees, 1995. 161 p. ISBN 2859782303. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 43.

PELLET, F. L.; ROOSEFID, M. Time dependent behavior of rock and practical implications to tunnel design. In: **Proc. 11th International Congress on Rock Mechanics, Lisboa, Portugal**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1079–1082. ISBN 9780415450843. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.

PIERRAT, C. **Las excavadoras sobre cadenas Liebherr R 944 C Tunnel impulsan el proyecto ferroviario «Stuttgart-Ulm»**. 2014. 1 p. Disponível em: <<https://www.liebherr.com/es/deu/actualidad/noticias-y-comunicados-de-prensa/detalle/las-excavadoras-sobre-cadenas-liebherr-r-944-c-tunnel-impulsan-el-proyecto-ferroviario-\T1\guillemotleftstuttgart-ulm\T1\guillemotright.html>>. Acesso em: 03 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 31.

PURWODIHARDJO, A.; CAMBOU, B. Effect of strain-softening on settlement due to tunnelling in soft soil. In: ROSENBAUM, M. S.; TURNER, A. K. (Ed.). **New Paradigms in Subsurface Prediction**. 99. ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. cap. 16, p. 173–188. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/3-540-48019-6_16>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.

QUEVEDO, F. P. d. M. **Comportamento a longo prazo de túneis profundos revestidos com concreto : modelo em elementos finitos**. 210 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/163886>>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.

RABCEWICZ, L. v. The New Austrian Tunnelling Method: part one. **Water Power**, v. 16, n. 11, p. 453–457, nov 1964. Disponível em: <<https://www.eoras.ubc.ca/courses/eosc547/lecture-material/Rabcewicz-NATM.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2021. Citado na página 44.

_____. The New Austrian Tunnelling Method: part two. **Water Power**, v. 16, n. 12, p. 511–515, dec 1964. Disponível em: <<https://www.eoras.ubc.ca/courses/eosc547/lecture-material/Rabcewicz-NATM.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2021. Citado na página 44.

_____. The New Austrian Tunnelling Method: part three. **Water Power**, v. 17, n. 1, p. 19–24, jan 1965. Disponível em: <<https://www.eoras.ubc.ca/courses/eosc547/lecture-material/Rabcewicz-NATM.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2021. Citado na página 44.

RABCEWICZ, L. v.; GOLSER, J. Principles of dimensioning the supporting system for the New Austrian Tunnelling Method. **Water Power**, v. 25, n. 3, p. 88–93, 1973. Citado na página 44.

RAMONI, M.; ANAGNOSTOU, G. Thrust force requirements for TBMs in squeezing ground. **Tunnelling and Underground Space Technology**, Elsevier Ltd, v. 25, n. 4, p. 433–455, 2010.

ISSN 08867798. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2010.02.008>>. Acesso em: 09 mar. 2021. Citado na página 23.

_____. Tunnel boring machines under squeezing conditions. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 25, n. 2, p. 139–157, 2010. ISSN 08867798. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tust.2009.10.003>>. Acesso em: 09 mar. 2021. Citado na página 23.

REYNOLDS, P. **Collapse and flooding delay progress in Iceland**. 2015. 1 p. Disponível em: <<https://tunneltalk.com/Iceland-17Jun2015-Vadlaheidi-road-tunnel-progressive-face-collapse-and-flood-delays-progress.php>>. Acesso em: 11 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 35.

ROADTRAFFIC-TECHNOLOGY. **Nordhavnsvej (Northern Harbour Link) Project, Copenhagen - Verdict Traffic**. 2017. Disponível em: <<https://www.roadtraffic-technology.com/projects/nordhavnsvej-northern-harbour-link-project-copenhagen/>>. Acesso em: 09 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 30.

ROATEŞI, S. Analytical and numerical approach for tunnel face advance in a viscoplastic rock mass. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 70, p. 123–132, 2014. ISSN 13651609. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.

