

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 Viscopoplásticos com Ruptura - Simulação Numérica**. 2021. 28p. 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 paciência 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 Viscoplasticos com Ruptura - Simulação Numérica**. 2021. 28p. 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-viscoplastico 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 viscoplastico 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 Viscoplasticos com Ruptura - Simulação Numérica**. 2021. 28p. 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 instantaneous part will be adopted elastoplastic models for 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, axisymmetry 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 finite 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)) . . .	20
Figura 1.2 – Ruptura do suporte (perfil de aço) em uma mina de carvão na China (fonte: Manchao et al. (2015, p. 192)) . . . . .	20

## **LISTA DE QUADROS**

## **LISTA DE TABELAS**

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
abnTeX	ABsurdas Normas para TeX

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Gamma$	Letra grega Gama
$\Lambda$	Lambda
$\zeta$	Letra grega minúscula zeta
$\in$	Pertence



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>DIRETRIZES DA PESQUISA</b>	<b>23</b>
2.1	TEMA	23
2.2	METODOLOGIA	23
2.3	OBJETIVOS	23
2.4	DELIMITAÇÕES	23
2.5	DELINEAMENTO	23
<b>3</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b>	<b>24</b>
3.1	MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO	24
3.1.1	Vala recoberta	24
3.1.2	Escavação simples	24
3.1.3	Desmonte de rocha	24
3.1.4	Tuneladora	24
3.1.5	Cravação de tubos	24
3.2	PRÉ-SUPORTES	24
3.3	REVESTIMENTO DE TÚNEIS	24
3.4	PRINCIPAIS ASPECTOS CONSIDERADOS EM ESTUDOS NUMÉRICOS RECENTES DE TÚNEIS	24
<b>4</b>	<b>COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TÚNEIS</b>	<b>25</b>
4.1	INFLUÊNCIA DA ESCAVAÇÃO E O CONCEITO DE CON- VERGÊNCIA	25
4.2	MECANISMOS DE RUPTURA EM TÚNEIS PROFUNDOS	25

4.3	INFLUÊNCIA DA REOLOGIA DO MACIÇO . . . . .	25
4.3.1	Comportamento instantâneo . . . . .	25
4.3.2	Comportamento diferido no tempo . . . . .	25
4.3.3	Alguns estudos considerando leis elastoplásticas e visco-plásticas . . . . .	25
4.4	INFLUÊNCIA DA FORMA DA SEÇÃO . . . . .	25
4.5	INFLUÊNCIA DA PROFUNDIDADE DO TÚNEL . . . . .	25
4.6	INFLUÊNCIA DA PROXIMIDADE DA SUPERFÍCIE . . . . .	25
4.7	INFLUÊNCIA DO REVESTIMENTO E PARÂMETROS ADIMENSIONAIS . . . . .	25
4.8	MÉTODO CONVERGÊNCIA-CONFINAMENTO . . . . .	25
<b>5</b>	<b>MODELO MECÂNICO . . . . .</b>	<b>26</b>
5.1	EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO LOCAL E A HIPÓTESE DA EVOLUÇÃO QUASE ESTÁTICA . . . . .	26
5.2	ADMISSIBILIDADE ESTÁTICA, NATUREZA EULERIANA DO CAMPO DE TENSÕES, TRANSFORMAÇÃO GEOMÉTRICA E MEDIDA DE DEFORMAÇÃO . . . . .	26
5.3	HIPÓTESE DAS PEQUENAS PERTURBAÇÕES E A DESCRIÇÃO LAGRANGEANA . . . . .	26
5.4	MODELO CONSTITUTIVO ELÁSTICO . . . . .	26
5.5	MODELO CONSTITUTIVO ELASTOPLÁSTICO . . . . .	26
5.6	MODELO CONSTITUTIVO VISCOPLÁSTICO . . . . .	26
5.7	MODELO CONSTITUTIVO ELASTOPLÁSTICO-VISCOPLÁSTICO . . . . .	26
<b>6</b>	<b>SOLUÇÃO DO MODELO MECÂNICO . . . . .</b>	<b>27</b>
6.1	FORMA FRACA DAS EQUAÇÕES DE CAMPO . . . . .	27
6.2	NOTAÇÃO DE VOIGT . . . . .	27

