

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

**Um Modelo Tridimensional de Elementos Finitos para Túneis  
com Revestimento em Concreto Projetado e Pré-moldado**

**Paola María Camila Villalba Fiore**

Porto Alegre  
2015

PAOLA MARÍA CAMILA VILLALBA FIORE

**UM MODELO TRIDIMENSIONAL DE ELEMENTOS  
FINITOS PARA TÚNEIS COM REVESTIMENTO EM  
CONCRETO PROJETADO E PRÉ-MOLDADO**

Dissertação 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 Mestre em  
Engenharia.

Porto Alegre  
2015

#### CIP - Catalogação na Publicação

Villalba Fiore, Paola María Camila  
Um Modelo Tridimensional de Elementos Finitos  
para Túneis com Revestimento em Concreto Projetado e  
Pré-moldado / Paola María Camila Villalba Fiore. --  
2015.

118 f.

Orientador: Américo Campos Filho.  
Coorientadora: Denise Bernaud Maghous.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-  
RS, 2015.

1. túnel. 2. viscoelasticidade. 3.  
viscoplasticidade. 4. elementos finitos. 5. ANSYS.  
I. Campos Filho, Américo, orient. II. Bernaud  
Maghous, Denise, coorient. III. Título.

**PAOLA MARÍA CAMILA VILLALBA FIORE**

**UM MODELO TRIDIMENSIONAL DE ELEMENTOS  
FINITOS PARA TÚNEIS COM REVESTIMENTO EM  
CONCRETO PROJETADO E PRÉ-MOLDADO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Estruturas, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 10 de abril de 2015

**Prof. Américo Campos Filho**  
Dr. Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo  
Orientador

**Prof. Denise Bernaud Maghous**  
Docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et  
Chaussées  
Orientadora

**Prof. Armando Miguel Awruch**  
Dr. Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Coordenador do PPGEC/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Fulgêncio Antônio Aquino Duarte (UNA)**  
Dr. Universidade de São Paulo

**Prof. Luiz Antônio Bressani (UFRGS)**  
Ph.D. Imperial College

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

Dedico este trabalho a minha família pela compreensão e apoio neste tempo longe deles, meus professores pelo incentivo e meus amigos que me acompanharam durante o período deste curso.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus e à Virgem Maria por ter chegado até aqui.

Aos meus pais e irmãos pelo amor, compreensão e apoio de sempre ao longo deste tempo longe de casa.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de continuar a minha formação profissional em um curso de excelência.

Aos meus orientadores o professor Américo e a professora Denise pelos ensinamentos e a disponibilidade para orientar a minha dissertação.

Aos professores do PPGEC pelo conhecimento transmitido durante o curso.

Aos meus professores da FIUNA pelo incentivo para empreender este projeto.

Ao meu avô Eusebio (in memoriam) por transmitir essa motivação de estudar e se capacitar sempre.

Aos colegas do CEMACOM, os colegas paraguaios e todos os amigos que tive o prazer de conhecer neste tempo em Porto Alegre, os quais tornaram esta caminhada muito mais agradável.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo suporte financeiro.

Con la gracia de Dios, tú has de acometer y realizar lo imposible... Porque lo posible lo hace cualquiera.

*San Josemaría Escrivá De Balaguer*

## RESUMO

VILLALBA FIORE, P.M.C. **Um Modelo Tridimensional de Elementos Finitos para Túneis com Revestimento em Concreto Projetado e Pré-moldado.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Em túneis, a deformação do maciço e a pressão do solo no revestimento dependem das tensões e características do maciço, das tensões do maciço, da geometria, da rigidez, do instante da colocação do revestimento. A variação das tensões no revestimento e as deformações são causadas pelo avanço da escavação e as propriedades dependentes do tempo do maciço rochoso e revestimento.

O objetivo desta dissertação é apresentar um modelo numérico para a análise tridimensional de túneis em maciços rochosos no programa ANSYS. Ele constitui uma ferramenta para calcular um túnel, revestido de concreto em diferentes situações de rigidez do revestimento, processo construtivo e características do maciço. O processo de escavação e colocação do revestimento é simulado pelo método da ativação/desativação de elementos em etapas sequenciais.

O maciço apresenta comportamento elástico na primeira parte, e posteriormente uma lei viscoplástica. O concreto projetado e o concreto pré-moldado do revestimento são modelados como elásticos na primeira parte, e posteriormente, como materiais viscoelásticos utilizando o modelo da cadeia de Maxwell e de Kelvin, propostos por Bazant. Ambos os modelos foram calibrados por comparação com o Código Modelo *fib* 2010. A simulação do túnel é realizada através da incorporação de sub-rotinas para o concreto viscoelástico no programa ANSYS.

Para validar o modelo são feitas comparações dos resultados obtidos no programa ANSYS com a solução analítica, com o programa GEOMEQ91 e com o Novo Método Implícito, dependendo do caso. Um estudo paramétrico em elasticidade é realizado com o código ANSYS variando alguns parâmetros relevantes. Na segunda parte, o mesmo túnel revestido é modelado com dois diferentes tipos de revestimento e os dois modelos de cadeia citados. Finalmente, é comparado o comportamento com o túnel experimental Kielder, do qual se tem dados disponíveis da instrumentação. A comparação destes dados com os resultados do programa ANSYS mostra uma aproximação muito boa.

**Palavras-chave:** *elementos finitos, túnel, viscoelasticidade, viscoplasticidade, ANSYS.*

## ABSTRACT

VILLALBA FIORE, P.M.C. **Tridimensional numerical finite element model to simulate deep tunnels with shotcrete and precast concrete.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Stabilizing underground openings such as tunnels excavated in rock mass remain a major concern of geotechnical engineers dealing with this kind of structures. In tunnels, the rock mass strain and the ground pressure on lining depend on the stress and characteristics of the rock mass as well as of the geometry, the stiffness and the moment of the lining installation. Pressure variation on lining and strain are caused by the advance of excavation and the time-dependent properties of the rock mass and lining.

This dissertation describes the numerical implementation of constitutive laws in the numerical code ANSYS. It is performed a numerical simulation with 3D finite elements of a tunnel. The rock mass presents elastic behavior in the first part and then a viscoplastic law. The shotcrete and precast concrete are modeled as elastic in the first part and then viscoelastic material with the constitutive laws of the Maxwell and the Kelvin chain model, proposed by Bazant. So the characteristics of the viscoelastic concrete changes with time until the stabilization. Both chain models had to be calibrated by comparing with de *fib* Model Code 2010. The finite elements simulation is performed by incorporating subroutines for the viscoelastic concrete model in the ANSYS code. The method to simulate the tunnel excavations is by activating and deactivating elements in sequential steps.

In the first part of the dissertation two validations are performed. The analytical solution and the deformation achieved on the stabilization in the ANSYS code are compared for the validation of an unlined tunnel. For a lined tunnel, with an elastic and viscoplastic rock mass and elastic lining, validation is performed by comparing the results of the GEOMEQ91 code with the ANSYS code. The results show a very good approximation in viscoplasticity and agree perfectly in elasticity. Also a parametric study is undertaken with the ANSYS code varying some relevant parameters. In the second part, it is compared the same tunnel with the two different concrete lining and the two chain models. Finally, it is compared with the Kielder experimental tunnel, which in situ measured data is available. The comparison of this data with the results from the ANSYS code shows a very good approximation.

**Key-words:** *finite elements, tunnel, viscoelasticity, viscoplasticity, ANSYS.*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>PROBLEMÁTICA DE TÚNEIS</b> .....	<b>23</b>
3.1	COMPORTAMENTO DO MACIÇO FRENTE À ESCAVAÇÃO .....	23
3.2	MODELAGEM DO PROCESSO DE ESCAVAÇÃO .....	25
3.3	MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE SUPORTES DE TÚNEIS .....	25
3.3.1	Métodos empíricos .....	26
3.3.2	Métodos que levam em consideração a interação maciço-revestimento.....	27
<b>4</b>	<b>LEI CONSTITUTIVA DO MACIÇO</b> .....	<b>33</b>
4.1	VISCOPLASTICIDADE .....	33
4.1.1	Regra de fluxo .....	34
4.1.2	Lei de comportamento viscoplástico.....	35
4.1.3	Caracterização dos maciços viscoplásticos .....	35
<b>5</b>	<b>CONCRETO</b> .....	<b>39</b>
5.1	CONCRETO COMO REVESTIMENTO DE UM TÚNEL.....	39
5.1.1	Concreto projetado .....	39
5.1.2	Concreto pré-moldado.....	40
5.2	COMPORTAMENTO AO LONGO DO TEMPO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO.....	41
5.2.1	Comportamento diferido do concreto .....	41
5.2.2	Lei do tipo integral para a fluência.....	42
5.2.3	Retração do concreto .....	44
5.2.4	Formulações viscoelásticas: modelos reológicos básicos .....	47
5.2.5	Cadeia de Maxwell Generalizada.....	48
5.2.6	Cadeia de Kelvin Generalizada .....	53

5.2.7	Formulação da fluência do Código Modelo <i>fib</i> 2010.....	55
5.2.8	Calibragem do modelo de Maxwell e Kelvin para concreto viscoelástico .....	59
<b>6</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL NO ANSYS.....</b>	<b>66</b>
6.1	Fluxograma da sub-rotina <i>usermat</i> .....	70
<b>7</b>	<b>ANÁLISE NUMÉRICA DE TÚNEIS.....</b>	<b>73</b>
7.1	VALIDAÇÃO DO PROGRAMA ANSYS EM ELASTICIDADE.....	74
7.1.1	Descrição.....	74
7.1.2	Solução analítica .....	75
7.1.3	GEOMEQ91 .....	75
7.1.4	New Implicit Method (NIM).....	76
7.1.5	ANSYS.....	76
7.1.6	Resultados da validação em elasticidade .....	85
7.2	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM ELASTICIDADE.....	85
7.2.1	Análise paramétrica.....	86
7.2.2	Resultados do estudo paramétrico.....	86
7.2.3	Conclusões da elasticidade.....	91
7.3	VALIDAÇÃO DO PROGRAMA ANSYS COM MACIÇO VISCOPLÁSTICO	91
7.3.1	Solução analítica .....	91
7.3.2	GEOMEQ91 .....	92
7.3.3	ANSYS.....	92
7.3.4	Parâmetros do modelo.....	92
7.3.5	Resultados da validação em viscoplasticidade.....	93
7.4	REPRESENTAÇÃO DE UM TÚNEL UTILIZANDO AS CADEIAS DE MAXWELL E KELVIN .....	95
7.4.1	Parâmetros do modelo.....	96
7.4.2	Relatório do processo no ANSYS.....	97
7.4.3	Resultados .....	98

7.4.4	Comparação entre os modelos de Kelvin e de Maxwell .....	103
7.4.5	Comparação entre os resultados do concreto pré-moldado e concreto projetado	103
7.5	REPRESENTAÇÃO DO TÚNEL KIELDER .....	104
7.5.1	Descrição do túnel Kielder .....	104
7.5.2	Parâmetros do modelo .....	107
7.5.3	Resultados .....	109
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>111</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>113</b>
	<b>APÊNDICE A – Comandos de entrada para o ANSYS.....</b>	<b>116</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relação entre a geometria do túnel e o gráfico de convergência .....	24
Figura 2: (a) Revestimento colocado a uma distancia $d_0$ da face de escavação; (b) Avanço da face de escavação; (c) Avanço do revestimento até a distancia $d_0$ da nova face. (HANAFY; EMERY, 1980, 1982 apud Cuoto (2011))......	25
Figura 3: Modelo utilizado para cálculo da curva de convergência PixUi (Couto, 2011)...	27
Figura 4: Equilíbrio, definição da convergência no instante da colocação do revestimento $U_0$ (Bernaud & Rousset, 1992).....	28
Figura 5: Curvas de interação maciço-revestimento (Möller & Vermeer, 2004).....	28
Figura 6: Relação da pressão fictícia com o parâmetro $\lambda$ (Bernaud, 1991).....	30
Figura 7: Influência qualitativa da rigidez do suporte no perfil da convergência (Bernaud & Rousset, 1992). .....	31
Figura 8: Carga e descarga na plasticidade.....	34
Figura 9: Esquema de um ensaio triaxial.....	36
Figura 10: Ensaio de fluência triaxial (Rousset, 1988).....	37
Figura 11: Resultado de um ensaio de fluência (Rousset, 1988).....	37
Figura 12: Revestimento de concreto projetado no túnel da Estação Jardim São Paulo (Comitê Brasileiro de Túneis, 2006).....	40
Figura 13: Revestimento de concreto pré-moldado no túnel da linha 2 do Metrô de São Paulo (Comitê Brasileiro de Túneis, 2006). .....	41
Figura 14: Deformação por fluência para uma tensão constante aplicada em $t'$ . .....	44
Figura 15: Deformação por retração ao longo do tempo. ....	45
Figura 16: (a) Modelo de Maxwell; (b) Modelo de Kelvin .....	47
Figura 17: Modelo das camadas superpostas.....	48
Figura 18: Modelo de Maxwell Generalizado. ....	49
Figura 19: Modelo de Kelvin generalizado. ....	53
Figura 20: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, <i>fib</i> 2010 e modelos computacionais para $t'=2,8$ dias. ....	61
Figura 21: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, <i>fib</i> 2010 e modelos computacionais para $t'=8,85$ dias. ....	61

Figura 22: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, <i>fib</i> 2010 e modelos computacionais para $t'=28$ dias. ....	62
Figura 23: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, <i>fib</i> 2010 e modelos computacionais para $t'=88,54$ dias. ....	62
Figura 24: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, <i>fib</i> 2010 e modelos computacionais para $t'=280$ dias. ....	63
Figura 25: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, <i>fib</i> 2010 e modelos computacionais para $t'=885,44$ dias. ....	63
Figura 26: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, <i>fib</i> 2010 e modelos computacionais para $t'=2800$ dias. ....	64
Figura 27: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, <i>fib</i> 2010 e modelos computacionais para $t'=8854,38$ dias. ....	64
Figura 28: Customização do ANSYS .....	67
Figura 29: Processo de compilação. ....	68
Figura 30: Criação da biblioteca dinâmica. ....	69
Figura 31: Output window no início do ANSYS.....	70
Figura 32: Fluxograma da <i>usermat</i> para o método de Maxwell. ....	71
Figura 33: Fluxograma da <i>usermat</i> para o método de Kelvin. ....	72
Figura 34: Esquema das comparações para a validação do modelo em elasticidade. ....	75
Figura 35: Elemento PLANE183 (ANSYS, 2012). ....	77
Figura 36: Malha e condições de contorno do modelo 2D axissimétrico no ANSYS.....	78
Figura 37: Deslocamento radial no modelo 2D axissimétrico no ANSYS, sem revestimento. ....	79
Figura 38: Deslocamento radial no modelo 2D axissimétrico no ANSYS, com revestimento. ....	79
Figura 39: Tensões radiais no modelo 2D axissimétrico no ANSYS, sem revestimento....	80
Figura 40: Tensões radiais no modelo 2D axissimétrico no ANSYS, com revestimento. ..	80
Figura 41: Curvas de convergência no caso axissimétrico 2D. ....	81
Figura 42: Elemento SOLID186 (ANSYS, 2012). ....	81
Figura 43: Malha do modelo 3D. ....	82
Figura 44: Condições de contorno. ....	83

Figura 45: Deslocamento no modelo 3D no ANSYS, sem revestimento (m).....	83
Figura 46: Deslocamento no modelo 3D no ANSYS, com revestimento (m).....	84
Figura 47: Tensões no modelo 3D no ANSYS, sem revestimento (Pa). ....	84
Figura 48: Tensões no modelo 3D no ANSYS, com revestimento (Pa).....	84
Figura 49: Curvas de convergência do caso 3D em elasticidade.....	85
Figura 50: Curvas de convergências para $d_0=0$ e $K_s=3600$ MPa.....	88
Figura 51: Curvas de convergências para $d_0=0$ e $K_s=360$ MPa.....	88
Figura 52: Curvas de convergências para $d_0=0$ e $K_s=36$ MPa.....	88
Figura 53: Curvas de convergências para $d_0=2/3R$ e $K_s=3600$ MPa. ....	89
Figura 54: Curvas de convergências para $d_0=2/3R$ e $K_s=360$ MPa. ....	89
Figura 55: Curvas de convergências para $d_0=2/3R$ e $K_s=36$ MPa. ....	89
Figura 56: Curvas de convergências para $d_0=4/3R$ e $K_s=3600$ MPa. ....	90
Figura 57: Curvas de convergências para $d_0=4/3R$ e $K_s=360$ MPa. ....	90
Figura 58: Curvas de convergências para $d_0=4/3R$ e $K_s=36$ MPa. ....	90
Figura 59: Esquema das comparações para a validação do modelo em viscoplasticidade..	93
Figura 60: Curvas de convergência, caso sem revestimento. ....	94
Figura 61: Curvas de convergência, caso com revestimento.....	94
Figura 62: Convergência no caso KE-J. ....	98
Figura 63: Convergência no caso KE-M. ....	99
Figura 64: Convergência no caso MA-J. ....	99
Figura 65: Convergência no caso MA-M. ....	100
Figura 66: Convergência em todos os casos depois da construção e aos 5 anos.....	101
Figura 67: Localização do nó 11430.....	102
Figura 68: Evolução do nó 11430 ao longo do tempo.....	102
Figura 69: Corte do terreno do túnel Kielder. Adaptação de Ward (Ward, et al., 1976)...	105
Figura 70: Planta da região do túnel Kielder. Adaptação de Ward (Ward, et al., 1976)...	105

Figura 71: Trechos do túnel experimental Kielder. Adaptação de Freeman (T J Freeman, 1978).....	106
Figura 72: Deslocamento a 0,3 m por encima do revestimento para todos os tipos de revestimento (Ward, et al., 1983). a) Escavações com explosivos b) Máquina escavadora .....	106
Figura 73: Malha tridimensional.....	108
Figura 74: Condições de contorno no túnel Kielder. ....	109
Figura 75: Localização do nó 9724.....	110
Figura 76: Comparação dos resultados ao longo do tempo. ....	110

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coeficientes relacionados ao tipo de cimento.....	46
Tabela 2: Equações e relações constitutivas dos modelos de Maxwell e Kelvin (Creus, 1986). .....	48
Tabela 3: Correção dos elementos da matriz A. ....	52
Tabela 4: Valores adotados na calibragem .....	59
Tabela 5 Módulos de Young de cada camada segundo a idade de carregamento t' e o modelo utilizado. ....	60
Tabela 6: Propriedades dos materiais. ....	74
Tabela 7: Parâmetros do processo de construção do túnel. ....	74
Tabela 8: Propriedades do maciço viscoplástico. ....	93
Tabela 9: Propriedades do concreto viscoelástico. ....	96
Tabela 10: Propriedades do maciço viscoplástico. ....	96
Tabela 11: Parâmetros do processo de construção do túnel. ....	97
Tabela 12: Propriedades do concreto no túnel Kielder.....	107
Tabela 13: Propriedades do maciço. ....	107
Tabela 14: Parâmetros de entrada do modelo de Perzyna .....	107
Tabela 15: Parâmetros do processo de construção do túnel. ....	108

## LISTA DE SÍMBOLOS

### LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

$A_c$ :	Área da seção transversal da peça de concreto
$C$ :	Coesão do maciço
$C_F$ :	Curva de confinamento
$C_V$ :	Curva de convergência
$D$ :	Diâmetro do túnel
$E_c$ :	Módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias
$E_c(t')$ :	Módulo de elasticidade do concreto na idade $t'$
$E_s$ :	Módulo de elasticidade do solo ou maciço
$E_\mu$ :	Módulo de elasticidade da mola $\mu$
$F$ :	Critério de plasticidade
$F_0$ :	Tensão de referência
$G$ :	Potencial plástico
$H$ :	Profundidade do túnel
$J(t, t')$ :	Função de fluência
$K_s$ :	Rigidez do revestimento
$L$ :	Comprimento do túnel
$P_i$ :	Pressão de confinamento
$P_i^f$ :	Pressão fictícia
$P_\infty$ :	Pressão geostática
$Q$ :	Tensão axial no ensaio de fluência
$R$ :	Raio do túnel
$R(t, t')$ :	Função de relaxação
$\tilde{R}(t_i, t')$ :	Função de relaxação nos pontos discretos
$RH$ :	Umidade relativa da atmosfera

$T$ :	Temperatura
$T(\Delta t_i)$ :	Temperatura média atuante por um período de $\Delta t_i$ dias
$U_0$ :	Convergência no instante da instalação do suporte
$U_\infty$ :	Convergência em uma seção distante da face do túnel sem revestimento
$U_{eq}$ :	Convergência no equilíbrio
$U_i$ :	Convergência do túnel
$V$ :	Velocidade de escavação
$Z$ :	Eixo longitudinal do túnel

### **LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS**

$a(z)$ :	Função de forma no NIM
$d_0$ :	Distância entre a colocação do revestimento e a face do túnel
$e$ :	Espessura do revestimento do túnel
$f_{cm}$ :	Resistência à compressão do concreto aos 28 dias
$h$ :	Espessura fictícia da peça de concreto
$m$ :	Parâmetro relacionado à taxa de deformação do material
$n$ :	Número de elementos da cadeia
$p$ :	Passo de escavação
$s$ :	Parâmetro dependente do tipo de cimento
$t$ :	Idade atual do concreto
$t'$ :	Idade do concreto no início da aplicação de carga
$t_r$ :	Tempos discretos utilizados no espectro de relaxação
$t_s$ :	Idade do concreto no início da consideração da retração
$t_T$ :	Idade do concreto, ajustada pela temperatura
$u$ :	Perímetro da peça de concreto em contato com a atmosfera
$u_r(r = R)$ :	Deslocamento radial do túnel

### **LETRAS GREGAS MAIÚSCULAS**

$\Delta t_i$ :	Número de dias em que a temperatura T prevaleceu
----------------	--

$\phi$ : Desvio

## LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

$\dot{\alpha}$ : Taxa do parâmetro de endurecimento isotrópico

$\alpha_{as}, \alpha_{ds1}, \alpha_{ds2}$ : Coeficiente que depende do tipo de cimento

$\beta_{ds}$ : Coeficiente que considera o desenvolvimento da retração no tempo

$\beta_H$ : Coeficiente dependente da temperatura que substitui o coeficiente  $\beta_h$

$\beta_h$ : Coeficiente relacionado à espessura fictícia e a resistência do concreto

$\beta_{RH}$ : Coeficiente que considera a umidade relativa do ambiente

$\beta_T$ : Coeficiente para correção de  $\beta_H$

$\gamma$ : Parâmetro relacionado à viscosidade do material

$\varepsilon$ : Deformação total

$\underline{\underline{\varepsilon}}$ : Tensor das deformações totais

$\dot{\varepsilon}$ : Taxa de deformação

$\hat{\varepsilon}$ : Taxa de deformação equivalente

$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}$ : Tensor da taxa de deformação total

$\varepsilon_0$ : Deformação inelástica

$\underline{\underline{\varepsilon}}^0$ : Tensor de deformação inicial

$\varepsilon_a$ : Deformação axial no ensaio de fluência

$\varepsilon_c$ : Deformação total do concreto

$\varepsilon_c(t')$ : Deformação instantânea devido ao carregamento

$\varepsilon_{cas}$ : Retração autógena

$\varepsilon_{cas0}$ : Coeficiente de retração autógena

$\varepsilon_{cc}$ : Deformação por fluência

$\varepsilon_{c ds}$ : Retração por secagem

$\varepsilon_{c ds0}$ : Coeficiente de retração por secagem

$\varepsilon_{cs}$ : Deformação por retração

$\varepsilon_{cT}$ :	Deformação térmica
$\varepsilon_E$ :	Deformação causada pela mola
$\underline{\underline{\varepsilon}}^e$ :	Tensor de deformação elástica
$\varepsilon_{vp}$ :	Deformação viscosa na cadeia de Kelvin
$\underline{\underline{\varepsilon}}^{vp}$ :	Tensor de deformação viscoplástica
$\varepsilon_\eta$ :	Deformação causada pelo amortecedor
$\eta$ :	Constante de viscosidade
$\theta_\mu$ :	Tempo de retardação do amortecedor $\mu$
$\lambda$ :	Parâmetro que representa a escavação/perda de confinamento.
$\mu$ :	Elemento $\mu$ da cadeia
$\nu$ :	Coefficiente de Poisson
$\pi$ :	Termo residual para ajuste da função
$\rho$ :	Peso específico do maciço
$\sigma$ :	Tensão total
$\sigma_0$ :	Tensão inicial
$\underline{\underline{\sigma}}^0$ :	Vetor das tensões iniciais
$\sigma_c(t')$ :	Tensão constante aplicada no concreto no tempo $t'$
$\sigma_E$ :	Tensão produzida pela mola
$\sigma_\eta$ :	Tensão produzida pelo amortecedor
$\tau$ :	Tempo de relaxação
$\varphi$ :	Coefficiente de fluência
$\varphi_{bc}$ :	Coefficiente de fluência básico
$\varphi_{dc}$ :	Coefficiente de fluência por secagem
$\varphi_T$ :	Coefficiente de correção
$\varpi_1, \varpi_2$ :	Pesos para o termo residual

# 1 INTRODUÇÃO

Os túneis e as obras subterrâneas têm adquirido uma importância crescente no planejamento e gestão do espaço, tanto em áreas urbanas como nas zonas montanhosas.