ROUSSET, G. **Comportement Mecanique des Argiles Profondes: application au stockage de dechets radioactifs**. Tese (Doutorado) — L’Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, 1988. Citado 5 vezes nas páginas 13, 47, 49, 50 e 51.

SALENÇON, J. Contraction quasi-statique d’une cavitéa symétrie sphérique ou cylindrique dans un milieu élastoplastique. In: **Annales des Ponts et Chaussées**. [S.l.: s.n.], 1969. p. 231–236. Citado na página 52.

SCHOFIELD, A. N. Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations. **Géotechnique**, v. 30, n. 3, p. 227–268, sep 1980. ISSN 0016-8505. Disponível em: <<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.1980.30.3.227>>. Acesso em: 11 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 35.

SCHWEIGER, H. F.; MARCHER, T.; SCHÄDLICH, B. Application of a New Shotcrete Constitutive Model to the Numerical Analysis of a Tunnel Excavation. **Tunneling and Underground Construction**, American Society of Civil Engineers, p. 890–899, 2014. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784413449.088>>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.

SEIDENFUSS, T. **Collapses in Tunnelling**. 194 p. Dissertação (Mestrado) — Foundation Engineering and Tunnelling, 2006. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/369445627/Collapses-in-tunnelling-pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 44.

SHARAN, S. K. Elastic-brittle-plastic analysis of circular openings in Hoek-Brown media. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Elsevier BV, v. 40, n. 6, p. 817–824, sep 2003. ISSN 13651609. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160903000406>>. Acesso em: 24 mar. 2021. Citado na página 52.

_____. Exact and approximate solutions for displacements around circular openings in elastic-brittle-plastic Hoek-Brown rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Elsevier BV, v. 42, n. 4, p. 542–549, jun 2005. ISSN 13651609. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160905000274>>. Acesso em: 24 mar. 2021. Citado na página 52.

SHI, J.; ORTIGAO, J. A. R.; BAI, J. MODULAR NEURAL NETWORKS FOR PREDICTING SETTLEMENTS DURING TUNNELING. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 124, n. May, p. 389–395, 1998. Disponível em: <[https://sci-hub.do/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1998\)124:5\(389\)](https://sci-hub.do/10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:5(389))>. Acesso em: 18 mar. 2021. Citado na página 40.

SOUZA, R. L. **Risk Analysis for Tunneling Projects**. 589 p. Tese (Doutorado) — Massachusetts Institute of Technology, 2010. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/58282>>. Acesso em: 23 mar. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 12, 44 e 45.

ŠPAČKOVÁ, O. **Risk management of tunnel construction projects**. 164 p. Tese (Doutorado) — Czech Technical University in Prague, Prague, jun 2012. Disponível em: <https://mech.fsv.cvut.cz/wiki/images/7/7a/PhD_dissertation_Spackova_2012.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2021. Citado 3 vezes nas páginas 12, 44 e 45.

STALLMANN, M. **Verbrüche im Tunnelbau: Ursachen und Sanierung**. Stuttgart: VDM Verlag Dr. Müller, 2005. 128 p. ISBN 9783639306422. Citado na página 44.

WORD HIGHWAYS. **Improving tunneling method selection**. 2015. 1 p. Disponível em: <<https://www.worldhighways.com/wh10/feature/improving-tunneling-method-selection>>. Acesso em: 09 mar. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 31.

XIN, W.; ZENG RONG, L. The FEM analysis of influence of metro construction and operation on the historic buildings considering soil-structure interaction. **2009 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, ICIII 2009**, v. 2, p. 585–588, 2009. Disponível em: <<https://sci-hub.do/10.1109/iciii.2009.299>>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.

ZHONG, D.; HU, N.; CHENG, Z.; LÜ, P.; TONG, D. 3D finite element analysis of TBM water diversion tunnel segment coupled with seepage field. **Transactions of Tianjin University**, v. 22, n. 1, p. 35–42, feb 2016. ISSN 1006-4982. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12209-016-2527-z.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2021. Citado na página 39.