6.3	DISCRETIZAÇÃO ESPACIAL EM ELEMENTOS FINITOS . .	27
6.4	SOLUÇÃO DO SISTEMA E DISCRETIZAÇÃO TEMPORAL	27
6.5	ALGORITMO DE ATUALIZAÇÃO DAS TENSÕES E VARIÁ- VEIS INTERNAS . . . . .	27
6.5.1	Integração das equações constitutivas elastoplásticas . . .	27
6.5.1.1	Esquema de integração totalmente implícito . . . . .	27
6.5.1.2	Esquema de integração semi-implícito . . . . .	27
6.5.2	Atualização do módulo constitutivo . . . . .	27
6.5.3	Particularizando para estado plano de deformações e axis- simetria . . . . .	27
6.5.4	Domínios, discretização, condições de contorno e ciclo construtivo para os modelos de verificação . . . . .	27
<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>		<b>28</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Os túneis são grandes obras de engenharia que, além de causar grande admiração, atendem a diversas finalidades, sendo a mais conhecida a 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 metrô 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 da maioria dessas construções serem finalizadas com sucesso, ocorrem incidentes que levam a atrasos, a custos excessivos e, em alguns casos, a 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 ao longo do tempo construtivo (no curto prazo), ou ainda, meses e anos após a construção do túnel (no longo prazo), podendo levar a deformações excessivas (Figura 1.2), danos ao revestimento (Figura 1.2) e, em alguns casos, devido a magnitude dos efeitos, acarretar no 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 pode ser visto

em Ramoni e Anagnostou (2010a, 2010b)). Sabe-se 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 viscoplástico, 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, tipos de pré-suportes, 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 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 focos principais do trabalho, uma vez que nele será feita a junção entre o modelo elastoplástico (instantâneo) e 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** tem o intuito de mostrar 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**

### **2.2 METODOLOGIA**

### **2.3 OBJETIVOS**

### **2.4 DELIMITAÇÕES**

### **2.5 DELINEAMENTO**



### **3 ESTADO DA ARTE**

#### **3.1 MÉTODOS DE ESCAVAÇÃO**

##### **3.1.1 Vala recoberta**

##### **3.1.2 Escavação simples**

##### **3.1.3 Desmonte de rocha**

##### **3.1.4 Tunneladora**

##### **3.1.5 Cravação de tubos**

#### **3.2 PRÉ-SUPORTES**

#### **3.3 REVESTIMENTO DE TÚNEIS**

#### **3.4 PRINCIPAIS ASPECTOS CONSIDERADOS EM ESTUDOS NUMÉRICOS RECENTES DE TÚNEIS**

## **4 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE TÚNEIS**

### **4.1 INFLUÊNCIA DA ESCAVAÇÃO E O CONCEITO DE CONVERGÊNCIA**

### **4.2 MECANISMOS DE RUPTURA EM TÚNEIS PROFUNDOS**

### **4.3 INFLUÊNCIA DA REOLOGIA DO MACIÇO**

#### **4.3.1 Comportamento instantâneo**

#### **4.3.2 Comportamento diferido no tempo**

#### **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

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: <[https://www.geocasehistoriesjournal.org/pub/article/view/IJGCH\\_2\\_1\\_3](https://www.geocasehistoriesjournal.org/pub/article/view/IJGCH_2_1_3)>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 20.

MANCHAO, H. et al. 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><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S088677981400159X>>. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 20.

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>>. Citado na página 21.

\_\_\_\_\_. Tunnel boring machines under squeezing conditions. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 25, n. 2, p. 139–157, 2010. ISSN 08867798. Citado na página 21.