A atual “era ambiental” tem aumentado a demanda do uso do espaço subterrâneo para preservar o meio ambiente e para um melhor aproveitamento da superfície.

A escolha do tipo de obra a construir e as suas características têm que levar em conta o custo de manutenção ao longo da vida útil da obra, economia de energia, impactos ambientais, distúrbios durante a construção, desapropriações e a prioridade do uso do espaço da superfície. Por estas razões as soluções com estruturas subterrâneas, especialmente nas grandes cidades, têm sido favorecidas, e o estudo delas é de muita relevância.

A melhoria constante dos métodos de construção e da tecnologia na engenharia de túneis conduzem a custos menores, maior segurança e construção de obras subterrâneas em menor tempo.

Conforme Couto (2011), a concentração das populações em zonas urbanas conduz ao surgimento de metrópoles cada vez maiores. Nestas, a gestão de itinerários para o transporte urbano, ao levar em conta a preservação da arquitetura e o elevado custo das desapropriações, tende a privilegiar as obras subterrâneas. Os túneis reduzem a necessidade de desapropriações de imóveis e áreas urbanas, preservam o meio ambiente e o desenho arquitetônico das cidades e valorizam as áreas próximas. A implementação de túneis possibilita a máxima utilização do espaço subterrâneo, liberando a superfície para moradia, trabalho, e lazer. Estruturas subterrâneas podem ser túneis de transporte e tráfego, túneis de utilidades públicas, cavernas de armazenamento ou para outros fins.

O desenvolvimento tecnológico dos vários processos construtivos, atualmente disponíveis, viabiliza a abertura de túneis em um número crescente de ambientes.

Neste contexto, desenvolve-se neste trabalho, um modelo numérico para a análise tridimensional de túneis em maciços rochosos, utilizando o programa ANSYS para a

implementação de diversas leis constitutivas. Neste estudo, em um primeiro caso o maciço e o revestimento de concreto são considerados com comportamento elástico linear e em um segundo caso o maciço tem comportamento viscoplástico e o revestimento viscoelástico. O comportamento viscoelástico do concreto está representado pelo modelo de camadas superpostas, utilizando a cadeia de Maxwell ou a cadeia de Kelvin (Bazant & Prasannan, 1988)

O modelo simula o processo de escavação e colocação do revestimento pelo método da ativação/desativação de elementos.

Para validar o modelo são feitas comparações com a solução analítica, com o programa GEOMECH91 e com o Novo Método Implícito.

São estudados dois tipos de revestimento de concreto: o concreto projetado e o concreto pré-moldado.

Finalmente, os resultados do modelo são comparados com os dados da instrumentação do túnel experimental Kielder, da Inglaterra.

Este trabalho está organizado em 8 capítulos. Neste primeiro capítulo da introdução foram descritas as considerações gerais do trabalho. Segue o capítulo 2 com os objetivos do trabalho. No capítulo 3 foi desenvolvida a revisão bibliográfica em relação a túneis: a interação solo-estrutura no processo de escavação e os métodos de dimensionamento. O capítulo 4 e 5 tratam das leis de comportamento dos dois materiais: o maciço e o concreto, respectivamente. No capítulo 6 explica-se a implementação computacional dos modelos no programa ANSYS. O capítulo 7 apresenta todas as simulações de túneis e os seus resultados. Por último, no capítulo 8, encerra-se o trabalho apresentando as conclusões da dissertação.

## 2 OBJETIVOS

Os objetivos desta dissertação são os seguintes:

- Desenvolver um modelo numérico para a análise tridimensional de túneis em maciços rochosos utilizando o programa ANSYS.
- Utilizar o método de ativação/desativação de elementos na simulação do processo de escavação e colocação do revestimento de um túnel.
- Analisar o comportamento do maciço em elasticidade linear e viscoplasticidade.
- Analisar o comportamento do concreto em elasticidade e viscoelasticidade.
- Comparar os métodos de dimensionamento, a solução analítica, os resultados do programa GEOMECH91 (Bernaud, 1991) e do programa ANSYS no cálculo da convergência de um túnel.
- Utilizar e comparar os modelos da cadeia de Maxwell e de Kelvin para representar o comportamento do concreto como revestimento de um túnel.
- Comparar a convergência do túnel para revestimentos em concreto projetado e pré-moldado.
- Comparar os resultados numéricos de um modelo tridimensional no programa ANSYS com os resultados experimentais do Túnel Kielder.

### 3 PROBLEMÁTICA DE TÚNEIS

O engenheiro de túneis Franz Rzhia (1872) dizia que se precisa maior habilidade para evitar (minimizar) o carregamento do terreno do que para resistir ao mesmo. Levando em conta este fator é que se procura a melhor solução de projeto, revestimento, método de escavação e construtivo disponíveis. Também vão surgindo novas tecnologias de construção e modelagem.

Hoje em dia, a utilização de ferramentas computacionais é fundamental no projeto de túneis. Elas podem representar melhor o problema real e fornecer resultados confiáveis, analisando vários aspectos.

No projeto de obras subterrâneas os objetivos são a estabilidade local da estrutura e no entorno dela. Os deslocamentos induzidos têm que ser toleráveis em relação à estrutura e às estruturas vizinhas e de serviços.

#### 3.1 COMPORTAMENTO DO MACIÇO FRENTE À ESCAVAÇÃO

Quando se faz uma escavação em um maciço rochoso, as tensões do maciço vão se modificando conforme a distância de escavação. O maciço tende a se deslocar para dentro, pela pressão que age o maciço circundante.

A convergência do túnel representa a relação entre o deslocamento radial do terreno em  $r=R$  para o interior da cavidade, devido à relaxação das tensões, em relação ao raio do túnel. Assim, a convergência é expressa pela equação (1):

$$U_i = -\frac{u_r(r=R)}{R} \quad (1)$$

Um gráfico típico de convergência se mostra na Figura 1. A convergência do túnel não revestido é uma função da lei de comportamento do maciço, da distância do ponto medido à face do túnel e do tempo. Se o túnel for revestido, a convergência depende dos parâmetros anteriores e também da rigidez do revestimento  $K_s$  e da distância de colocação do

revestimento à face do túnel  $d_0$ . A região de influência da face do túnel é de  $5R$  antes e depois dela, como se mostra na Figura 1.

A rigidez do revestimento é função do módulo de elasticidade, do coeficiente de Poisson, do raio do túnel e da espessura do revestimento “ $e$ ”. Esta é expressa pela fórmula da rigidez normal de um tubo espesso, equação (2).

$$K_s = \frac{E_c(R^2 - (R-e)^2)}{(1-\nu)[(1-2\nu)R^2 + (R-e)^2]} \quad (2)$$

Compreender a interação que se desenvolve entre o maciço e o suporte no processo construtivo de um túnel é indispensável para interpretar corretamente os deslocamentos e as alterações no campo de tensões do maciço.

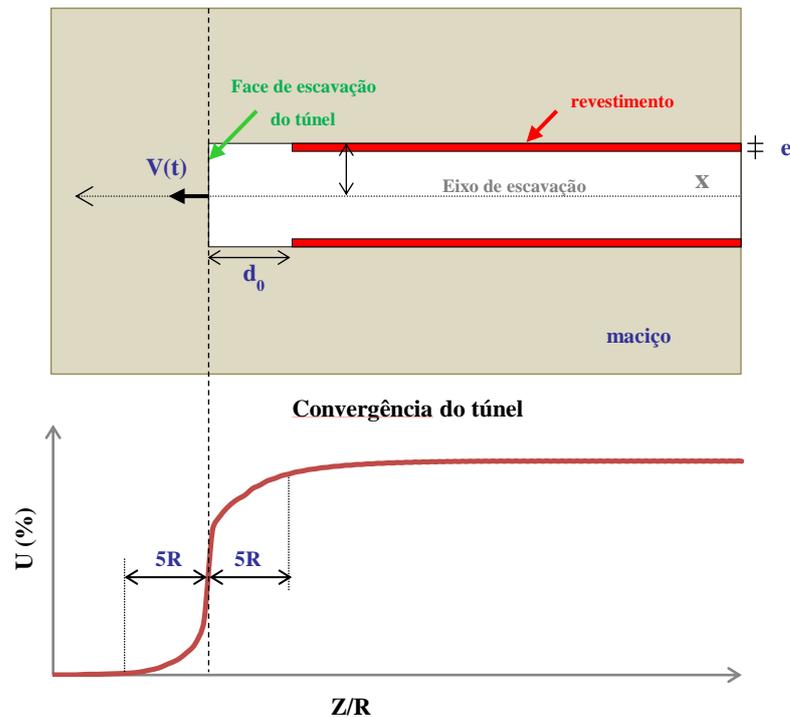


Figura 1: Relação entre a geometria do túnel e o gráfico de convergência

Os túneis podem ser classificados segundo a sua profundidade. Eles são chamados de profundos quando as deformações não chegam à superfície. Nestes casos, o seu diâmetro  $D$  (ou diâmetro equivalente) é pequeno em relação à profundidade do seu eixo  $H$ , segundo a relação (3):

$$\frac{H}{D} > 10 \quad (3)$$

### 3.2 MODELAGEM DO PROCESSO DE ESCAVAÇÃO

Durante a construção, quando a face do túnel está avançando, o sistema de suporte é usualmente instalado a uma distância limitada da face. Essa distância, chamada de comprimento não suportado  $d_0$ , que se refere ao início de cada ciclo de escavação, é mostrada na Figura 2 (a). Para um passo de escavação, a face do túnel avança e assume uma nova posição, mostrada na Figura 2 (b). Devido a esse passo de escavação, há uma mudança no campo de tensões, com muito da carga redistribuída transferida para o suporte do túnel já instalado, particularmente para a última seção do suporte instalado. Uma significativa porção da carga também é transferida para o maciço não escavado adiante da face, a qual não é comumente considerada no projeto. Essa redistribuição da carga causa um padrão de movimentos de massa dentro do maciço. A seguir, uma nova seção de suporte é instalada, como mostra a Figura 2 (c), e o ciclo de construção se repete (HANAFY; EMERY, 1980, 1982 apud Couto (2011)).

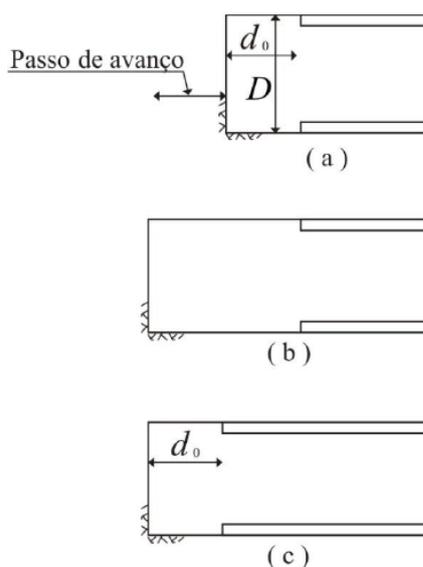


Figura 2: (a) Revestimento colocado a uma distancia  $d_0$  da face de escavação; (b) Avanço da face de escavação; (c) Avanço do revestimento até a distancia  $d_0$  da nova face. (HANAFY; EMERY, 1980, 1982 apud Cuoto (2011)).

### 3.3 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE SUPORTES DE TÚNEIS

Para projetar um túnel tem que se levar em consideração as seguintes etapas: reconhecimento geológico do local, determinação das tensões in situ e as características do maciço, escolha do

método de escavação, escolha de um modelo mecânico (método de cálculo), conceito de segurança e hipóteses de ruptura, escavação do túnel e instrumentação.

A Associação Francesa de Túneis e do Espaço Subterrâneo (AFTES, 2001), em suas recomendações sobre o método Convergência-Confinamento, classifica os métodos de dimensionamento de suportes em quatro tipos:

- a) Métodos puramente empíricos, que indicam o tipo de suporte mais apropriado para uma situação determinada, segundo a classificação geotécnica do sistema;
- b) Métodos que determinam a carga atuante no suporte, independentemente do tipo e da deformação deste;
- c) Métodos de projeto de suporte, que consideram as cargas exercidas pelo maciço como um dado de entrada, mas levam em conta a rigidez e a deformação do revestimento e as reações do maciço circundante;
- d) Métodos mais recentes, que levam em consideração a interação maciço-revestimento.

Nas próximas seções, apresenta-se uma breve revisão de alguns dos métodos.

### 3.3.1 Métodos empíricos

Os métodos empíricos consistem em reproduzir tipos de revestimentos que se mostraram eficientes em condições parecidas com as do projeto em estudo. Assim, algumas obras obtêm o status de “obras de referência”. Nesse caso, a “arte do engenheiro” é baseada em referências bem documentadas e em uma avaliação “mais ou menos parecida”. Essas referências constituem os dados geométricos do problema, como a profundidade e a largura do túnel, assim como as condições geológicas e geomecânicas.

Esses procedimentos e ensaios devem ser avaliados de forma quantitativa, em vez de se limitarem a descrições puramente qualitativas,

Para caracterizar as condições geológicas e geomecânicas da área da obra subterrânea, várias classificações de maciços rochosos têm sido propostas. A mais utilizada é o sistema *Rock Mass Rating (RMR)*, proposto por Bieniawski (1989), e o sistema Q de Barton (1974). Eles atribuem uma nota ao maciço rochoso baseada em parâmetros quantitativos. De acordo com a nota obtida se recomenda um tipo específico de revestimento.

Estes métodos têm o mérito de introduzir a necessidade de uma descrição quantitativa do maciço rochoso. Mas eles estão baseados em casos históricos, cuja relevância não foi estudada, então tendem a se repetir os erros do passado. Embora sejam empregados correntemente, são recomendáveis apenas na fase de estudo do projeto.

### 3.3.2 Métodos que levam em consideração a interação maciço-revestimento

#### 3.3.2.1 Métodos simplificados

Os métodos simplificados são baseados em modelos analíticos, que contêm hipóteses restritivas, mas que permitem, ao projetista, com um conjunto pequeno de parâmetros na fase preliminar do projeto, fazer escolhas quanto ao modo de escavação e ao tipo de suporte a ser usado. Nas seções seguintes, são apresentados os principais conceitos dos mais importantes métodos simplificados. Muitos autores, quando desejam classificar um método como simplificado, usam a expressão “método do tipo convergência-confinamento” porque o uso das curvas de convergência e de confinamento, definidas a seguir, é a característica comum a todos esses métodos.

##### 3.3.2.1.1 Convergência-confinamento

Uma grandeza que precisa ser definida é o confinamento  $P_i$ . O confinamento  $P_i$  é a pressão que o maciço exerce sobre o suporte. A convergência  $U_i$  é a convergência associada à pressão  $P_i$ , de um ponto na parede do túnel. Lembrando a equação (1), pode-se ver a relação das grandezas na Figura 3:

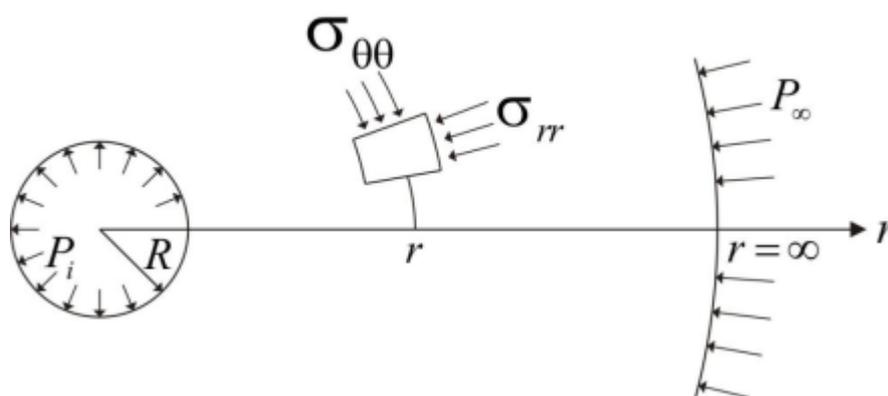


Figura 3: Modelo utilizado para cálculo da curva de convergência  $P_i \times U_i$  (Couto, 2011).

São denominadas curvas características do túnel: a curva de convergência  $C_V$ , que é a representação gráfica da relação entre o confinamento  $P_i$  e a convergência  $U_i$ , e a curva de confinamento  $C_F$ , que mostra a relação entre  $P_i$  e a convergência do suporte. As duas curvas estão representadas no diagrama da Figura 4, onde  $U_0$  é a convergência no instante da colocação do revestimento.

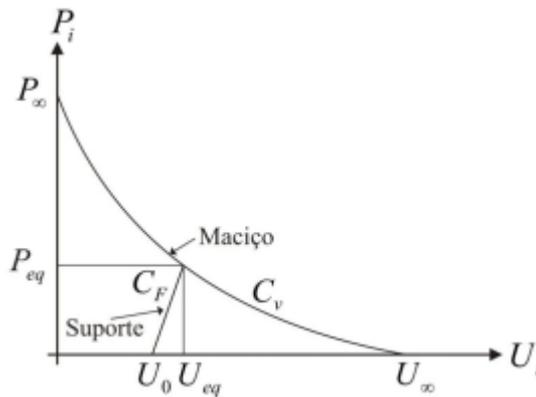


Figura 4: Equilíbrio, definição da convergência no instante da colocação do revestimento  $U_0$  (Bernaud & Rousset, 1992).

### 3.3.2.1.2 Novo Método Austríaco de Construção de Túneis

Karakus e Fowell (2004) apresentam a definição do Comitê Nacional Austríaco de Construções Subterrâneas da Associação Internacional de Túneis sobre este método: “O Novo Método Austríaco de Construção de Túneis (NATM) é um conceito que utiliza o maciço (solo ou rocha) circundante à cavidade como elemento de suporte pela ativação de um anel de maciço portante”.

A interseção das curvas de convergência e confinamento, apresentadas na Figura 5, representa a interação maciço-suporte, como já visto anteriormente.

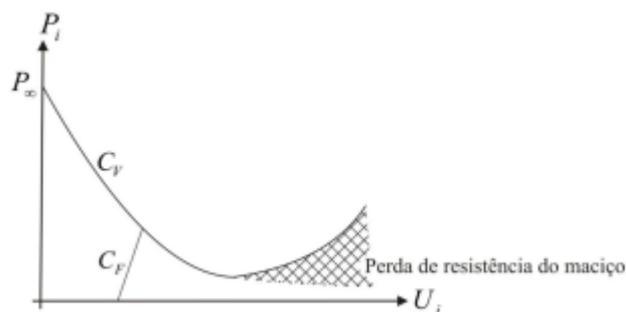


Figura 5: Curvas de interação maciço-revestimento (Möller & Vermeer, 2004).

Por um lado, uma curva de convergência muito íngreme, com um mínimo baixo, indica um maciço rígido e resistente, que necessita uma rigidez adequada do suporte. Por outro lado, uma curva com pouca inclinação e com um mínimo alto corresponde a um maciço relativamente brando, que necessita de significativa resistência do suporte (Möller & Vermeer, 2004).

### 3.3.2.1.3 Método Convergência-Confinamento

A principal característica deste método é a facilidade de uso, obtida sem desprezar os mais importantes processos envolvidos na interação maciço-revestimento. Para tanto, são adotadas algumas hipóteses simplificadoras, que transformam o problema do túnel em um problema 1D (Bernaud, 1991):

- a) a seção transversal do túnel é circular;
- b) o maciço é homogêneo e isotrópico;
- c) a face do túnel é plana e vertical;
- d) o revestimento é um anel de espessura constante  $e$ , feito de um material homogêneo e isotrópico, colocado a uma distância  $d_0$  da face, como ilustra a Figura 1;
- e) o túnel é profundo o suficiente para que a variação, no campo das pressões geostáticas, no entorno da futura cavidade, seja desprezível. O campo das tensões geostáticas iniciais é descrito na equação (4):

$$\sigma^0 = -P_\infty = -\rho H \quad (4)$$

O Método Convergência-Confinamento é uma ferramenta de uso fácil, que, além de levar em conta a interação maciço-suporte, transforma o problema tridimensional descrito acima em um problema axissimétrico, com um estado plano de deformações no plano normal ao eixo do túnel. Isso é obtido com o auxílio de uma nova grandeza: a pressão fictícia  $P_i^f$ , que é a pressão interna decrescente aplicada à parede do túnel sem suporte e de comprimento infinito, simulando o avanço da face. Esse nome deve-se ao fato de que ela não atua realmente sobre a parede, é apenas um artifício, que permite passar do problema tridimensional da escavação de um túnel não suportado para um problema de deformações planas, fornecendo a mesma convergência para uma determinada distância  $z$  da face. A pressão fictícia é expressa por (5):

$$P_i^f(z) = (1 - \lambda(z))P_\infty \quad (5)$$

Onde  $\lambda$  é o parâmetro de perda de confinamento e simula a escavação, variando de 0 a 1.

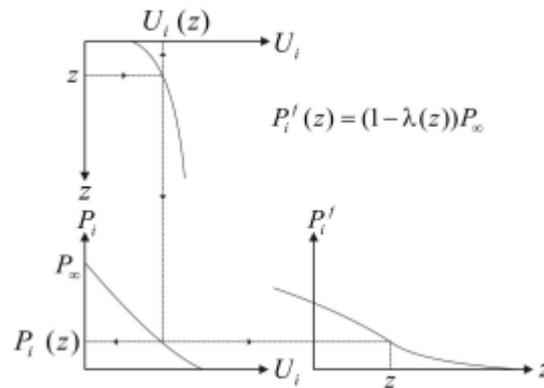


Figura 6: Relação da pressão fictícia com o parâmetro  $\lambda$  (Bernaud, 1991).

É muito simples usar o Método Convergência-Confinamento. O primeiro passo é encontrar o valor  $U_0$  a partir de  $d_0$  na curva  $U_i \times Z$  do túnel não revestido. Obtido o valor de  $U_0$ , posiciona-se a curva de confinamento no diagrama  $P_i \times U_i$ , com a finalidade de encontrar a interseção com a curva de convergência, a qual representa o equilíbrio procurado.

No processo descrito acima, é importante observar que, em nenhum momento, se faz uso da rigidez do suporte. Assim, esse método, depende de  $d_0$  e da curva de convergência unicamente.

Essa simplificação, algumas vezes, conduziu a erros importantes, que foram contra a segurança da obra (Bernaud, 1991), estimulando, com isso, o desenvolvimento de novos métodos, como o New Implicit Method (NIM) (Bernaud & Rousset, 1992), conhecido como método implícito.

#### 3.3.2.1.4 New Implicit Method (NIM)

Bernaud (1991) apresentou uma solução, no âmbito dos métodos simplificados, para o problema da interação maciço-suporte, que levou em conta a rigidez do suporte no cálculo de  $U_0$  para o caso do maciço elástico. Posteriormente, Bernaud e Rousset (1992) apresentaram a solução para o caso do maciço elastoplástico, por meio de um método que é um aperfeiçoamento do clássico Método Convergência-Confinamento.

Foi apresentada a formulação detalhada do método, para vários critérios plásticos usuais e, também, uma formulação para o maciço com comportamento viscoplástico. A palavra *Implicit* refere-se ao fato de que o cálculo de  $U_0$  depende de  $U_{eq}$  e vice-versa.

No Método Convergência-Confinamento clássico, a rigidez  $K_s$  do suporte não é considerada e a curva  $U_i(z)$  refere-se à convergência de um túnel não suportado. A Figura 7 ilustra esse princípio, mostrando a variação do perfil de  $U_i(z)$  com  $K_s$  para duas situações.

Na primeira, as curvas  $U_i(z)$ , obtidas por cálculos numéricos em elementos finitos e axissimetria, mostram convergências menores para valores maiores de  $K_s$ . Na segunda, a curva  $U_i(z)$ , obtida pelo Método Convergência-Confinamento, não varia com  $K_s$  no trecho não suportado do túnel.

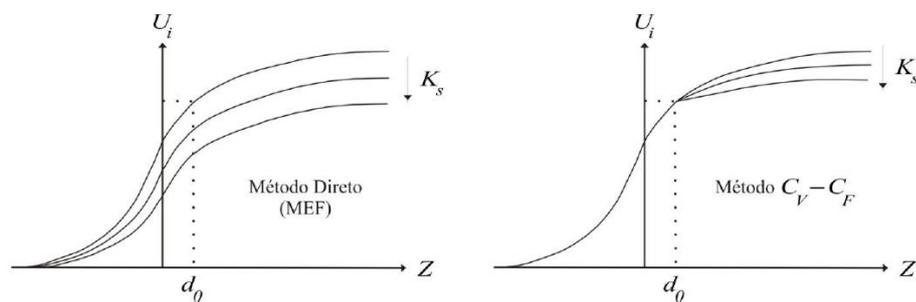


Figura 7: Influência qualitativa da rigidez do suporte no perfil da convergência (Bernaud & Rousset, 1992).

O NIM obtém a curva de convergência do túnel suportado por meio de uma simples transformação geométrica da curva do túnel não suportado. Essa transformação é alcançada com a introdução de uma nova variável, na função de forma  $a(z)$ , usada no cálculo de  $U_i(z)$ . Essa variável depende de  $K_s$  e do critério de plasticidade

Em resumo, no NIM, o valor de  $U_0$  depende também da rigidez do revestimento.

### 3.3.2.2 Métodos de Análise Numérica

Os métodos numéricos, em engenharia civil, permitem a análise de estruturas complexas. São métodos aproximados que possibilitam a resolução do conjunto de equações diferenciais ao qual um meio em equilíbrio deve satisfazer. Os mais conhecidos são: o método das diferenças finitas, o método dos elementos de contorno e o método dos elementos finitos sendo este último o mais usual. No caso de túneis, uma análise rigorosa da interação maciço-revestimento é possível com uma modelagem numérica. Vários parâmetros podem ser levados em consideração, como, por exemplo: a profundidade do túnel, a geometria do túnel, a geometria do suporte com suas equações constitutivas, a geometria das várias unidades

geomecânicas identificadas no entorno do túnel com suas equações constitutivas, as fases de escavação e instalação do suporte, etc.

#### 3.3.2.2.1 Análises bidimensionais

As análises bidimensionais podem ser de dois tipos: deformações planas e axissimétricas.

As análises em deformações planas consistem em análises de seções transversais de maior interesse no processo construtivo, considerando-as em estado plano de deformações. Em tais análises, a carga pode ser anisotrópica. A geometria da abertura e o comportamento do maciço podem ser quaisquer. Considera-se que, antes de ser colocado o suporte, atua na parede do túnel uma pressão fictícia com valor entre  $P_\infty$  (pressão geostática) e zero, e que a pressão no instante da colocação do revestimento corresponde a um deslocamento radial  $U_0$ . A pressão fictícia do momento da colocação do suporte é calculada a partir de  $U_0$ , o qual foi obtido de leituras de instrumentação ou calculado pelos métodos simplificados, sendo o NIM o método mais adequado para esse fim.

Análises axissimétricas podem ser utilizadas quando o caso se adapta às seguintes hipóteses (Bernaud, 1991):

- Sobre o maciço: túnel com geometria circular, face do túnel plana e ortogonal ao eixo, maciço homogêneo e comportamento isótropo.
- Sobre o revestimento: extremidade do revestimento plana e ortogonal ao eixo, espessura constante, material homogêneo e comportamento isótropo.
- Sobre as tensões: campo de tensões iniciais é geostático

As análises numéricas bidimensionais axissimétricas modelam o processo de escavação de forma realista, quando estas condições de axissimetria são respeitadas.

#### 3.3.2.2.2 Análises tridimensionais

As análises numéricas tridimensionais são as que modelam com precisão o processo de escavação e colocação do revestimento.

O problema de uma análise tridimensional, além do maior tempo de processamento e maior exigência de hardware, é que utiliza malhas que, em situações complexas (galerias de conexão entre túneis paralelos, estações, poços de ventilação, etc.), são de difícil construção.

## 4 LEI CONSTITUTIVA DO MACIÇO

Neste trabalho, em um primeiro caso, o maciço é considerado elástico linear e em um segundo caso o maciço é não linear apresentando um comportamento viscoplástico.

### 4.1 VISCOPLASTICIDADE

O comportamento elastoviscoplastico é estudado em transformação infinitesimal.

A descrição deste comportamento revela dois conceitos fundamentais: o domínio da elasticidade do material e a regra de fluxo viscoplastica que descreve a evolução do tensor de tensões viscoplasticas.

A formulação em elastoviscoplasticidade está baseada na decomposição do tensor das deformações totais, equação (6):

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^{vp} + \underline{\underline{\varepsilon}}^0 \quad (6)$$

Onde  $\underline{\underline{\varepsilon}}^e$ ,  $\underline{\underline{\varepsilon}}^{vp}$  e  $\underline{\underline{\varepsilon}}^0$  correspondem respectivamente aos tensores de deformação elástica, viscoplastica e inicial.

A relação entre a tensão e deformação, é expressa pela Lei de Hooke na equação (7):

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{D}} \cdot (\underline{\underline{\varepsilon}} - \underline{\underline{\varepsilon}}^{vp} - \underline{\underline{\varepsilon}}^0) + \underline{\underline{\sigma}}^0 \quad (7)$$

Onde  $\underline{\underline{\sigma}}^0$  representa ao vetor das tensões iniciais.

O conhecimento da lei de evolução temporal da deformação viscoplastica é necessário quando a tensão deixa de estar no domínio elástico.

## 4.1.1 Regra de fluxo

### 4.1.1.1 Plasticidade

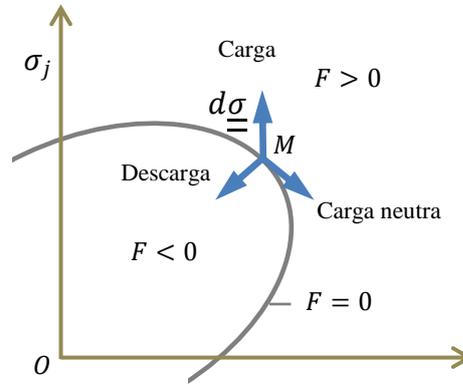


Figura 8: Carga e descarga na plasticidade.

Em um ponto  $M$ , as deformações plásticas se desenvolvem unicamente se o critério de plasticidade  $F(\underline{\underline{\sigma}})$  é atingido. No caso em que o potencial de plasticidade for igual ao critério de plasticidade, então o material é associativo. Em plasticidade perfeita, em um ponto regular da fronteira plástica, a regra de fluxo plástico se escreve:

$$\text{Em } M \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Se } F(\underline{\underline{\sigma}}) = 0 \text{ e } \frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}}; \dot{\underline{\underline{\sigma}}} > 0 \text{ então } \underline{\underline{\varepsilon}}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \text{ com } \lambda > 0 \\ \text{Se } \left[ \begin{array}{l} F(\underline{\underline{\sigma}}) < 0 \text{ ou} \\ F(\underline{\underline{\sigma}}) = 0 \text{ e } \frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}}; \dot{\underline{\underline{\sigma}}} \leq 0 \end{array} \right. \text{ então } \underline{\underline{\varepsilon}}^p = 0 \end{array} \right.$$

### 4.1.1.2 Viscoplasticidade

No estudo do estado de tensão em um ponto do material elastoviscoplastico, podem surgir as seguintes situações:

Se  $\underline{\underline{\sigma}}$  está no interior do domínio elástico, então  $F(\underline{\underline{\sigma}}) < 0$  e:

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}^e} \quad (8)$$

A taxa de deformação total é puramente elástica, como indica a equação (8).

Se  $\underline{\underline{\sigma}}$  está no exterior ou na fronteira do domínio elástico, então  $F(\underline{\underline{\sigma}}) \geq 0$  e:

$$\underline{\dot{\underline{\varepsilon}}} = \underline{\dot{\underline{\varepsilon}}}^e + \underline{\dot{\underline{\varepsilon}}}^{vp} \quad (9)$$

A taxa de deformação total é a soma de uma parte elástica e uma parte viscoplástica conforme a equação (9).

A taxa de deformação viscoplástica é escrita como uma lei de evolução expressa na equação (10):

$$\underline{\dot{\underline{\varepsilon}}}^{vp} = \underline{g}(\underline{\underline{\sigma}}) \quad (10)$$

A função  $\underline{g}$  é nula quando  $F(\underline{\underline{\sigma}}) < 0$ .

#### 4.1.2 Lei de comportamento viscoplástico

Apresenta-se o modelo reológico utilizado neste trabalho. A lei da evolução viscoplástica, descrita nas equações (11) e (12) estão em conformidade com a formulação dada por Zienkiewicz & Corneau (1974):

$$\underline{\dot{\underline{\varepsilon}}}^{vp} = \frac{1}{\eta} \left\langle \frac{F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha)}{F_0} \right\rangle^n \frac{\partial G(\underline{\underline{\sigma}})}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \quad (11)$$

$$\dot{\alpha} = \left\| \underline{\dot{\underline{\varepsilon}}}^{vp} \right\| \quad (12)$$

Onde:

$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha)$  é o critério de viscoplasticidade;

$G(\underline{\underline{\sigma}})$  é o potencial viscoplástico;

$\dot{\alpha}$  é a taxa do parâmetro de endurecimento isotrópico;

$\eta, n$  são constantes de viscosidade; e

$F_0$  é a tensão de referência.

#### 4.1.3 Caracterização dos maciços viscoplásticos

De acordo com Rousset (1988) e Tchiye (1995), vários tipos de rochas apresentam efeitos diferidos sobre solicitações constantes. A evolução das deformações e relaxação das tensões ao longo do tempo são fenômenos importantes na geotecnia. O comportamento a longo prazo

de estruturas subterrâneas sob carga constante, por exemplo, é de interesse para o estudo da estabilidade.

Estes efeitos diferidos são principalmente devido à viscosidade do material, e parte destes efeitos podem ser atribuídos à redistribuição da poro-pressão. A viscoplasticidade é estudada experimentalmente a partir de um ensaio de fluência triaxial a longo prazo, em condições não drenadas.

#### 4.1.3.1 Ensaio de fluência triaxial

Em um ensaio de fluência triaxial não drenado, para um estado de tensões dado, o corpo de prova é submetido a deformação diferida por um longo período. Em alguns casos, as deformações se estabilizam no final de um certo tempo; em outros, acabam na ruptura. (Flavigny (1984) apud Rousset (1988)).

No ensaio triaxial:

$P$  é a pressão de confinamento, indicada na Figura 9;

$Q$  a tensão axial exercida pelo pistão, indicada na Figura 9, e;

$Q-P$  é a tensão desviadora aplicada ao corpo de prova.

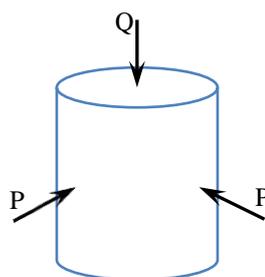


Figura 9: Esquema de um ensaio triaxial.

No ensaio de fluência a tensão  $P$  é mantida constante ao longo de todo o ensaio, enquanto que a tensão  $Q$  aumenta no começo de cada etapa até o valor desejado de  $Q-P$ , logo é mantida constante ao longo de cada etapa, como mostra a Figura 11. Durante o ensaio de longo prazo são medidos:

- a tensão axial  $Q$ ,
- o confinamento  $P$ ; e

- a deformação axial  $\epsilon_a$ .

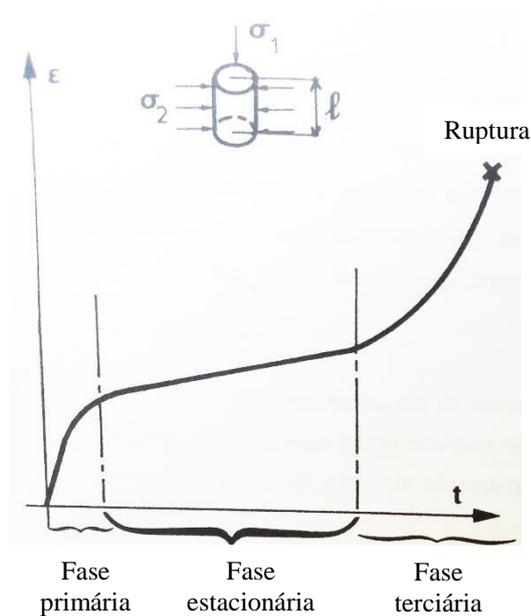


Figura 10: Ensaio de fluência triaxial (Rousset, 1988).

A Figura 11, mostra um exemplo de ensaio de fluência triaxial na argila de Boom (Mol, na Bélgica, a 230 m de profundidade), e apresenta alguns resultados típicos (Rousset, 1988):

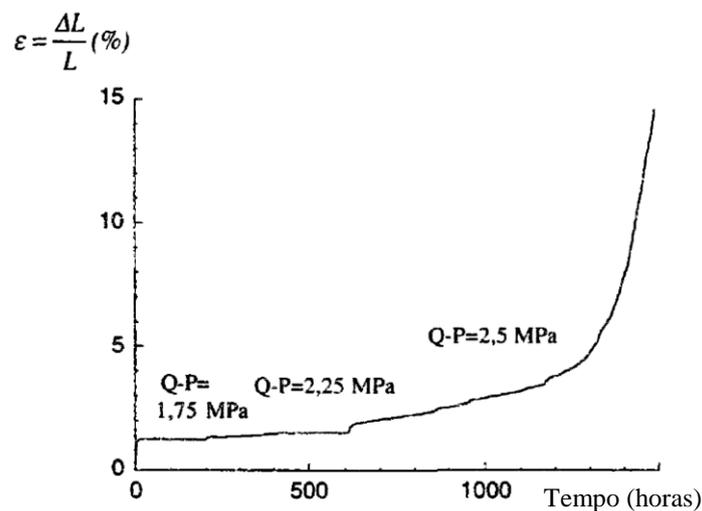


Figura 11: Resultado de um ensaio de fluência (Rousset, 1988).

- Para uma tensão desviadora baixa (1,75 MPa), a deformação aumenta rapidamente depois de algumas horas e retarda a sua evolução, para finalmente estabilizar após alguns dias. Esta fase é chamada de fluência primária.
- Para uma tensão desviadora média (2,25 MPa), existe uma fase inicial de rápido aumento da deformação, seguida de uma desaceleração, que evolue a uma velocidade

sensivelmente constante. Isto corresponde a uma nova fase de fluência chamada de secundária e conduz a deformações relativamente grandes.

- Para uma tensão desviadora alta (2,75 MPa), a fase secundária tem uma velocidade de deformação muito maior do que na fase anterior. Após duas semanas, é observada uma aceleração da deformação. Esta fase é a fluência terciária, e conduz à ruptura do corpo de prova.

#### 4.1.3.2 Viscosidade do material

Considerando um material perfeitamente viscoplástico, os parâmetros que determinam a lei do comportamento viscoelástico são:

- a viscosidade  $\eta$
- o critério viscoplástico  $F$ , igual ao potencial viscoplástico.

Para os ensaios de longo prazo, se observa que na fluência secundária, a taxa de deformação depende linearmente da tensão desviadora. A Figura 11 apresenta a evolução da deformação axial ao longo do tempo para o ensaio, onde se pode calcular a taxa de deformação viscoplástica em função da tensão desviadora.

Em termos de fluência triaxial, a taxa de deformação viscoplástica axial pode ser escrita, considerando o critério Tresca (Tchipy Piepi, 1995), como se mostra na equação (13):

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \frac{1}{\eta} (Q - P - 2C) \quad (13)$$

Onde  $C$  é a coesão do solo.

A equação (13) permite determinar a viscosidade  $\eta$ .

## 5 CONCRETO

### 5.1 CONCRETO COMO REVESTIMENTO DE UM TÚNEL

Os sistemas de suporte têm por objetivo oporem-se aos deslocamentos das paredes e da face do túnel. O suporte ou revestimento fornece uma superfície que restringe o deslocamento do maciço pela instalação de um elemento estrutural ao longo do perímetro do túnel.

Na escolha do sistema de revestimento, o uso da estrutura tem uma influencia importante, mas a escolha final será resultado das condições esperadas (tensões e deformações) do maciço e o custo final da obra.

O principal objetivo do revestimento estrutural é garantir a estabilidade do túnel. Também o revestimento oferece proteção contra eventuais rupturas locais.

#### 5.1.1 Concreto projetado

O concreto projetado foi inventado nos Estados Unidos no início do século 20, e desde então tem sido usado como uma camada de proteção para corrosão, fogo e também para revestimento e suporte de túneis, taludes, etc. Foi usado pela primeira vez como suporte estrutural em 1954, em um túnel de desvio de 8m de diâmetro, em uma usina hidroelétrica austríaca (Sauer, 2003). A utilização do concreto projetado como revestimento de túneis se desenvolveu paralelamente ao « New Austrian Tunnelling Method- NATM » (Novo Método Austríaco de Túneis).

O concreto projetado é uma mistura de areia, brita, cimento Portland e aditivos aceleradores de pega, bem homogeneizados, lançado nas paredes do túnel por uma máquina de projeção. Esse impulso é dado por meio de uma corrente de ar comprimido ou uma bomba, que transporta a mistura em alta velocidade através de um tubo flexível, o mangote, até que a mistura atinja por projeção a superfície a ser estabilizada (Gomes, 2006).

O objetivo de colocar o mais rapidamente possível o concreto projetado é limitar a convergência da escavação, assim como evitar qualquer relaxação excessiva do maciço, que

reduziria a resistência e limitaria a contribuição do maciço à estabilidade da obra (AFTES, 2000).

O concreto projetado, com uma espessura variando normalmente entre 100 e 500 mm, tem como vantagem:

- a boa adaptação a diferentes tipos de superfície e características do maciço e não necessita de forma;
- a ligação ao maciço em todo o contorno da superfície escavada, normalmente irregular, e que garante que o suporte se deforme na mesma medida que o maciço;
- a possibilidade de combinação com outros tipos de suporte.

Concreto projetado é hoje a técnica dominante para suporte de EM (escavação mineira). É conveniente em túneis com variação de seção, interseções, trechos curtos, cavernas e lugares onde for difícil a introdução de formas ou peças pré-moldadas.

O concreto projetado apresenta propriedades mecânicas similares ao concreto moldado in situ.



Figura 12: Revestimento de concreto projetado no túnel da Estação Jardim São Paulo (Comitê Brasileiro de Túneis, 2006).

### 5.1.2 Concreto pré-moldado

O revestimento de concreto pré-moldado é a forma mais comum de suporte para túneis de solos moles. Este sistema é conveniente em casos de escavação mecanizada, como por exemplo utilizando uma tuneladora (TBM: Tunnel Boring Machine), onde é requerido um progresso rápido em comprimentos longos. Para estes casos as peças de concreto pré-moldado oferecem um método econômico e eficiente como sistema de revestimento.

Centenas de quilômetros de túneis segmentados têm sido construídos no mundo usando esta tecnologia.

O projeto de um anel pré-moldado não só exige uma análise estrutural para as cargas do maciço, também exige considerar operações críticas que muitas vezes podem ser os fatores determinantes do projeto, como o processo de fabricação, armazenagem, entrega, manipulação e montagem, bem como as tensões geradas por parafusos e funcionamento das juntas. Estes detalhes não devem ser considerados como um problema a ser tratado posteriormente, mas devem ser considerados desde o início do projeto (The British Tunneling Society and The Institution of Civil Engineers, 2004).

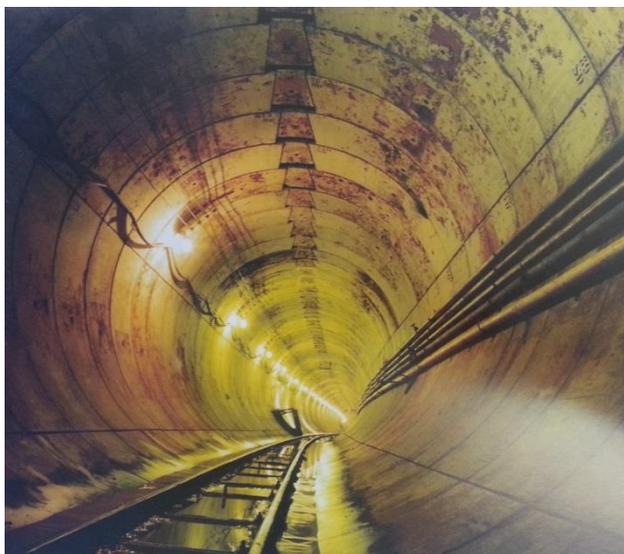


Figura 13: Revestimento de concreto pré-moldado no túnel da linha 2 do Metrô de São Paulo (Comitê Brasileiro de Túneis, 2006).

## 5.2 COMPORTAMENTO AO LONGO DO TEMPO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

### 5.2.1 Comportamento diferido do concreto

Os materiais viscoelásticos apresentam uma relação tensão-deformação dependente do tempo. Existem deformações imediatas, que provêm do modelo elástico, e deformações não imediatas, que correspondem ao comportamento viscoso e à retração. No concreto estas deformações se desenvolvem lentamente no decorrer do tempo.

No concreto estrutural é importante considerar os efeitos dependentes do tempo porque as deformações geradas por fluência e retração têm a mesma ordem de grandeza das deformações imediatas, em níveis usuais de tensão.

Este fenômeno é mais pronunciado, nas primeiras idades, quando aparecem as tensões.

O concreto possui características que o transformam em um material com comportamento altamente dependente tanto dos carregamentos nele aplicados, quanto do tempo decorrente e do ambiente no qual está inserido, devido principalmente às questões de umidade e temperatura. Desta forma, segundo o Código Modelo *fib* 2010 (Fédération Internationale du Béton, 2012), pode-se considerar que a deformação total no tempo  $t$ , de uma peça de concreto uniaxialmente carregada a partir de um tempo  $t'$  com uma tensão constante  $\sigma_c(t')$ , pode ser expressa segundo a equação (14):

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{ci}(t') + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t) \quad (14)$$

Onde:

$\varepsilon_{ci}(t')$  é a deformação inicial, também chamada de instantânea, devido ao carregamento,

$\varepsilon_{cc}(t)$  é a deformação por fluência, resultante para um tempo  $t > t'$ ,

$\varepsilon_{cs}(t)$  é a deformação por retração; e

$\varepsilon_{cT}(t)$  é a deformação térmica.

### 5.2.2 Lei do tipo integral para a fluência

A análise das deformações por fluência, decorrentes de tensões em diferentes instantes, por meio da viscoelasticidade, pode ser realizada, normalmente, pela soma das mesmas, dadas pelo princípio de superposição dos efeitos (Creus, 1986). No entanto, o Código Modelo *fib* 2010 afirma que a consideração da superposição linear de deformações no concreto é aceita quando os níveis de tensões, aplicados à estrutura, são menores que 40% de resistência média do material.

Para simular numericamente os efeitos da fluência e do envelhecimento das estruturas de concreto, pesquisadores têm proposto formulações viscoelásticas. Bazant (1988) apresentou várias propostas que incluem: um eficiente algoritmo para obtenção da história de tensões no concreto, dado um determinado histórico de deformações prescrito, em um material com

viscoelasticidade linear dependente do tempo, avaliação da taxa de fluência para concretos com envelhecimento baseados na cadeia de Maxwell e uma metodologia para avaliar o espectro tempo-dependente de um modelo de cadeia de Kelvin a partir de dados de fluência fornecidos para o concreto. O método foi baseado em séries expandidas de Dirichlet da taxa de fluência, como uma função da duração do teste de fluência. O tempo de retardação fornece uma regra para a taxa de fluência, a qual é necessária para a análise de grandes sistemas estruturais.

Normalmente, as formulações numéricas para avaliação das deformações dependentes do tempo do concreto levam em consideração dois efeitos distintos, mas que estão intimamente ligados: fluência e retração. Diversos trabalhos apresentam modelos com resultados bastante satisfatórios para ambos os problemas. O Código Modelo *fib* 2010 apresenta expressões que simulam, numericamente, ambos os efeitos sobre as estruturas.

Somando as parcelas de um histórico de deformações, devido a todos os pequenos incrementos de tensões após um tempo  $t$ , uma das formas de escrever a lei da fluência para tensões uniaxiais é expressa na equação (15).

$$\varepsilon(t) - \varepsilon_0(t) = \int_0^t J(t, t') \cdot d\sigma(t') \quad (15)$$

Onde:

$t$  é a idade atual do concreto, em dias,

$t'$  é a idade do concreto no início da aplicação de carga, em dias,

$\sigma$  é a tensão total,

$\varepsilon$  é a deformação total,

$\varepsilon_0$  é a deformação inelástica, compreendendo entre elas, a retração e a dilatação térmica; e

$J(t, t')$  é a função de fluência, ou seja, deformação causada por uma tensão unitária constante atuando em um intervalo de tempo entre  $t'$  e  $t$ .

O termo  $t'$  é fundamental para inclusão de efeitos de envelhecimento, permitindo uma resposta correta do material de acordo com suas propriedades estruturais. Estas, por sua vez,

variam de acordo com a idade de fabricação do material, além do tempo de exposição a agentes agressivos e fatores climáticos (umidade e temperatura).

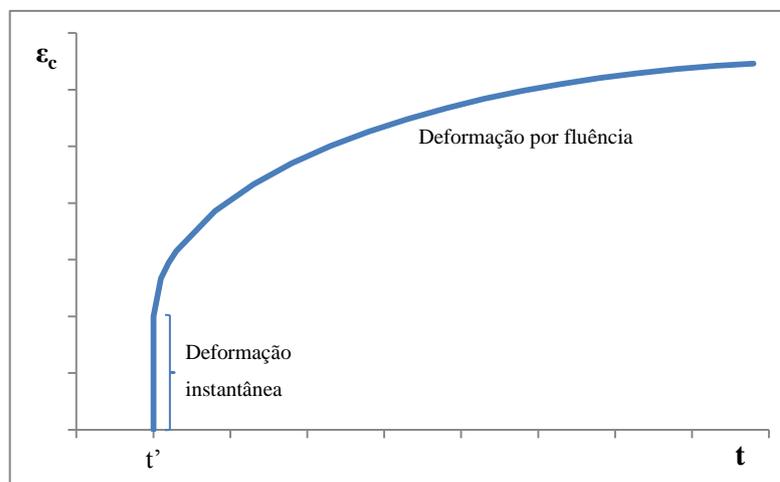


Figura 14: Deformação por fluência para uma tensão constante aplicada em  $t'$ .

### 5.2.3 Retração do concreto

De acordo com Montoya (2001) denomina-se retração, em inglês, *shrinkage*, ao fenômeno pelo qual o concreto reduz o seu volume, pela perda gradual de água na massa do concreto, durante o processo de endurecimento.

Os fatores que influem na retração são diversos, como: o tipo e classe de cimento, a finura dos grãos de cimento, a presença de agregados finos no concreto, a quantidade de água na massa, umidade, temperatura do ambiente, condições de cura. A retração aumenta quando diminui a espessura da peça em contato com o ambiente, por ser o efeito de dessecação maior em relação ao volume da peça.

A retração não é uma força, é uma deformação imposta independente da tensão atuante. Provoca tensões de tração, e conseqüentemente fissuras, no caso em que o livre encurtamento da peça de concreto esteja impedido.

A proteção e cura prolongada das superfícies, especialmente em tempo seco, são fundamentais para diminuir a retração nas primeiras idades.

A deformação por retração ao longo do tempo apresenta uma curva como a que se mostra na Figura 15.

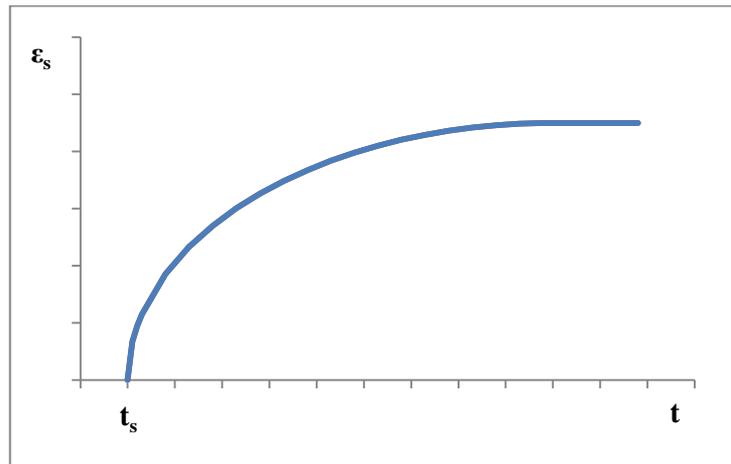


Figura 15: Deformação por retração ao longo do tempo.

Na formulação numérica, a retração é considerada como uma deformação imposta, como foi observada na equação (14). Então, a deformação por retração é subtraída da deformação total.

Para calcular a deformação por retração são consideradas as recomendações do Código Modelo *fib* 2010. As equações são apresentadas abaixo.

A retração total pode ser calculada pela equação (16):

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cas}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s) \quad (16)$$

Onde a retração é dividida em retração autógena:

$$\varepsilon_{cas}(t) = \varepsilon_{cas0}(f_{cm}) \cdot \beta_{as}(t) \quad (17)$$

E em retração por secagem  $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ :

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s) \quad (18)$$

Onde:

$t_s$  é a idade do concreto no início da consideração da retração, em dias; e

$t - t_s$  é a duração da secagem, em dias,

A parcela de retração autógena pode ser calculada pelo coeficiente de retração autógena  $\varepsilon_{cas0}(f_{cm})$  na equação (19) e a função de tempo  $\beta_{as}(t)$  na equação (20):

$$\varepsilon_{cas0}(f_{cm}) = -\alpha_{as} \left( \frac{f_{cm}/10}{6+f_{cm}/10} \right)^{2,5} \cdot 10^{-6} \quad (19)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0,2 \cdot \sqrt{t}} \quad (20)$$

Onde:

$f_{cm}$  é a resistência média à compressão do concreto aos 28 dias (MPa); e

$\alpha_{as}$  é o coeficiente que depende do tipo de cimento, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Coeficientes relacionados ao tipo de cimento

Classe de cimento	$\alpha_{as}$	$\alpha_{ds1}$	$\alpha_{ds2}$
32,5 N	800	3	0,013
32,5 R, 42,5 N	700	4	0,012
42,5 R; 52,5 N; 52,5 R	600	6	0,012

A parcela de retração por secagem é calculada pelo coeficiente de retração por secagem  $\varepsilon_{cds0}(f_{cm})$  na equação (21), o coeficiente  $\beta_{RH}(RH)$  que leva em conta o efeito da umidade relativa do ambiente na equação (22) e a função  $\beta_{ds}(t - t_s)$  descrevendo o desenvolvimento no tempo na equação (23).

$$\varepsilon_{cds0}(f_{cm}) = [(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm}}] \cdot 10^{-6} \quad (21)$$

$$\beta_{RH}(RH) = \begin{cases} -1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{100}\right)^3\right] & \text{para } 40 \leq RH < 99\% \cdot \beta_{s1} \\ 0,25 & \text{para } RH \geq 99\% \cdot \beta_{s1} \end{cases} \quad (22)$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left(\frac{(t - t_s)}{0,035 \cdot h^2 + (t - t_s)}\right)^{0,5} \quad (23)$$

$$\beta_{s1} = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,1} \leq 1 \quad (24)$$

Onde:

$\alpha_{ds1}$ ,  $\alpha_{ds2}$  são coeficientes que dependem do tipo de cimento, dados na Tabela 1,

$RH$  é a umidade relativa da atmosfera, em %,

$\beta_{s1}$  é um coeficiente que depende da resistência do concreto; e

$h = 2A_c/u$ , é a espessura fictícia da peça, em mm, onde  $A_c$  é a área da seção transversal e  $u$  é o perímetro em contato com a atmosfera.

### 5.2.4 Formulações viscoelásticas: modelos reológicos básicos

De acordo com Creus (1986) os modelos viscoelásticos são formulados a partir da união de dois elementos reológicos básicos: elementos elásticos (molas) e viscosos (amortecedores).

Para o elemento de mola, a relação tensão-deformação é dada pela lei de Hooke:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) \quad (25)$$

Admite-se uma resposta instantânea e totalmente reversível. No ensaio de fluência, a uma tensão inicial  $\sigma_0$  constante, a deformação será  $\sigma_0/E$ , constante ao longo do tempo. E no ensaio de relaxação, a uma deformação inicial  $\varepsilon_0$  constante, a tensão será  $\varepsilon_0 E$ , constante ao longo do tempo.

No caso do amortecedor, considera-se a lei da viscosidade de Newton:

$$\sigma(t) = \eta \dot{\varepsilon}(t) \quad (26)$$

sendo  $\eta$  o coeficiente de viscosidade e  $\dot{\varepsilon}$  a taxa de deformação  $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$ . A taxa de deformação é proporcional à tensão.

As molas e amortecedores podem ser combinados para obter diferentes configurações. Por exemplo: a combinação de uma mola com um amortecedor em série corresponde ao modelo de Maxwell e em paralelo corresponde ao modelo de Kelvin, como mostra a Figura 16.



Figura 16: (a) Modelo de Maxwell; (b) Modelo de Kelvin

Na Tabela 2 apresentam-se as equações de equilíbrio, de compatibilidade e as relações constitutivas da mola e do amortecedor.

Tabela 2: Equações e relações constitutivas dos modelos de Maxwell e Kelvin (Creus, 1986).

	<b>Modelo de Maxwell</b>	<b>Modelo de Kelvin</b>
Equação de equilíbrio	$\sigma(t) = \sigma_E(t) = \sigma_\eta(t)$	$\sigma(t) = \sigma_E(t) + \sigma_\eta(t)$
Equação de compatibilidade	$\varepsilon(t) = \varepsilon_E(t) + \varepsilon_\eta(t)$	$\varepsilon(t) = \varepsilon_E(t) = \varepsilon_\eta(t)$
Relação constitutiva da mola	$\sigma_E(t) = E\varepsilon_E(t)$	$\sigma_E(t) = E\varepsilon_E(t)$
Relação constitutiva do amortecedor	$\sigma_\eta(t) = \eta\dot{\varepsilon}_\eta(t)$	$\sigma_\eta(t) = \eta\dot{\varepsilon}_\eta(t)$

Os modelos generalizados são produto de combinações destes modelos citados acima. Por exemplo: o modelo de Maxwell generalizado é composto pela união em paralelo de vários elementos de Maxwell; e o modelo de Kelvin generalizado é composto pela união em série de vários elementos de Kelvin.

### 5.2.5 Cadeia de Maxwell Generalizada

De acordo com Pande (1977), no modelo das camadas superpostas supõe-se que o sólido analisado é composto por várias camadas, superpostas entre si, sendo que cada camada possui propriedades mecânicas diferentes. As camadas sofrem a mesma deformação total produzindo um campo de tensão diferente, que contribui para o campo de tensão total, conforme a sua espessura  $e_i$ , como se indica na Figura 17:

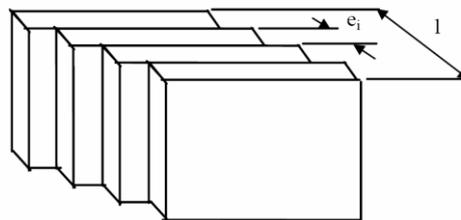


Figura 17: Modelo das camadas superpostas.

O modelo da cadeia de Maxwell consiste em  $n$  elementos de Maxwell combinados em paralelo, como se mostra na Figura 18, e representa conjuntamente as respostas instantâneas e diferidas.

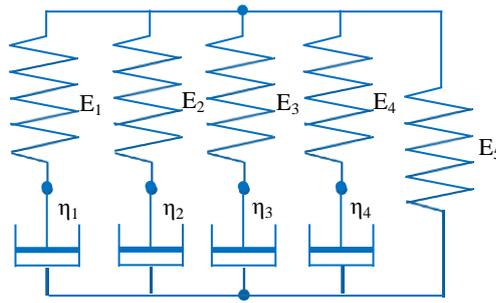


Figura 18: Modelo de Maxwell Generalizado.

No procedimento do uso da cadeia de Maxwell generalizada é previsto um espectro de relaxação dependente do tempo. A lei de tensão-deformação baseada em uma cadeia de Maxwell é expressa então conforme à equação (27).

$$\sigma = \sum_{\mu=1}^n \sigma_{\mu}, \quad \dot{\varepsilon} = \left( \dot{\sigma}_{\mu} + \frac{\sigma_{\mu}}{\tau_{\mu}} \right) / E_{\mu}(t), \quad \text{para } (\mu = 1, \dots, n) \quad (27)$$

Onde:

$\sigma_{\mu}$  é a tensão atuante na mola  $\mu$ ,

$\tau_{\mu}$  é o tempo de relaxação relacionado ao elemento  $\mu$  da cadeia,

$E_{\mu}$  é o módulo de elasticidade da mola  $\mu$ , dependente da idade  $t$  do concreto; e

$n$  é o número de elementos. Nesta dissertação adopta-se  $n=5$ .

No caso da cadeia de Maxwell, o elemento  $\mu = 5$  tem um tempo de relaxação muito grande  $\tau_5 \rightarrow \infty$ , com o propósito de simular um coeficiente de viscosidade tendendo ao infinito  $\eta_5 \rightarrow \infty$ . Esta suposição possibilita dizer que o quinto elemento da cadeia trata-se de uma mola isolada, satisfazendo a lei de Hooke e não representando comportamento viscoso. Isto permite que a deformação resulte em um valor assintótico, conforme o comportamento real do concreto.

Os demais tempos de relaxação foram escolhidos de acordo com a equação (28).

$$\tau_1 = 1, \quad \tau_{\mu} = \tau_1 \cdot 10^{\mu-1} \quad \text{para } (\mu = 2, 3 \text{ e } 4) \quad \text{e} \quad \tau_5 = \infty \quad (28)$$

Integrando-se a equação (27) quando  $\varepsilon(t)$  é uma função salto unitário, por exemplo,  $\varepsilon = 1$  para  $t \geq t'$  e  $\varepsilon = 0$  para  $t < t'$ , resulta na série de exponenciais reais, neste caso representando a função de relaxação da cadeia de Maxwell, como se mostra na equação (29)

$$R(t, t') = \sum_{\mu=1}^n E_{\mu}(t') \cdot e^{-(t-t')/\tau_{\mu}}, \quad \text{com} \quad \tau_{\mu} = \frac{\eta_{\mu}}{E_{\mu}} \quad (29)$$

Assim, na equação (29) os valores de  $E_{\mu}$  podem ser obtidos a partir de uma função  $R(t, t')$ , com valores discretos nos tempos  $t_i$  ( $t_0, t_1, \dots, t_N$ ) conhecidos. Como os dados referentes às propriedades dependentes do tempo do concreto são caracterizados normalmente pela função de fluência  $J(t, t')$ , uma conversão de  $J(t, t')$  para a função de relaxação,  $R(t, t')$ , torna-se necessária.

A obtenção de  $R(t, t')$  em função de  $J(t, t')$  foi baseada no modelo proposto por Bazant (Bazant, 1988). A função de relaxação pode ser calculada conforme a equação (31):

$$\varepsilon(t) - \varepsilon^0(t) = \int_0^t J(t, t') \cdot d\sigma(t') \quad (30)$$

$$\Delta R_i = -\left(J_{r,r} + J_{r,r-1}\right)^{-1} \sum_{s=1}^r \Delta R_s (J_{r,s} + J_{r,s-1} - J_{r-1,s} - J_{r-1,s-1}) \quad (31)$$

com  $r = 2, 3, \dots, N$ , onde:

$$\Delta R_r = R(t_r, t_0) - R(t_{r-1}, t_0);$$

$$J_{r,s} = J(t_r, t_s); \text{ e}$$

$\Delta R_1 = E(t_0)$  é o módulo de elasticidade inicial.

Para a calibração da cadeia, valores discretos de tempo foram escolhidos de forma que a função estimada estabelecesse valores adequados para cobertura de todo período que se deseja analisar. Desta forma, os passos de tempo foram escolhidos obedecendo a equação (32):

$$(t_r - t') = 10^{\left(\frac{1}{10}\right)} \cdot (t_{r-1} - t') \quad (32)$$

Os valores expressos pela equação (32) representam tempos discretos de duração de carga. Neste caso foram utilizados 30 tempos discretos, indicando três décadas de tempo em escala logarítmica e 10 passos por década, resultando em um tempo máximo de 2224 dias.

Para a escolha das idades  $t'$  de carregamento utilizou-se a equação (33). Para conseguir uma ampla representatividade do espectro de relaxação, foram adotadas oito idades de carregamento, iniciando em  $t'_1 = 2,8 \text{ dias}$ , resultando em uma idade final  $t'_8 = 8854,28 \text{ dias}$ .

$$t'_i = 10^{0,5} \cdot t'_{i-1} \quad (33)$$

Com o uso da formulação descrita acima consegue-se determinar a curva de relaxação para qualquer idade  $t'$  por meio do método dos mínimos quadrados, a partir dos pontos discretos conhecidos de  $R(t_r, t')$ , como descrito a seguir.

O método baseia-se na minimização da soma dos quadrados do desvio  $\phi$ , dada pela equação (34):

$$\phi = \sum_{i=1}^{30} [R(t_i, t') - \tilde{R}(t_i, t')]^2 + \pi \quad (34)$$

Onde  $\pi$  é o termo residual para ajuste da função (35):

$$\pi = \varpi_1 \sum_{\mu=1}^3 (E_{\mu+1} - E_{\mu})^2 + \varpi_2 \sum_{\mu=1}^2 (E_{\mu+2} - 2 \cdot E_{\mu+1} + E_{\mu})^2 \quad (35)$$

Onde  $\varpi_1$  e  $\varpi_2$  são os pesos para o termo residual, e são iguais a 0,01 e 0,08, respectivamente.

Substituindo a função de relaxação, apresentada na equação (29), na equação (34), sem o termo residual, resulta na equação (36).

$$\phi = \sum_{i=1}^{30} \left[ \sum_{\mu=1}^n E_{\mu}(t') \cdot e^{\frac{-(t-t')}{\tau_{\mu}}} - \tilde{R}(t_i, t') \right]^2 \quad (36)$$

Obtém-se  $E_{\mu}(t')$ , pela condição de minimização expressa pela equação (37).

$$\frac{\partial \phi}{\partial E_{\mu}} = 0, \text{ com } \mu = 1, \dots, 5 \quad (37)$$

A partir da equação (37) forma-se um sistema de cinco equações com cinco incógnitas, onde se encontram valores positivos de  $E_{\mu}(t')$ . A solução da equação  $j$  deste sistema é indicada na equação (38), podendo ser reescrita sob a forma da equação (39).

$$\sum_{i=1}^{30} \left[ \sum_{\mu=1}^n E_{\mu}(t') \cdot e^{\frac{-(t-t')}{\tau_{\mu}}} - \tilde{R}(t_i, t') \right] \sum_{i=1}^{30} e^{\frac{-(t-t')}{\tau_j}} = 0 \quad (38)$$

$$\sum_{i=1}^{30} \left[ \sum_{\mu=1}^n E_{\mu}(t') \cdot e^{-\left(\frac{(t-t')}{\tau_{\mu}} + \frac{(t-t')}{\tau_j}\right)} \right] = \sum_{i=1}^{30} \tilde{R}(t_i, t') e^{\frac{-(t-t')}{\tau_j}} \quad (39)$$

Matricialmente pode-se representar a equação (39) pela equação (40).

$$[A]\{E\} = \{B\} \quad (40)$$

Onde:

os termos de  $[A]$  são dados por  $A_{jk} = \sum_{i=1}^{30} e^{-\left(\frac{(t-t')}{\tau_\mu} + \frac{(t-t')}{\tau_j}\right)}$ , com  $k=1, \dots, 5$ ;

os termos de  $\{E\}$  = são dados por  $E_j = E_j(t')$ ; e

os termos de  $\{B\}$  = são dados por  $B_j = \sum_{i=1}^{30} \tilde{R}(t_i, t') \cdot e^{-\frac{(t-t')}{\tau_j}}$ .

Vale lembrar que o método prevê a utilização do termo residual, resultando nas correções apresentadas pela Tabela 3 para cada termo da matriz  $[A]$ .

Tabela 3: Correção dos elementos da matriz A.

Termo da matriz de origem	Termo final com devida correção
$A_{1,1}$	$A_{1,1} + \varpi_1 + \varpi_2$
$A_{1,2}$	$A_{1,2} - \varpi_1 + 2\varpi_2$
$A_{1,3}$	$A_{1,3} + \varpi_2$
$A_{2,1}$	$A_{2,1} - \varpi_1 - 2\varpi_2$
$A_{2,2}$	$A_{2,2} + 2\varpi_1 + 5\varpi_2$
$A_{2,3}$	$A_{2,3} - \varpi_1 - 4\varpi_2$
$A_{2,4}$	$A_{2,4} + \varpi_2$
$A_{3,1}$	$A_{3,1} + \varpi_2$
$A_{3,2}$	$A_{3,2} - \varpi_1 + 4\varpi_2$
$A_{3,3}$	$A_{3,3} + 2\varpi_1 + 5\varpi_2$
$A_{3,4}$	$A_{3,4} - \varpi_1 - 2\varpi_2$
$A_{4,3}$	$A_{4,3} - \varpi_1 - 2\varpi_2$
$A_{4,4}$	$A_{4,4} + \varpi_1 + \varpi_2$

A solução do problema apresentado resulta na obtenção dos módulos de elasticidade para cada unidade da cadeia Maxwell,  $E_\mu(t')$ , para as idades  $t'$ , nas quais são dados os pontos discretos  $\tilde{R}(t_i, t')$ .

Na necessidade de extrapolar estes valores de  $E_\mu(t')$  para qualquer idade  $t$ , deve-se proceder à interpolação apresentada pela equação (41):

$$E_\mu(t) = \frac{\{E_\mu(t'_{i-1})[\log(t'_i) - \log(t)] + E_\mu(t'_i)[\log(t) - \log(t'_{i-1})]\}}{[\log(t'_i) - \log(t'_{i-1})]} \quad (41)$$

Para  $i = 2, \dots, 8$  e  $\mu = 1, \dots, 5$ .

Assim determinam-se os coeficientes  $E_\mu$  de cada elemento da cadeia, para qualquer idade de início de carregamento e qualquer tempo de duração de carga.

A consideração do envelhecimento se dá através da atualização dos módulos de elasticidade de cada elemento da cadeia com o passar do tempo, representando uma atualização das relações constitutivas do material quando este está submetido a uma tensão constante (conforme o fluxograma da Figura 32).

### 5.2.6 Cadeia de Kelvin Generalizada

O modelo de Kelvin generalizado é composto por  $n$  elementos de Kelvin em série, como se mostra na Figura 19.

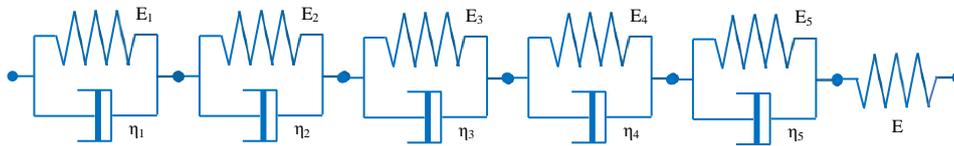


Figura 19: Modelo de Kelvin generalizado.

Este modelo facilita muito a implementação por considerar os parâmetros viscoelásticos, módulo de elasticidade  $E_\mu$  e viscosidade  $\eta_\mu$  dos elementos, independentes do tempo. Estes parâmetros calculam-se inicialmente através da calibragem de um modelo experimental (conforme o fluxograma da Figura 33), e posteriormente ficam constantes durante a análise, como na clássica viscoelasticidade linear.

O envelhecimento é considerado só na mola isolada. Este efeito instantâneo, calcula-se em função do módulo de elasticidade variável ao longo do tempo, pelo método do Código Modelo *fib* 2010, apresentado posteriormente na equação (49). Estes fatos resultam em uma maior simplificação numérica na análise e torna o modelo da cadeia de Kelvin mais vantajoso que o modelo da cadeia de Maxwell (Bazant & Prasannan, 1988).

Devido às informações disponíveis para discretizar o comportamento diferido do concreto normalmente serem apresentados por meio de dados relativos à fluência, as curvas de fluência para cada idade de carregamento são facilmente obtidas. De acordo com Bazant, para este tipo de análise, os passos de tempo,  $\Delta t_r$ , são melhores quando escolhidos valores crescentes com uma taxa de variação constante.

Adotou-se como tempos de duração de carga, para representar a função de fluência de forma adequada, os tempos discretos obtidos pela equação (42). A partir das curvas de fluência geradas pelos pontos discretizados, os valores  $E_\mu$  para cada elemento da cadeia são encontrados através do uso do método dos mínimos quadrados.

$$\Delta t_r = (t_r - t_0) = 10^{\left(\frac{1}{ndec}\right)} \cdot (t_{r-1} - t_0) \quad (42)$$

Onde:

$\Delta t_r$  é o intervalo entre os pontos discretizados, neste caso optou-se por 30 pontos ( $r=1, 2, \dots, 30$ ),

$t_r$  são os pontos referentes aos tempos discretizados ( $r=1, 2, \dots, 30$ ),

$t_0$  é a idade de início de carregamento do problema estrutural; e

$ndec$  é o número de décadas de tempo em escala logarítmica.

A equação diferencial para uma cadeia de Kelvin sem envelhecimento é dada pela equação (43).

$$E_\mu \cdot \varepsilon_\mu + \eta_\mu \cdot \dot{\varepsilon}_\mu = \sigma \quad (43)$$

Onde:

$E_\mu$  é o módulo de elasticidade do elemento  $\mu$  da cadeia,

$\eta_\mu$  é a viscosidade do elemento  $\mu$  da cadeia; e

$\varepsilon_\mu$  é a deformação do elemento  $\mu$  da cadeia.

Integrando a equação (43) para uma tensão constante  $\sigma$  aplicada em uma idade  $t'$ , em uma cadeia de  $n$  elementos Kelvin, resulta a deformação viscosa na equação (44).

$$\varepsilon_{vp}(t) = \sigma \sum_{\mu=1}^N \frac{1}{E_\mu} \cdot (1 - e^{-(t-t')/\theta_\mu}) \quad (44)$$

Onde:

$\theta_\mu$  é o tempo de retardação, dado pela equação (45).

$$\theta_\mu = \frac{\eta_\mu}{E_\mu} \quad (45)$$

Para calibração do modelo Kelvin generalizado foram considerados, neste trabalho, tempos de retardação fixos, representados pela equação (46).

$$\theta_1 = 1, \quad \theta_\mu = 10^{\mu-1} \cdot \theta_1 \quad \text{para} \quad \mu = 2, \dots, 5. \quad (46)$$

O uso de um algoritmo exponencial possibilita gradualmente o crescimento do valor dos passos de tempo a valores muito superiores ao menor tempo de retardação, mantendo a estabilidade e boa precisão. Neste caso, é assumido que nos intervalos entre cada passo de tempo  $(t_i, t_{i+1})$  a tensão varia linearmente e, assim, soluções exatas para as equações diferenciais podem ser obtidas.

### 5.2.7 Formulação da fluência do Código Modelo *fib* 2010

No caso da viscoelasticidade linear, o material obedece ao princípio da superposição aplicado às histórias de tensão e deformação. Desta forma, o Código Modelo *fib* 2010 apresenta uma formulação da função de fluência, válida para concretos submetidos a uma tensão máxima menor do que  $0,4 \cdot f_{cm}$  e sob um carregamento aplicado no tempo  $t'$ , como se mostra na equação (47).

$$J(t, t') = \frac{1}{E_c(t')} + \frac{\varphi(t, t')}{E_c} \quad (47)$$

Onde:

$J(t, t')$  é a função de fluência, que representa a deformação na idade  $t$ , causada por uma tensão unitária constante, atuante durante um intervalo  $t-t'$ ,

$E_c(t')$  é o módulo de elasticidade na idade  $t'$ ,

$\varphi(t, t')$  é o coeficiente de fluência; e

$E_c$  é o módulo de elasticidade do concreto aos 28 dias de idade.

$$E_c = 2,15 \times 10^4 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{1/3} \quad (MPa) \quad (48)$$

Baseado no valor de  $E_c$  é possível estimar o  $E_c(t')$  para uma idade  $t'$  qualquer, através de:

$$E_c(t') = \beta_{cc}(t')^{0,5} \cdot E_c \quad (49)$$

Na equação (49), a variável  $\beta_{cc}(t')$  corresponde ao coeficiente que considera o desenvolvimento no tempo:

$$\beta_{cc}(t') = e^{\left( s \left( 1 - \left( \frac{28}{t'} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right)} \quad (50)$$

Onde  $t_T$  é um ajuste do tempo, em função de efeitos de temperaturas diferentes de 20 °C, com limite entre 0 °C e 80 °C; e  $s$  é um parâmetro dependente do tipo de cimento utilizado no concreto, assumindo o valor de 0,20 para cimento de endurecimento rápido e alta resistência inicial, de 0,25 para cimento de endurecimento rápido e normal e 0,38 para cimento de endurecimento lento. Para concretos com  $f_{cm} > 60 \text{ MPa}$ ,  $s = 0,20$ .

Para a obtenção de  $\varphi(t, t')$ , vários parâmetros devem ser levados em consideração e sua obtenção é mostrada a seguir.

$$\varphi(t, t') = \varphi_{bc}(t, t') + \varphi_{dc}(t, t') \quad (51)$$

Onde:

$\varphi_{bc}(t, t')$  é o coeficiente de fluência básico; e

$\varphi_{dc}(t, t')$  é o coeficiente de fluência por secagem.

O coeficiente de fluência básico,  $\varphi_{bc}(t, t')$ , é obtido por :

$$\varphi_{bc}(t, t') = \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \beta_{bc}(t, t') \quad (52)$$

Onde  $\beta_{bc}(f_{cm})$  e  $\beta_{bc}(t, t')$  são variáveis calculadas de acordo com as equações (53) e (54), respectivamente.

$$\beta_{bc}(f_{cm}) = \frac{1,8}{(f_{cm})^{0,7}} \quad (53)$$

$$\beta_{bc}(t, t') = \ln \left( \left( \frac{30}{t_{0,adj}} + 0,035 \right)^2 \cdot (t - t') + 1 \right) \quad (54)$$

Por sua vez, o coeficiente de fluência por secagem,  $\varphi_{dc}(t, t')$ , que é uma variável dependente principalmente da umidade do ar e da espessura fictícia da peça, é calculado através da equação (55):

$$\varphi_{dc}(t, t') = \beta_{dc}(f_{cm}) \cdot \beta(RH) \cdot \beta_{dc}(t') \cdot \beta_{dc}(t, t') \quad (55)$$

Onde  $\beta_{dc}(f_{cm})$ ,  $\beta(RH)$ ,  $\beta_{dc}(t')$ , e  $\beta_{dc}(t, t')$  são determinados, respectivamente, pelas equações (56), (57), (58) e (59).

$$\beta_{dc}(f_{cm}) = \frac{412}{(f_{cm})^{1,4}} \quad (56)$$

$$\beta(RH) = \frac{1 - \frac{RH}{100}}{\sqrt[3]{0,1 \cdot \frac{h}{100}}} \quad (57)$$

$$\beta_{dc}(t') = \frac{1}{0,1 + t_{0,adj}^{0,2}} \quad (58)$$

$$\beta_{dc}(t, t') = \left( \frac{(t-t')}{\beta_h + (t-t')} \right)^{\gamma(t')} \quad (59)$$

Onde  $\gamma(t')$  e  $\beta_h$  são dados por (60) e (61).

$$\gamma(t') = \frac{1}{2,3 + \frac{3,5}{\sqrt{t_{0,adj}}}} \quad (60)$$

$$\beta_h = 1,5 h + 250 \cdot \alpha_{f_{cm}} \leq 1500 \cdot \alpha_{f_{cm}} \quad (61)$$

Com:

$$\alpha_{f_{cm}} = \left( \frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,5} \quad (62)$$

Em virtude dos vários tipos de cimentos que podem ser utilizados, além das variações de temperatura às quais a estrutura está submetida, algumas variáveis sofrem correções, ajustando os resultados da formulação apresentada. Entre os parâmetros ajustados, estão  $t_{0,adj}$  e  $\beta_{H,T}$ , nas equações (63) e (65).

$$t_{0,adj} = t'_T \left[ \frac{9}{2 + t_T^{1,2}} + 1 \right]^\alpha \geq 0,5 \text{ dias} \quad (63)$$

Onde:

$t_T$  substitui  $t$  nas correspondentes equações, em dias, de acordo com a equação (64); e

$\alpha$  é um parâmetro dependente do tipo de cimento utilizado na elaboração do concreto, sendo admitidos os valores de:

- 1 para cimento de endurecimento rápido e alta resistência inicial;
- 0 para cimento de endurecimento rápido e normal; e
- -1 para cimento de endurecimento lento.

$$t_T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[ 13,65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)} \right] \quad (64)$$

Onde:

$\Delta t_i$  é o número de dias em que a temperatura T prevaleceu; e

$T(\Delta t_i)$  é a temperatura média atuante por um período de  $\Delta t_i$  dias.

O efeito da temperatura no desenvolvimento do tempo da fluência é levado em conta através da equação (65):

$$\beta_{H,T} = \beta_H \cdot \beta_T \quad (65)$$

Onde:

$\beta_{H,T}$  é o coeficiente dependente da temperatura que substitui o coeficiente  $\beta_H$ ; e

$\beta_T$  é o coeficiente para correção expresso por:

$$\beta_T = \exp \left[ \frac{1500}{273+T} - 5,12 \right] \quad (66)$$

Onde  $T$  é a temperatura em °C.

O efeito da temperatura no coeficiente de fluência é considerado através de (67) e (68).

$$\varphi_{bc,T} = \varphi_{bc} \cdot \varphi_T \quad (67)$$

$$\varphi_{dc,T} = \varphi_{dc} \cdot \varphi_T^{1,2} \quad (68)$$

Onde:

$\varphi_{bc,T}$  é o coeficiente básico de fluência dependente da temperatura que substitui  $\varphi_{bc}$ ,

$\varphi_{dc,T}$  é o coeficiente de fluência por secagem dependente da temperatura que substitui  $\varphi_{dc}$ ; e

$\varphi_T$  é o coeficiente de correção:

$$\varphi_T = \exp[0,015 \cdot (T - 20)] \quad (69)$$

O efeito da temperatura sobre a resistência média à compressão,  $f_{cm}$ , e sobre o módulo de elasticidade,  $E_c$ , respectivamente através de (70) e (71).

$$f_{cm}(T) = f_{cm} \cdot (1,06 - 0,003 T) \quad (70)$$

Onde:

$f_{cm}(T)$  é a resistência à compressão a uma temperatura  $T$ ; e

$f_{cm}$  é a resistência à compressão a uma temperatura de 20 °C.

$$E_{ci}(T) = E_{ci} (1,06 - 0,003 T) \quad (71)$$

Onde:

$E_c(T)$  é o módulo de elasticidade a uma temperatura  $T$ ; e

$E_c$  é o módulo de elasticidade a uma temperatura de 20°C.

### 5.2.8 Calibragem do modelo de Maxwell e Kelvin para concreto viscoelástico

Comparam-se as curvas de fluência, para os oito diferentes tempos  $t'$  de aplicação da carga, obtidas com as fórmulas propostas pelo Código Modelo CEB 90 (Comité Euro International du Béton, 1993) e o Código Modelo *fib* 2010 (Fédération Internationale du Béton, 2012) e as obtidas do modelo computacional deste trabalho utilizando os modelos da cadeia de Maxwell e de Kelvin.

Os dados utilizados nesta calibragem são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4: Valores adotados na calibragem

Parâmetros	Valor adotado
$\nu$	0,2
$f_{cm28}$	2 kN/cm <sup>2</sup>
RH	65 %
$h$	13,33 cm
Temperatura	20 °C
$n$	5
$\alpha$	0
$\alpha_{as}$	700
$\alpha_{ds1}$	4
$\alpha_{ds2}$	0,012
$s$	0,25

O parâmetro  $J$ , que representa a função de fluência, corresponde à deformação no tempo  $t$ , causada por uma tensão constante unitária, agindo no intervalo entre  $t'$  e  $t$ .

Os módulos de Young obtidos em cada caso são apresentados na Tabela 5.

Bazant (Bazant, 1988) explica que devido à formulação da cadeia de Kelvin, pode-se obter resultados de módulo de elasticidade negativo. Mas as restrições termodinâmicas aplicam-se aos módulos de materiais em geral, não para os módulos parciais. Estes valores negativos são parte da calibragem e não tem um significado físico separadamente.

Tabela 5 Módulos de Young de cada camada segundo a idade de carregamento  $t'$  e o modelo utilizado.

$t'$ (dias)	$E_c(t')$ (kN/cm <sup>2</sup> )	Camada	Módulo de Young (kN/cm <sup>2</sup> )			
			Maxwell CEB 90	Maxwell <i>fib</i> 10	Kelvin CEB 90	Kelvin <i>fib</i> 10
2,80	2479,81	1	916,81	1343,22	3958,49	1596,75
		2	666,08	534,13	3940,52	3079,37
		3	525,30	233,29	1962,28	2208,85
		4	324,33	157,76	1693,12	1997,13
		5	35,11	159,70	-1266,63	-3138,48
8,85	2948,64	1	1079,95	1412,26	4906,27	2832,70
		2	708,52	665,43	4884,00	3505,01
		3	517,52	352,68	2432,11	2398,88
		4	317,50	232,82	2098,51	1970,69
		5	305,83	241,17	-1569,90	-2895,83
28	3250,21	1	1117,63	1187,33	6099,46	6591,41
		2	726,59	831,30	6071,77	4190,86
		3	511,40	541,51	3023,59	2679,93
		4	298,90	298,55	2608,86	2058,54
		5	576,63	383,48	-1951,69	-3080,41
88,54	3433,16	1	1065,44	708,35	7601,60	20468,15
		2	727,96	970,12	7567,09	6771,50
		3	516,67	821,34	3768,22	3096,91
		4	280,78	388,93	3251,35	2235,49
		5	827,95	581,91	-2432,34	-3601,99
280	3540,52	1	961,05	376,62	9492,68	29032,27
		2	711,11	808,60	9449,58	17027,06
		3	529,40	958,67	4705,65	4403,09
		4	272,71	607,02	4060,20	2390,98
		5	1057,57	816,13	-3037,44	-3438,36
885,44	3602,36	1	834,46	262,01	11873,41	37561,89
		2	675,07	604,66	11819,50	27040,27
		3	539,02	866,43	5885,81	7205,96
		4	277,26	763,00	5078,48	3003,67
		5	1272,44	1115,31	-3799,22	-5843,74
2800	3637,61	1	705,46	196,46	14870,56	50960,65
		2	623,07	483,72	14803,06	33588,82
		3	536,92	761,70	7371,54	10170,32
		4	289,20	803,02	6360,43	4123,84
		5	1481,82	1395,53	-4758,24	-25821,13
8854,38	3657,58	1	585,12	146,02	18643,76	66708,39
		2	560,70	393,13	18559,12	42252,37
		3	520,11	681,35	9241,96	13122,80
		4	300,35	827,76	7974,30	5277,50
		5	1691,75	1607,73	-5965,58	38815,21

As curvas obtidas na calibragem podem ser vistas nos seguintes gráficos, da Figura 20 à Figura 27:

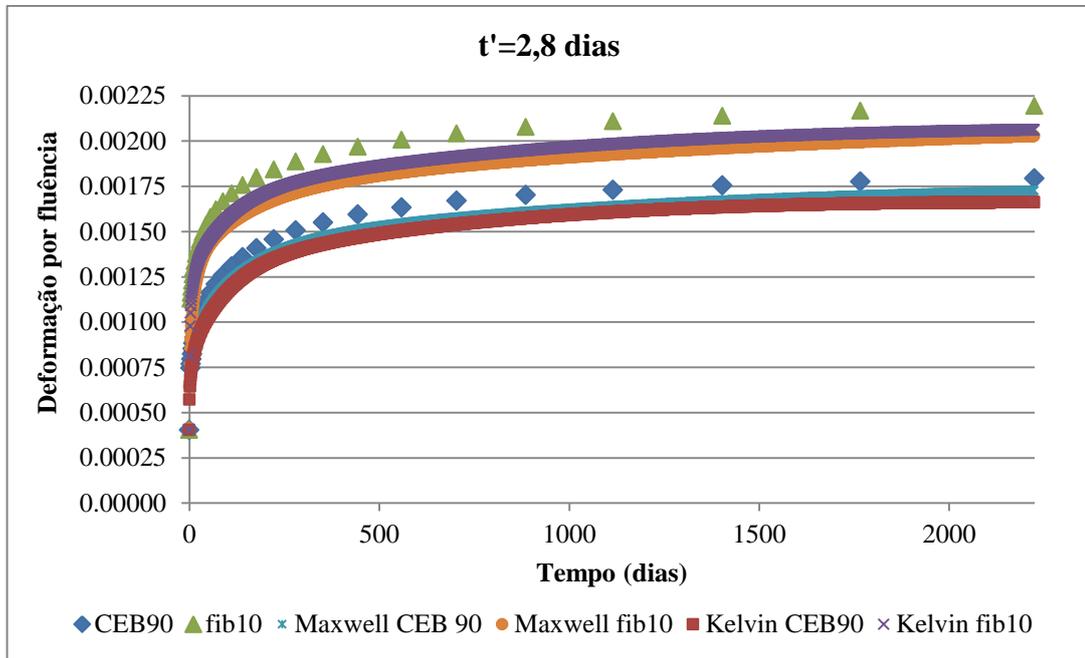


Figura 20: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, *fib* 2010 e modelos computacionais para  $t'=2,8$  dias.

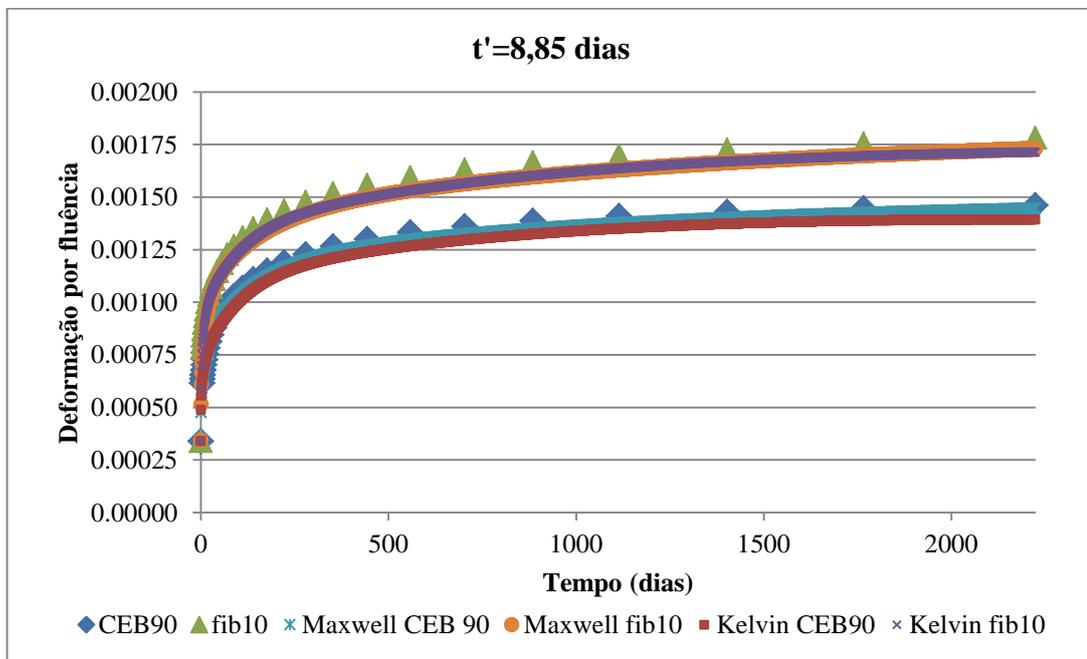


Figura 21: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, *fib* 2010 e modelos computacionais para  $t'=8,85$  dias.

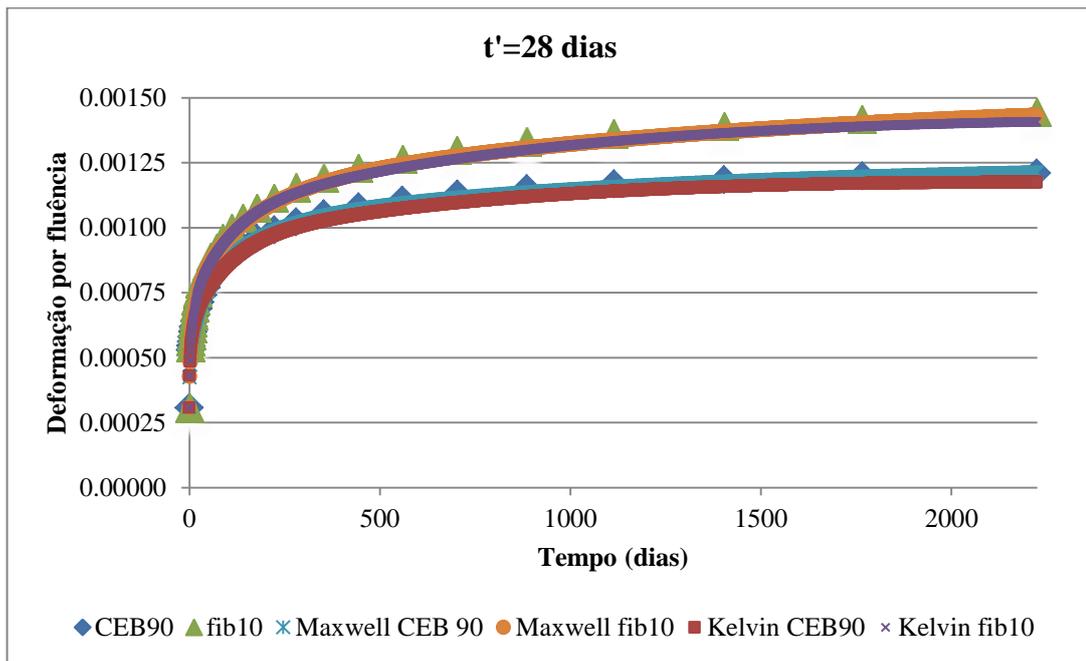


Figura 22: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, *fib* 2010 e modelos computacionais para  $t'=28$  dias.

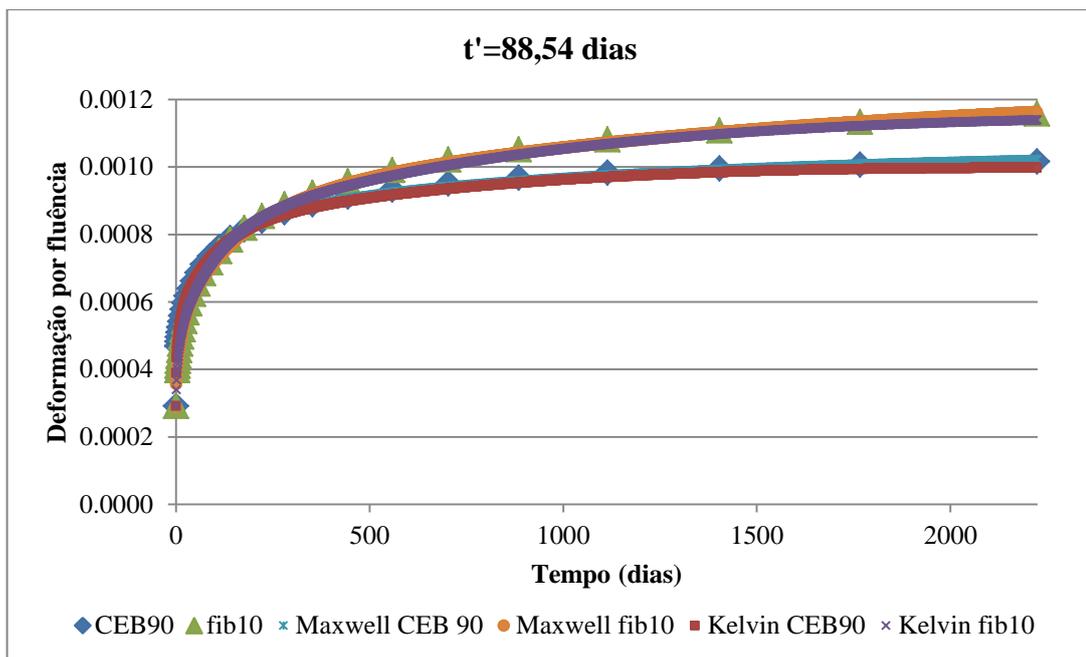


Figura 23: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, *fib* 2010 e modelos computacionais para  $t'=88,54$  dias.

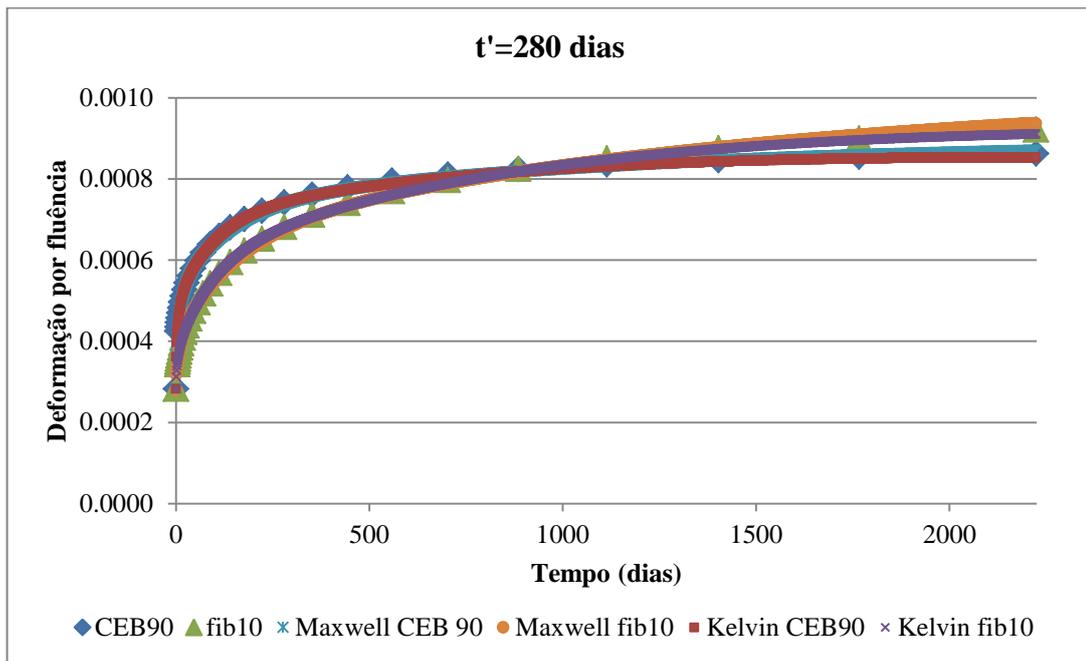


Figura 24: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, *fib* 2010 e modelos computacionais para  $t'=280$  dias.

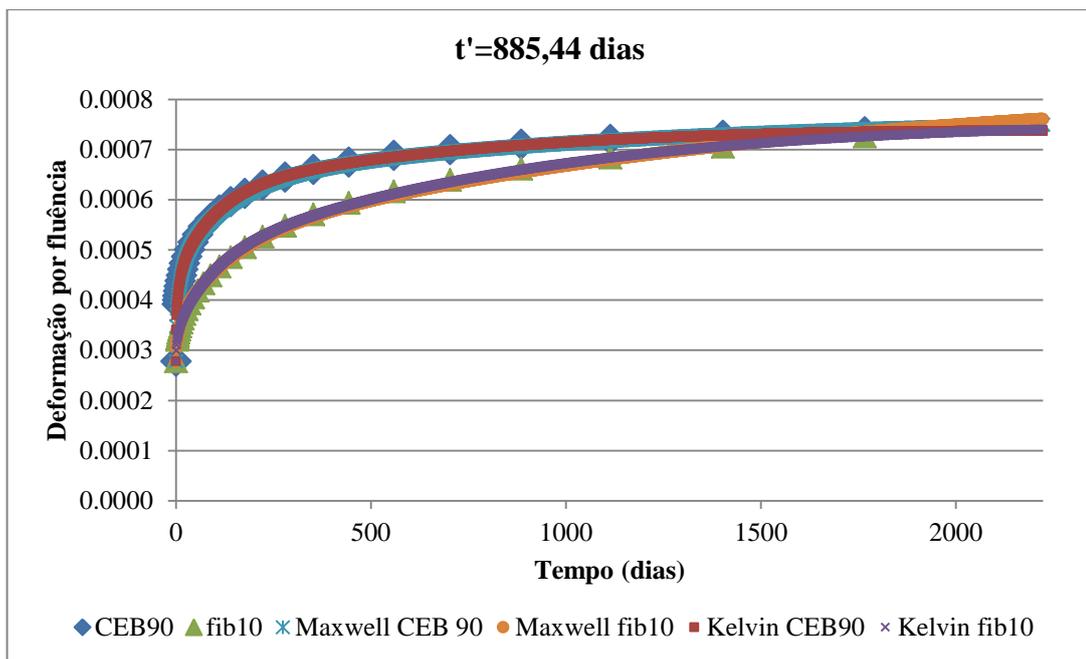


Figura 25: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, *fib* 2010 e modelos computacionais para  $t'=885,44$  dias.

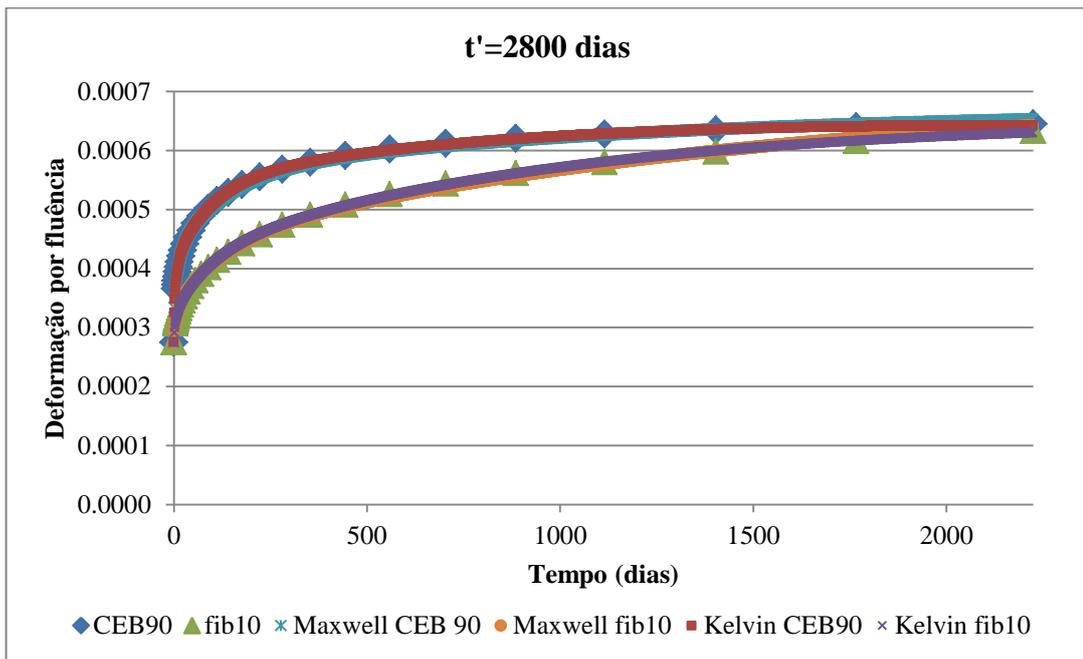


Figura 26: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, *fib* 2010 e modelos computacionais para  $t'=2800$  dias.

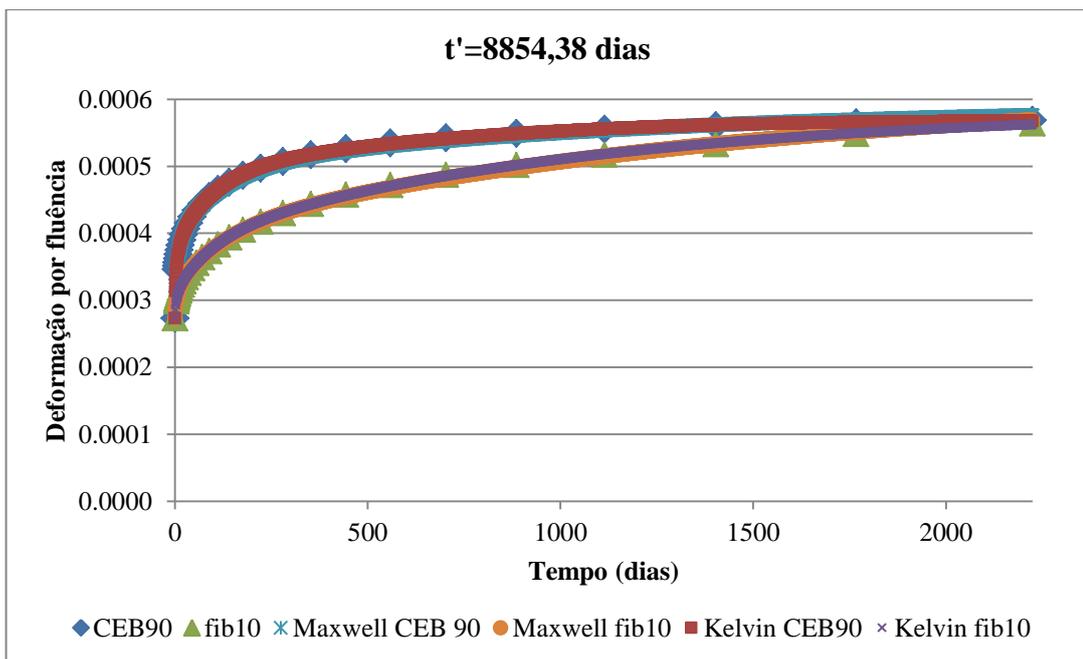


Figura 27: Curvas de fluência obtidas pelos CEB 90, *fib* 2010 e modelos computacionais para  $t'=8854,38$  dias.

Nas curvas acima pode-se observar que o efeito da fluência é função da idade do concreto quando a carga foi aplicada e da duração do carregamento. Quanto maior o tempo de aplicação da carga, maior a deformação, e quanto maior a idade do carregamento, menor a deformação. Por tudo isso, o concreto é classificado como um material viscoelástico com envelhecimento.

As curvas de fluência obtidas apresentam uma correspondência satisfatória nos casos de carregamento a idades menores, enquanto que as curvas de fluência com carregamento a idades maiores a correspondência é exata.

Nos gráficos da Figura 20 até a Figura 27 podem-se comparar as duas normas. A formulação da fluência mudou do Código Modelo CEB 90 (1993) ao *fib* 10 (2012). Nos casos de carregamento a idades menores as curvas do *fib* 10 apresentam uma deformação maior em relação às do CEB 90. Nos casos de carregamento a idades maiores as curvas do CEB 90 apresentam deformações maiores. As curvas do CEB 90 estabilizam ao longo do tempo no período estudado de 2200 dias, mas as curvas do *fib* 10 continuam crescendo.

## 6 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL NO ANSYS

O programa ANSYS é um programa comercial de simulação de engenharia por elementos finitos, que permite prever com precisão como um produto funcionará em um contexto real. Tem uma arquitetura aberta, que permite incorporar sub-rotinas escritas em linguagem C ou Fortran.

As UPFs “*User Programmable Features*” são opções do ANSYS, que permitem adequar o programa às necessidades do usuário. Por exemplo, para definir o comportamento de um novo material, utilizar um elemento especial ou modificar o critério de falha de um compósito.

A seguir é descrito o processo de utilização das UPFs de acordo com o manual do programa (ANSYS, 2013).

Para ter os recursos de programação disponíveis, na instalação deve ser escolhida a opção “*ANSYS customization files*”, como mostra a Figura 28.

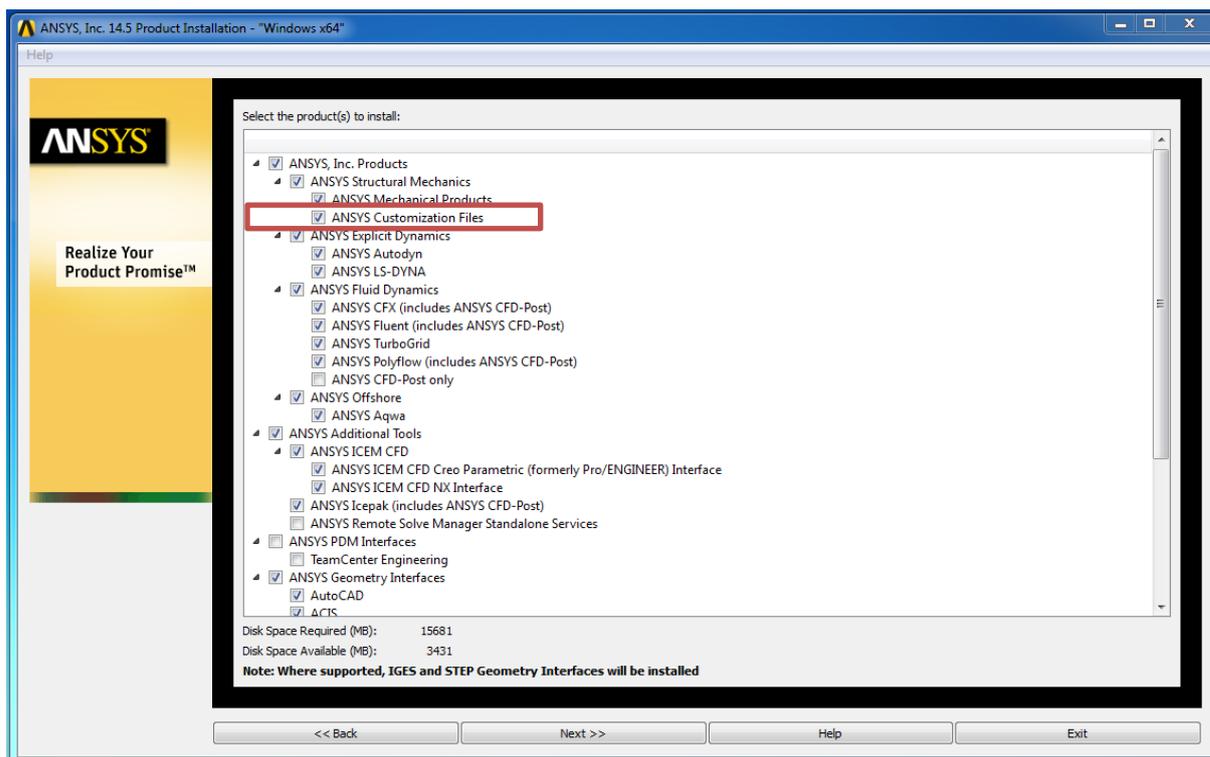


Figura 28: Customização do ANSYS

As sub-rotinas, que o ANSYS apresenta, estão escritas em linguagem Fortran 77 e têm comentários que fornecem os detalhes para entender a formulação. Antes de modificar as sub-rotinas é necessário estudá-las bem. É necessário saber escrever sub-rotinas em Fortran e conhecer a matemática do fenômeno em estudo. Após estudar bem a sub-rotina requerida e saber as modificações desejadas, é recomendado testar com um exemplo. As modificações devem ser implementadas de forma gradual para no caso de aparecer algum erro, podê-lo achá-lo facilmente e corrigi-lo. Ao modificar uma sub-rotina terão que ser usadas variáveis definidas corretamente, respeitando a lógica do que foi feito originalmente.

Para trabalhar com sub-rotinas no ANSYS são necessárias algumas ferramentas: um compilador, como o Intel Fortran, e um editor de linguagem Fortran, como o Microsoft Visual Studio. As sub-rotinas, que podem ser modificadas, encontram-se no diretório: *Program files/ANSYS Inc/v145/ansys/customize/user/*.

Nestas sub-rotinas é interessante utilizar o recurso do comando “*common*” para reter valores de variáveis em um espaço da memória, para posterior utilização na própria sub-rotina. Cada “*common*” contém um determinado conjunto de dados e é um recurso útil para passar dados a funções ou entre sub-rotinas.

Uma forma de utilizar as UPFs no Windows é utilizando uma biblioteca dinâmica. Os arquivos em Fortran (\*.f), que vão ser incluídos na biblioteca, têm que estar no diretório de trabalho definido.

Para compilar uma sub-rotina é necessário executar o aplicativo *ANSUSERSHARED.bat* e indicar a sub-rotina a ser compilada, como mostra a Figura 29. A sub-rotina modificada deve estar no mesmo diretório em que se encontrava antes de ser modificada. O aplicativo também pode ser executado direcionando até o seu diretório através do *Command Prompt Window*.

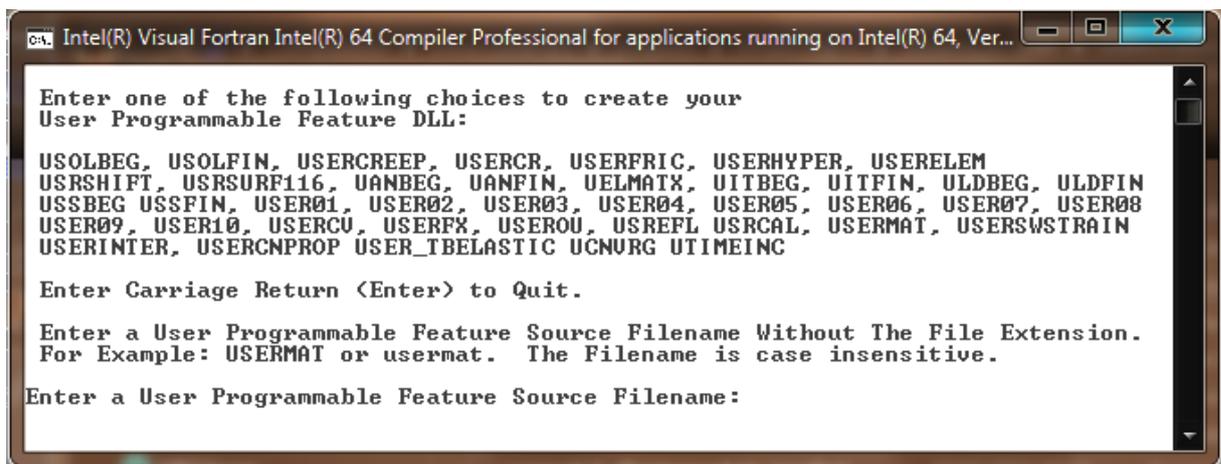


Figura 29: Processo de compilação.

Uma vez inserido o nome da sub-rotina, começa a compilação e finalmente aparece na tela o aviso que a biblioteca dinâmica foi criada com sucesso, como mostra a Figura 30.

```

Intel(R) Visual Fortran Intel(R) 64 Compiler Professional for applications running on Intel(R) 64, Ver...
Enter a User Programmable Feature Source Filename: usermat
Microsoft (R) Incremental Linker Version 9.00.21022.08
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.

-out:usermatLib.dll
-def:usermatLibex.def
-dll
-machine:X64
-map
-manifest
-manifestfile:usermatLib.dll.intermediate.manifest
-defaultlib:ANSYS.lib
*.*obj
  Creating library usermatLib.lib and object usermatLib.exp
Microsoft (R) Manifest Tool version 5.2.3790.2075
Copyright (c) Microsoft Corporation 2005.
All rights reserved.

*****

usermatLib.dll HAS BEEN SUCCESSFULLY BUILT.

Set the environment variable ANS_USER_PATH to the directory where the
usermatLib.dll resides and run ansys145 to use your newly generated
user shared library.

*****

Pressione qualquer tecla para continuar. . .

```

Figura 30: Criação da biblioteca dinâmica.

Para que o programa ANSYS use esta biblioteca recém criada, é necessário criar ou no caso modificar a variável de ambiente *ANS\_USER\_PATH*. No Windows ela deve ser configurada com o endereço da pasta que contém a biblioteca, a sub-rotina e o executável.

Ao iniciar o ANSYS, na tela do *Output window*, vai aparecer a frase *ans\_user\_path linked by licensee*, que diz que é uma versão vinculada e mostra o endereço da ligação, como na Figura 31.

```

ANSYS Multiphysics

***** ANSYS COMMAND LINE ARGUMENTS *****
INITIAL JOBNAME           = file

START-UP FILE MODE       = READ
STOP FILE MODE           = READ
GRAPHICS DEVICE REQUESTED = win32
GRAPHICAL ENTRY           = YES
LANGUAGE                  = en-us
INITIAL DIRECTORY        = C:\Users\Pao U F

User Link path <ANS_USER_PATH>: E:\Dropbox\PPGEC Pao U\Dissertaçõo 2014\SUBROUTIN
AS

00989237      VERSION=WINDOWS x64      RELEASE= 14.5      UP20120918
CURRENT JOBNAME=file 14:57:22 FEB 11, 2015 CP=      0.593
Note - This ANSYS version was linked by Licensee

/SHOW SET WITH DRIVER NAME= WIN32      , RASTER MODE, GRAPHIC PLANES = 8

RUN SETUP PROCEDURE FROM FILE= C:\Program Files\ANSYS Inc\v145\ANSYS\apdl\start1
45.ans

/INPUT FILE= menust.tmp  LINE=      0

/INPUT FILE= C:\Program Files\ANSYS Inc\v145\ANSYS\apdl\start145.ans  LINE=
0
ACTIVATING THE GRAPHICAL USER INTERFACE <GUI>. PLEASE WAIT...

CUTTING PLANE SET TO THE WORKING PLANE

PRODUCE NODAL PLOT IN DSYS= 0
TURN OFF WORKING PLANE DISPLAY

```

Figura 31: Output window no início do ANSYS.

## 6.1 Fluxograma da sub-rotina *usermat*

*Usermat*, do inglês *user material subroutine*, é a sub-rotina que permite que a formulação do material seja modificada pelo usuário, escrevendo as próprias equações constitutivas do material.

É subdividida segundo o tipo de problema em: *usermat1d* (elemento de viga 1D), *usermat3d* (elementos 3D, estado plano de deformações e axissimetria), *usermatbm* (elemento de viga 3D), *usermatps* (estado plano de tensões).

A sub-rotina *usermat3d* é resolvida para cada elemento, para cada ponto de integração, em várias iterações, e segue os passos mostrados na Figura 32 e na Figura 33, no caso da Cadeia de Maxwell e no caso da Cadeia de Kelvin, respectivamente.

Na Figura 32 EMU é a matriz de módulos elásticos para os oito tempos de carregamento.

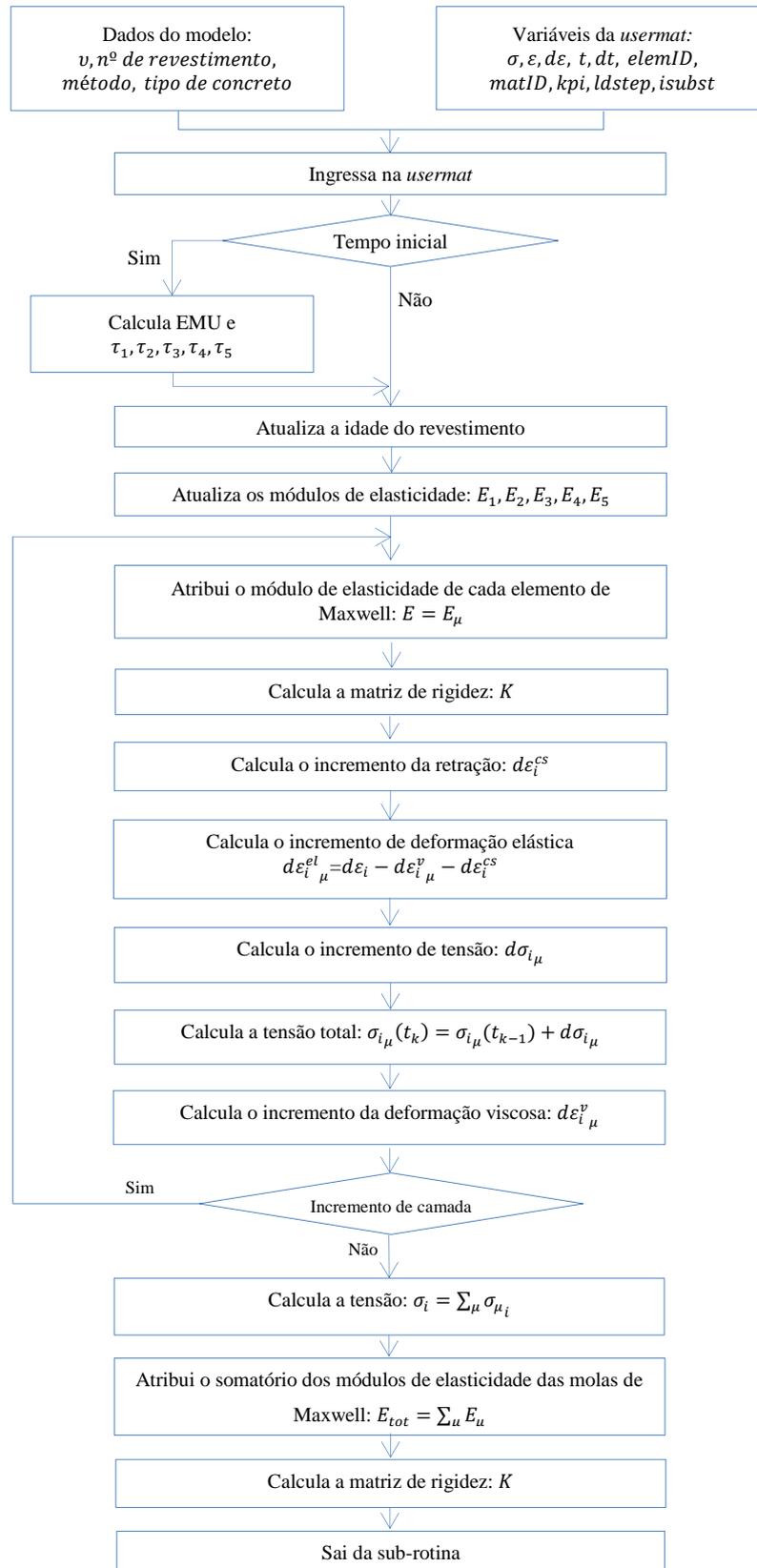


Figura 32: Fluxograma da *usermat* para o método de Maxwell.

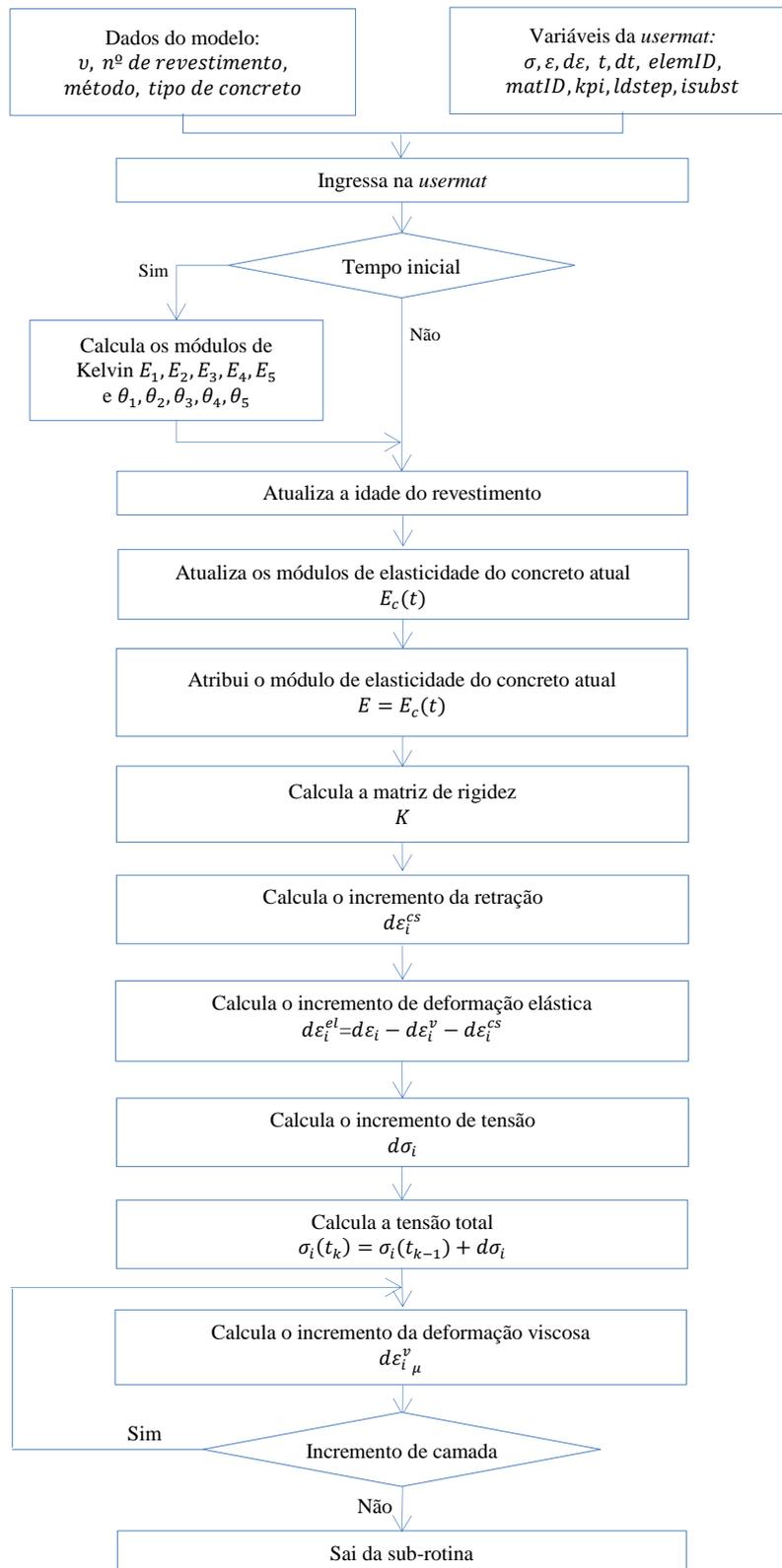


Figura 33: Fluxograma da *usermat* para o método de Kelvin.

## 7 ANÁLISE NUMÉRICA DE TÚNEIS

No projeto de obras subterrâneas os objetivos são a estabilidade local da estrutura e no entorno dela. Os deslocamentos induzidos têm que ser toleráveis em relação à estrutura e às estruturas vizinhas e de serviços. Os métodos numéricos, em engenharia civil, permitem a análise de estruturas complexas. São métodos aproximados, como por exemplo, o método de elementos finitos, que possibilitam a resolução do conjunto de equações diferenciais ao qual um meio em equilíbrio deve satisfazer.

Modelos constitutivos são utilizados para formular o comportamento dos diferentes materiais (maciço-revestimento).

O método de elementos finitos permite resolver a problemática do túnel, no seu entorno, discretizando a situação em elementos finitos e resolvendo equações matriciais, considerando as condições de contorno.

As tensões e deformações do suporte de um túnel dependem principalmente do método construtivo: método de escavação, tipo e espessura do revestimento, distância entre o revestimento e a face de escavação. Um modelo computacional tridimensional é necessário para analisar estas condições e as exigências de uma determinada obra subterrânea (AFTES, 2000).

No contexto de um túnel, a região localizada nas proximidades da frente de escavação apresenta estados triaxiais de tensões e deformações. Para levar em conta a análise dessa região, representando a realidade dos fenômenos de transferência de carga do maciço para o suporte, precisa-se de uma análise numérica tridimensional, mas o tempo e os recursos computacionais necessários são elevados. Em muitos casos o problema 3D pode ser simplificado a um problema 2D axissimétrico.

Para as simulações seguintes foi utilizado o programa ANSYS na sua versão *Mechanical APDL 14.5* e um computador com as seguintes características:

Fabricante ASUSTeK©

Processador: Intel Core® i7-4770K CPU @ 3.50GHz 3.50 GHz

Memória RAM: 8 Gb

Tipo de sistema: Sistema Operacional de 64 Bits

Também foram utilizados o compilador Intel Fortran 11.1 e como editor de linguagem Fortran o Microsoft Visual Studio 2008.

## 7.1 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA ANSYS EM ELASTICIDADE

### 7.1.1 Descrição

A validação foi realizada com um modelo que propõe 36 escavações de um túnel de seção transversal circular, com  $R=1$  m, em um maciço homogêneo com comportamento elástico, com  $d_0=2/3R$  (no caso do túnel revestido) e um passo de escavação de  $1/3R$ , que deixa a face do túnel plana e transversal ao eixo longitudinal.

Este túnel é profundo o suficiente, com relação ao seu raio, para considerar tensões geostáticas hidrostáticas na profundidade do maciço, que pode ser uma argila profunda.

O sistema de suporte consiste em um revestimento de concreto de espessura  $e=R/10$  constante, com comportamento elástico. As características dos materiais (maciço e revestimento) e do processo de escavação estão resumidas na Tabela 6 e na Tabela 7.

Tabela 6: Propriedades dos materiais.

Parâmetro	Solo	Concreto
E	1000 MPa	30000 MPa
$\nu$	0,498	0,3

Tabela 7: Parâmetros do processo de construção do túnel.

Parâmetros	Processo de construção
Modelo	20m x 20m x 30m
R	1 m
L	12,67 m
e	0,1 m
$P_\infty$	5 MPa
p	1/3 R
$d_0$	2/3 R
V	10 m/dia

Onde  $V$  é a velocidade de escavação correspondente a uma tuneladora (TBM: Tunnel boring machine).

O modelo descrito foi realizado em axissimetria 2D (cumprindo as hipóteses para transformar o problema do túnel em um problema axissimétrico) e em um modelo tridimensional para os casos de um túnel não revestido e com revestimento de concreto. As comparações foram feitas segundo os resultados obtidos do programa ANSYS, do programa GEOMECC91 e da solução analítica. A comparação em cada caso é descrita no esquema da Figura 34.

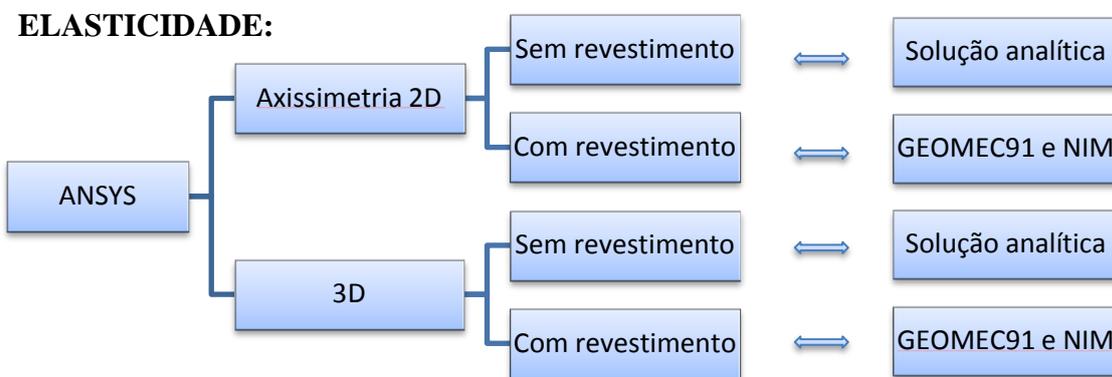


Figura 34: Esquema das comparações para a validação do modelo em elasticidade.

### 7.1.2 Solução analítica

No caso de um túnel não revestido, existe uma solução analítica, em elasticidade, para obter a convergência do túnel escavado em um maciço homogêneo, com seção transversal circular.

Em elasticidade, a equação (72) fornece a convergência de um túnel não revestido a uma distância infinita da face do túnel, segundo Corbetta (1990).

$$U_{\infty} = \frac{1+\nu}{E} P_{\infty} \quad (72)$$

### 7.1.3 GEOMECC91

É um programa numérico em elementos finitos, desenvolvido por Bernaud (1991). Ele faz uma análise 2D em axissimetria e calcula a convergência de cada escavação.

Para considerar a sequência de escavação e a colocação do revestimento, o programa utiliza o método ativação/desativação dos elementos finitos. Assim, o método consiste na desativação da rigidez dos elementos afetados pela redução considerável do módulo de elasticidade  $E$  e a

ativação deles pela substituição das características mecânicas dos elementos correspondentes ao revestimento.

O programa GEOMEK91 possui leis de comportamento em elasticidade, plasticidade e viscoplasticidade.

#### 7.1.4 New Implicit Method (NIM)

Constitui um dos métodos simplificados. É uma extensão do método Convergência-Confinamento, desenvolvido por Panet & Guellec (1974). O NIM, desenvolvido por Bernaud (1991) e apresentado pela AFTES (2001), leva em conta a rigidez do suporte no cálculo de  $U_0$ . A interação maciço-revestimento é estudada como um problema axissimétrico com um estado plano de deformações no plano normal ao eixo do túnel.

#### 7.1.5 ANSYS

No programa ANSYS, o método de ativação/desativação, também utilizado pelo GEOMEK91, corresponde ao comando “Birth and Death”. De acordo com o manual do ANSYS (2012), o elemento é desativado multiplicando a sua rigidez por um severo fator de redução e tirando a sua massa da matriz global. As cargas e outros efeitos dos elementos desativados são zerados, no entanto, eles ainda aparecem nas listas de elementos. Da mesma forma, quando os elementos são "nascidos", eles não são realmente adicionados ao modelo; mas são simplesmente reativados. Para a utilização deste processo o programa atualiza a matriz de rigidez em cada passo.

Cada escavação corresponde a um passo de carga (“step”). O primeiro passo corresponde ao equilíbrio, antes de começar a escavar, onde se colocam as condições iniciais (tensão inicial do maciço) e de contorno (apoios e pressões externas ao modelo). O sistema está em equilíbrio, por isso não há deslocamento da rocha.

##### 7.1.5.1 Modelo 2D axissimétrico no ANSYS

Foi utilizado o elemento PLANE183, quadrilátero de 8 nós, com 2 graus de liberdade em cada nó. Na Figura 35, os nós estão indicados com letras e as faces com números.

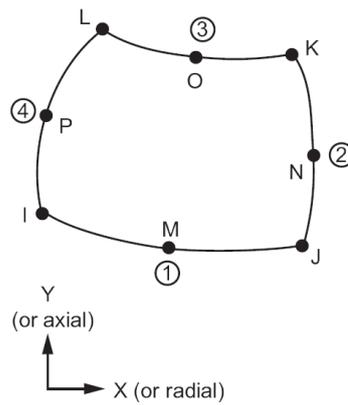


Figura 35: Elemento PLANE183 (ANSYS, 2012).

Como condições de contorno foram consideradas a simetria no eixo vertical Y, o deslocamento nulo na parte superior e uma pressão igual à tensão inicial do maciço na parte direita e embaixo.

Foi utilizada uma malha mapeada, com espaçamento variável, sendo mais refinada no entorno da face do túnel e perto da parede do túnel. A malha tem 855 elementos e 2710 nós, como mostra a Figura 36.

As medidas do modelo são: 30 m no eixo longitudinal Y do túnel, 20 m no eixo X, raio do túnel escavado 1 m e o revestimento tem 0,1 m.

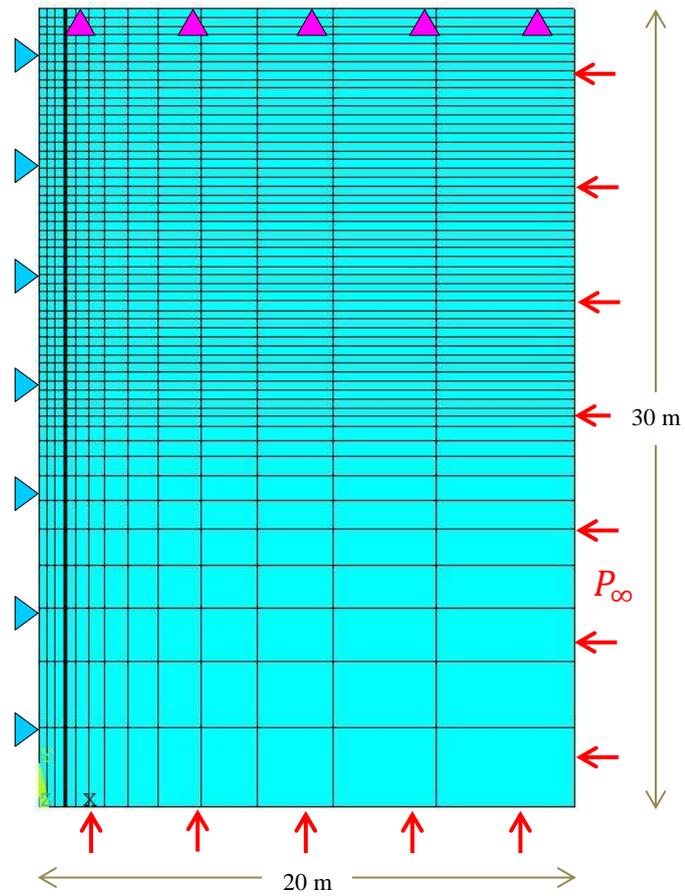


Figura 36: Malha e condições de contorno do modelo 2D axissimétrico no ANSYS

Os deslocamentos e as tensões radiais, depois da última escavação, podem ser vistos na Figura 37, Figura 38, Figura 39 e Figura 40.

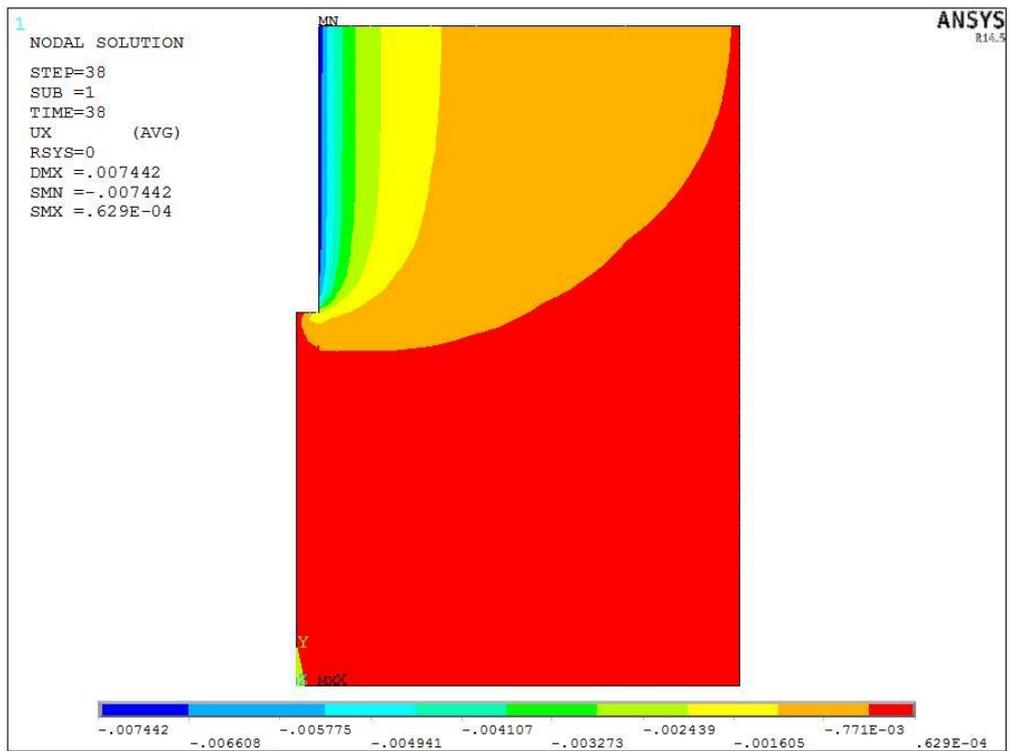


Figura 37: Deslocamento radial no modelo 2D axissimétrico no ANSYS, sem revestimento.

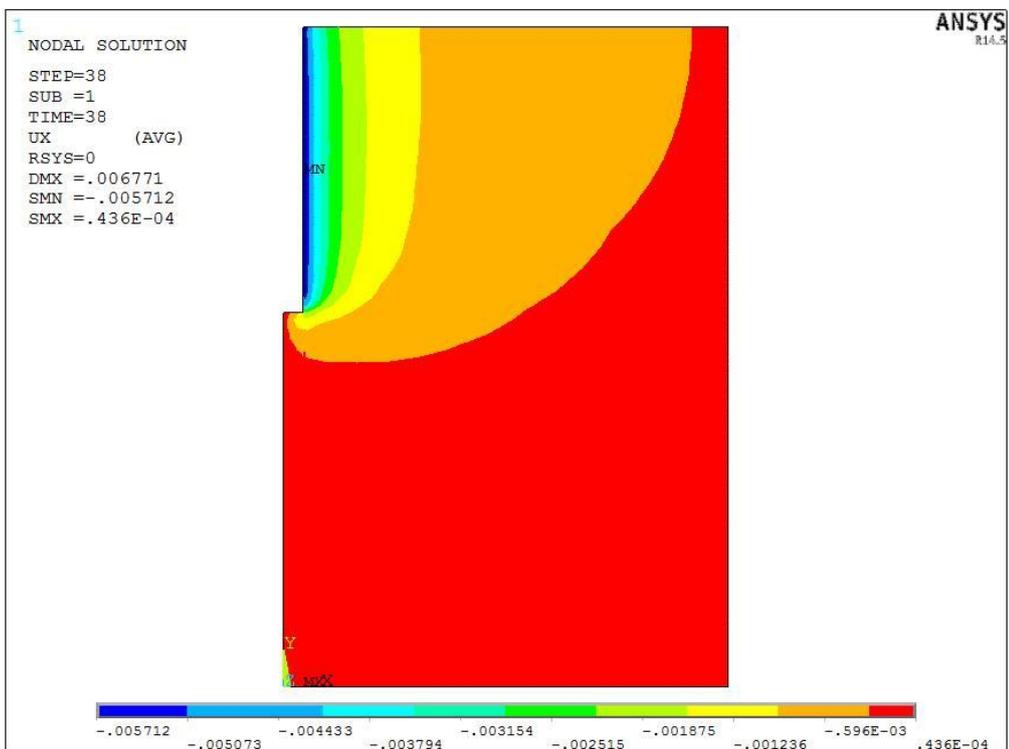


Figura 38: Deslocamento radial no modelo 2D axissimétrico no ANSYS, com revestimento.

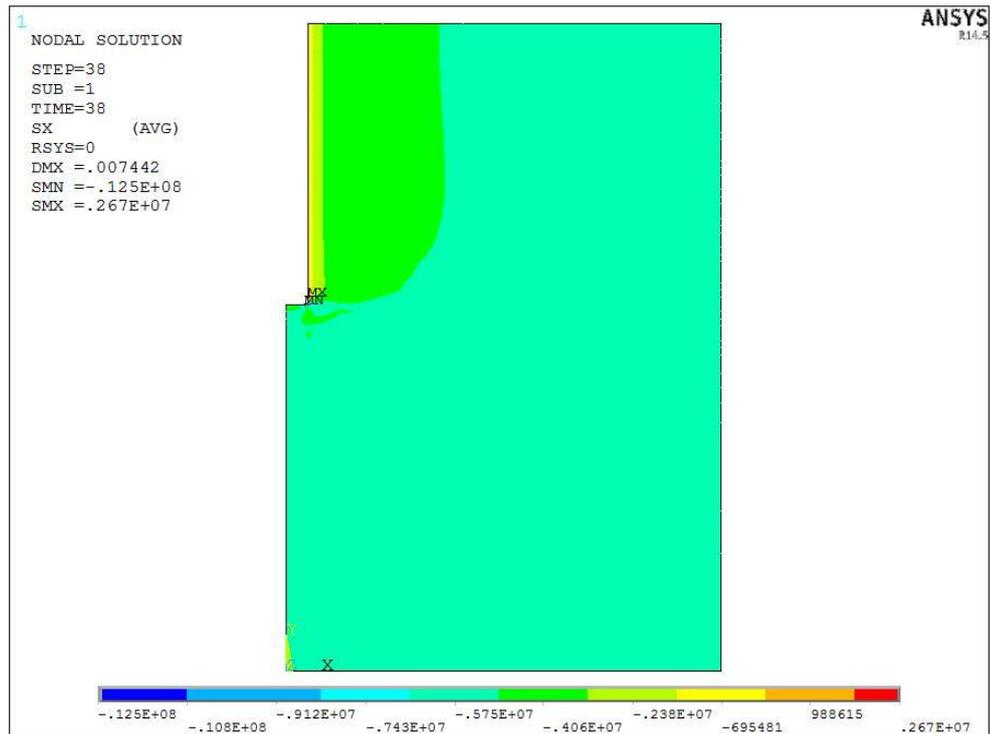


Figura 39: Tensões radiais no modelo 2D axissimétrico no ANSYS, sem revestimento.

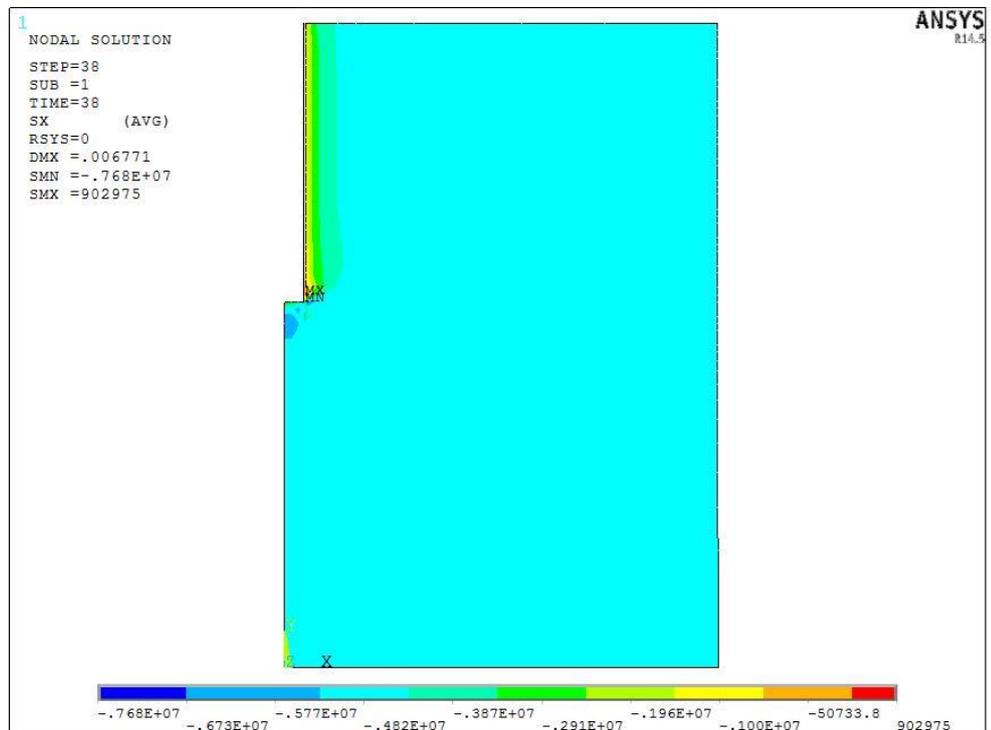


Figura 40: Tensões radiais no modelo 2D axissimétrico no ANSYS, com revestimento.

As curvas de convergência obtidas são desenhadas na Figura 41.

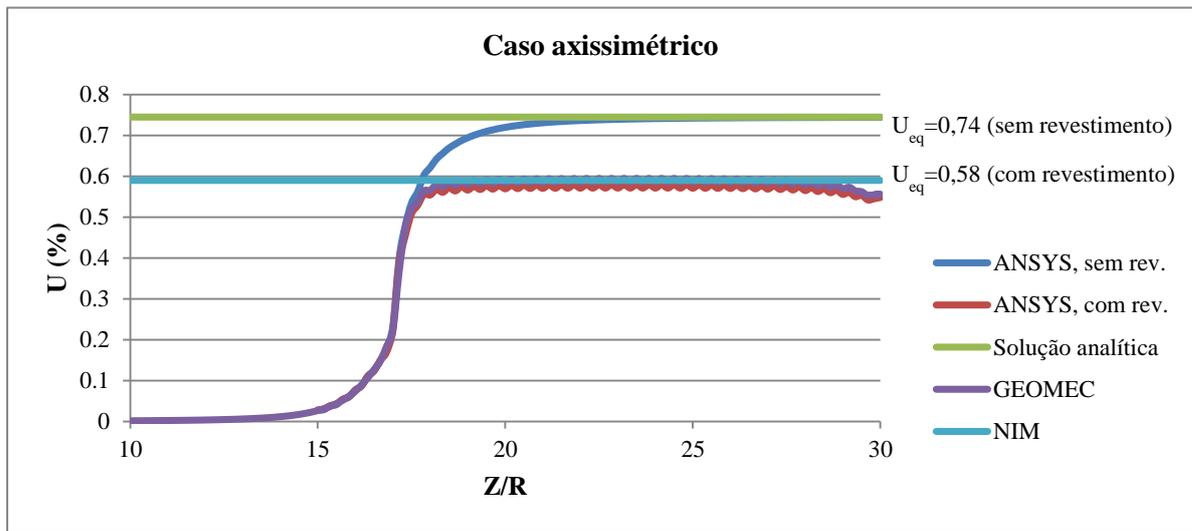


Figura 41: Curvas de convergência no caso axissimétrico 2D.

#### 7.1.5.2 Modelo 3D no ANSYS

Em todas as simulações 3D desta dissertação, foi utilizado o elemento tridimensional SOLID186, hexaedro de 20 nós, com 3 graus de liberdade em cada nó. Na Figura 42, os nós estão indicados com letras e as faces com números.

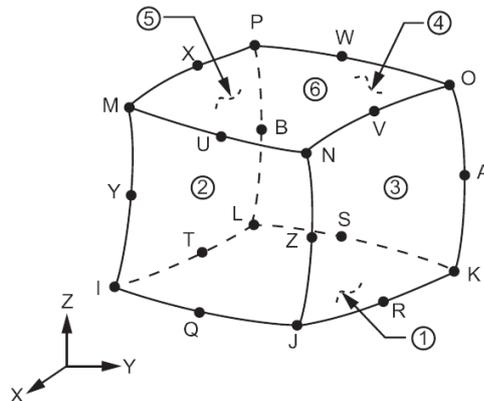


Figura 42: Elemento SOLID186 (ANSYS, 2012).

Em função da simetria, foi discretizado apenas um quarto do total do modelo. As medidas do modelo são: 30 m no eixo longitudinal Z do túnel, 20 m nos eixos X e Y, raio do túnel escavado de 1 m e o revestimento tem uma espessura de 0,1 m.

Foi utilizada uma malha com mapeamento radial no maciço e revestimento. No maciço a ser escavado, a malha foi gerada livremente. A malha tem espaçamento variável, sendo mais

refinado no entorno da face do túnel e perto da parede do túnel. Ela tem 7504 elementos e 34344 nós, como mostra a Figura 43.

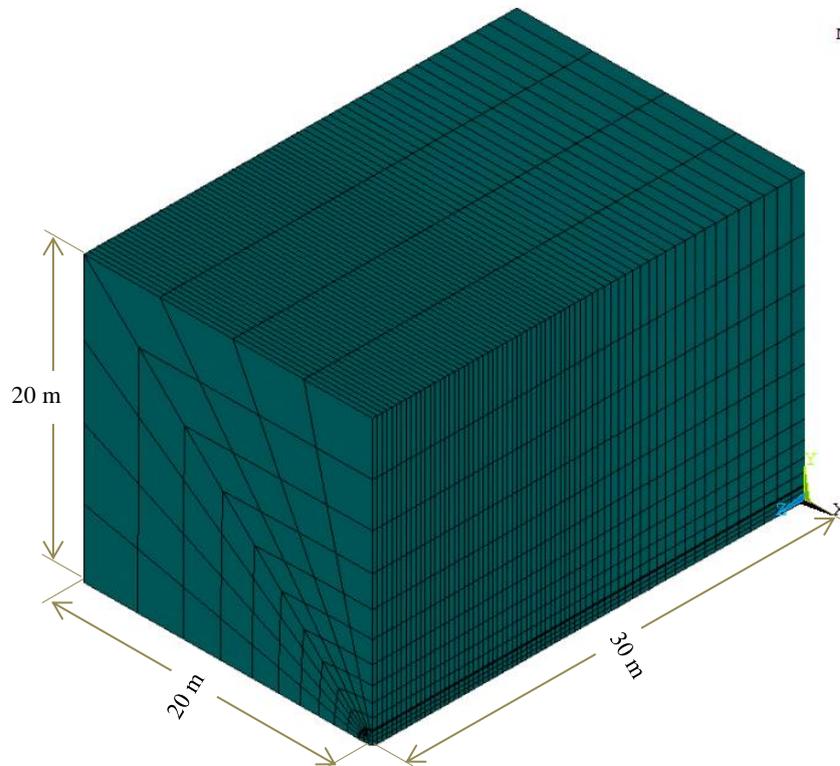


Figura 43: Malha do modelo 3D.

As condições de contorno consideradas foram: simetria na face cortada pelo plano vertical, que passa pelo eixo Z, simetria na face cortada pelo plano horizontal, que passa pelo eixo Z, deslocamento nulo em uma face transversal ao túnel e nas outras faces atua uma pressão igual à tensão inicial do maciço. As condições de contorno estão dispostas como se mostra na Figura 44.

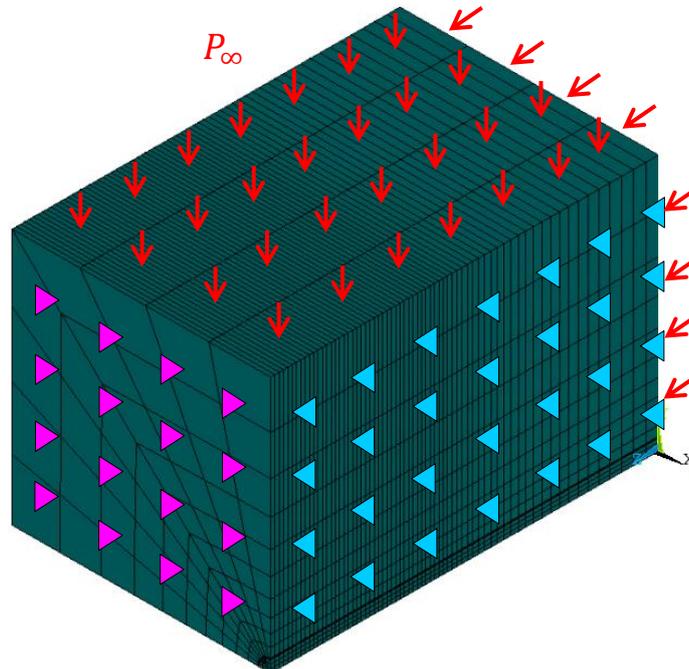


Figura 44: Condições de contorno.

Os deslocamentos, depois da última escavação, podem ser vistos nas Figura 45 e Figura 46; e as tensões depois da última escavação podem ser vistas nas Figura 47 e Figura 48.

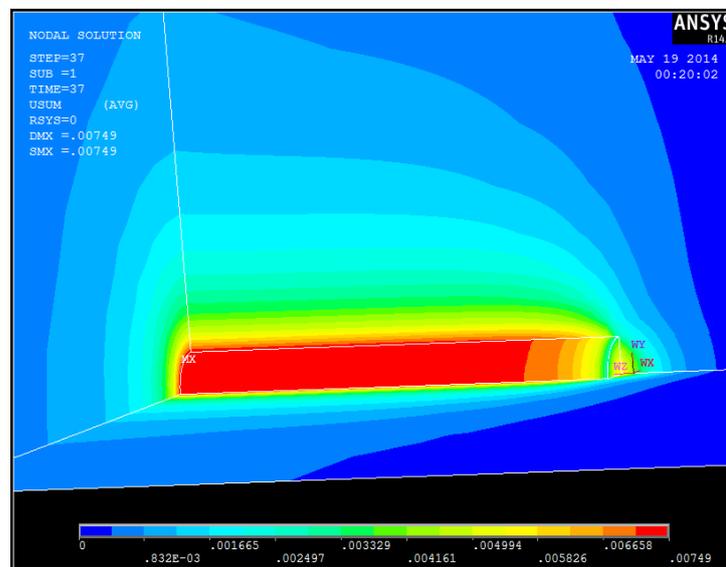


Figura 45: Deslocamento no modelo 3D no ANSYS, sem revestimento (m).

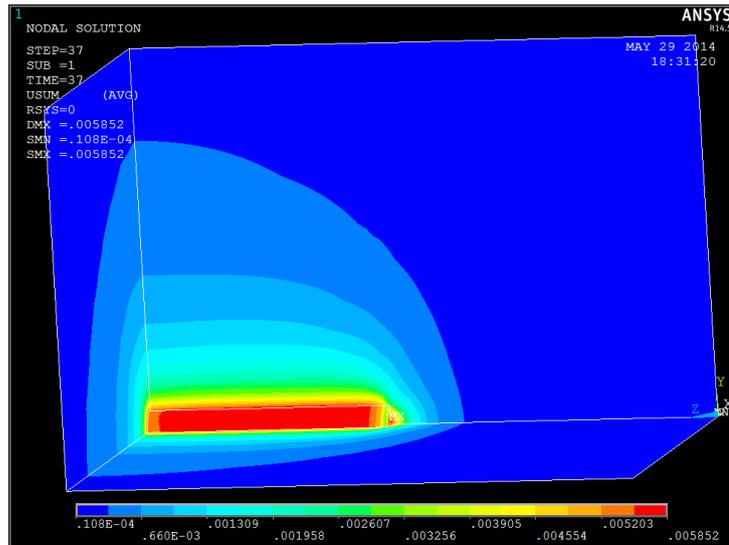


Figura 46: Deslocamento no modelo 3D no ANSYS, com revestimento (m).

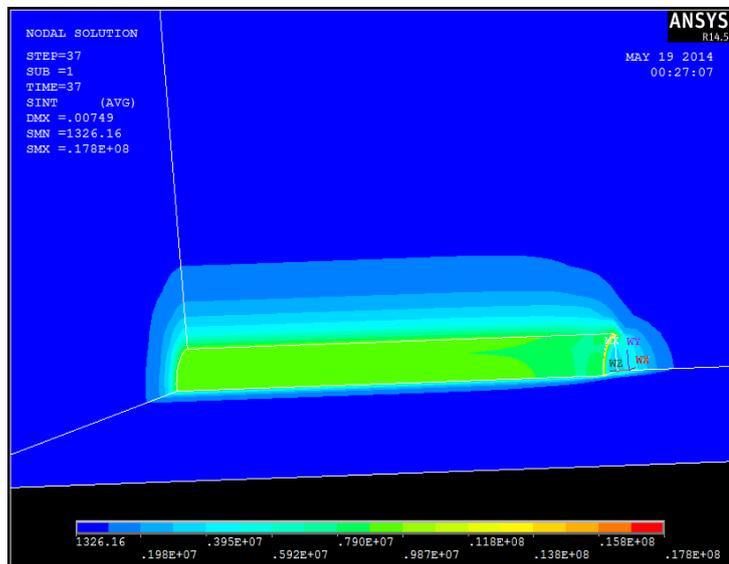


Figura 47: Tensões no modelo 3D no ANSYS, sem revestimento (Pa).

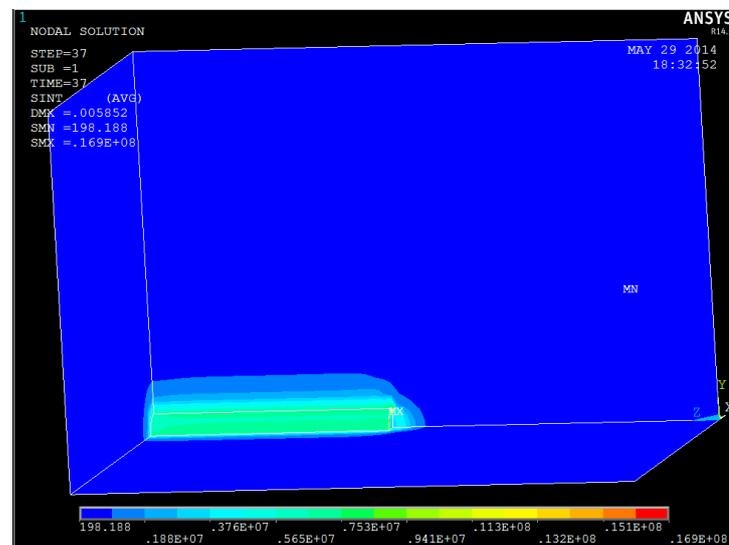


Figura 48: Tensões no modelo 3D no ANSYS, com revestimento (Pa).

As curvas de convergência obtidas no caso 3D são ilustradas na Figura 49.

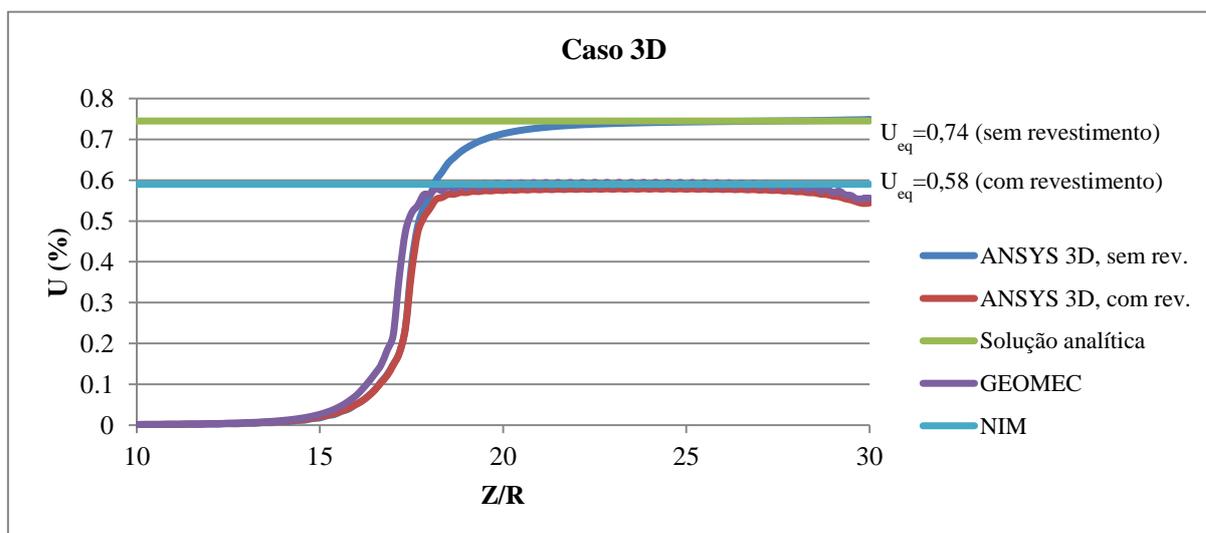


Figura 49: Curvas de convergência do caso 3D em elasticidade.

### 7.1.6 Resultados da validação em elasticidade

Os cálculos no ANSYS foram rápidos, da ordem de 1 e 8 minutos para os casos 2D e 3D, respectivamente, pois todos os materiais têm comportamento elástico.

No caso do túnel não revestido, comparam-se os resultados obtidos na solução analítica e no ANSYS. Eles apresentam uma perfeita coincidência nos dois casos: 2D axissimétrico e 3D, Figura 41 e Figura 49.

Também no caso do túnel com revestimento os resultados obtidos no GEOMECC91, NIM e no ANSYS, em ambos os casos, deram resultados muito semelhantes, que podem ser observados nos gráficos das Figura 41 e Figura 49.

No caso do túnel revestido, o problema torna-se mais complexo e não existe uma solução analítica. A comparação dos valores é verificada apenas através dos resultados computacionais (ANSYS, GEOMECC91 e NIM), e constitui uma validação dos códigos. Assim, fica demonstrado o bom desempenho da abordagem do ANSYS.

## 7.2 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM ELASTICIDADE

A validação feita anteriormente permite utilizar o programa ANSYS para tratar a problemática do túnel em outros casos.

### 7.2.1 Análise paramétrica

Neste trabalho, são comparadas as curvas de convergência do túnel em maciços rochosos com diferentes módulos de Young  $E$ . Também variam-se a rigidez do revestimento  $K_s$  e o processo construtivo representado pela distância do revestimento à face do túnel  $d_0$ . Todos os materiais têm comportamento elástico.

O mesmo modelo 3D feito no ANSYS para a validação é utilizado no estudo paramétrico. Neste modelo as variações são:

- A. Módulo de Young do maciço  $E_s$ :
  - a)  $E_s=1000$  MPa;
  - b)  $E_s=2000$  MPa;
  - c)  $E_s=5000$  MPa;
  - d)  $E_s=10000$  MPa.
- B. Rigidez do revestimento  $K_s$  representada pelo módulo de Young do concreto  $E_c$ :
  - a)  $E_c=30000$  MPa corresponde a  $K_s=3600$  MPa;
  - b)  $E_c=3000$  MPa corresponde a  $K_s=360$  MPa;
  - c)  $E_c=300$  MPa corresponde a  $K_s=36$  MPa;
- C. Distância  $d_0$  do revestimento à face do túnel:
  - a)  $d_0=0$ .
  - b)  $d_0=2/3R$ ;
  - c)  $d_0=4/3R$ ;

### 7.2.2 Resultados do estudo paramétrico

Os resultados dos diferentes casos podem ser analisados nos gráficos da Figura 50 à Figura 58.

Como previsto, para todos os casos estudados pode-se observar que o terreno se deforma mais quando o seu módulo de Young é menor e quando o revestimento é menos rígido.

Em relação ao processo construtivo pode-se observar que quanto maior for o  $d_0$ , maiores são os deslocamentos do maciço.

Pode-se observar que as curvas das Figura 52, Figura 55 e Figura 58 são muito similares. Isto é devido ao fato que para uma rigidez muito pequena ( $K_s=36$  MPa) a distância  $d_0$  tem pouca influência nas curvas de convergência.

O caso com menor convergência, de 0,07%, é aquele que tem menor distância à face do túnel ( $d_0 = 0$ ), maior rigidez do revestimento ( $K_s = 3600$  MPa) e maior módulo de elasticidade do maciço ( $E = 10000$  MPa), (Figura 50). A maior convergência, de 0,7%, corresponde ao caso em que a distância à face do túnel é a maior ( $d_0 = \frac{4}{3} R$ ), a rigidez do revestimento é menor ( $K_s = 36$  MPa) e o módulo de elasticidade menor ( $E = 1000$  MPa), Figura 58.

Pode-se observar também que para um módulo de Young alto da rocha ( $E=10000$  MPa), os resultados mudam muito pouco com as variações feitas em cada caso. No caso de um módulo de Young menor ( $E=1000$  MPa) cada variação feita para os distintos casos influi muito na convergência resultante.

Mantendo constante  $d_0=0$  e variando os outros parâmetros citados, obtêm-se os gráficos das Figura 50, Figura 51 e Figura 52.

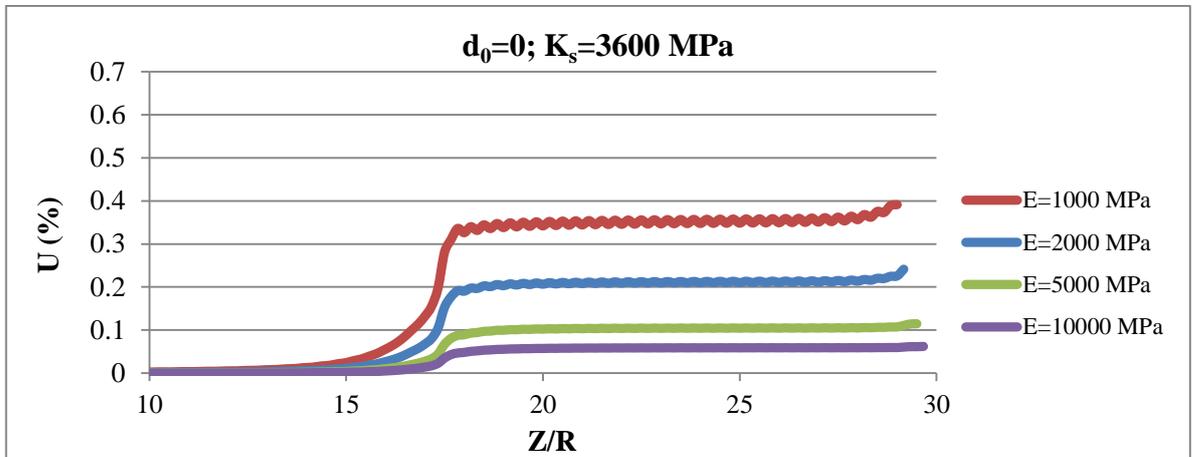


Figura 50: Curvas de convergências para  $d_0=0$  e  $K_s=3600$  MPa.

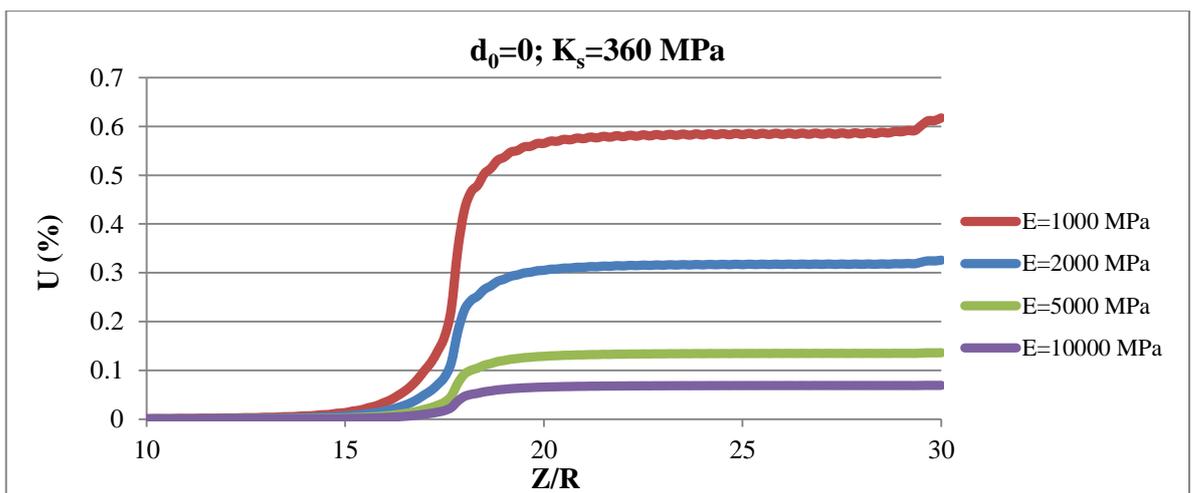


Figura 51: Curvas de convergências para  $d_0=0$  e  $K_s=360$  MPa.

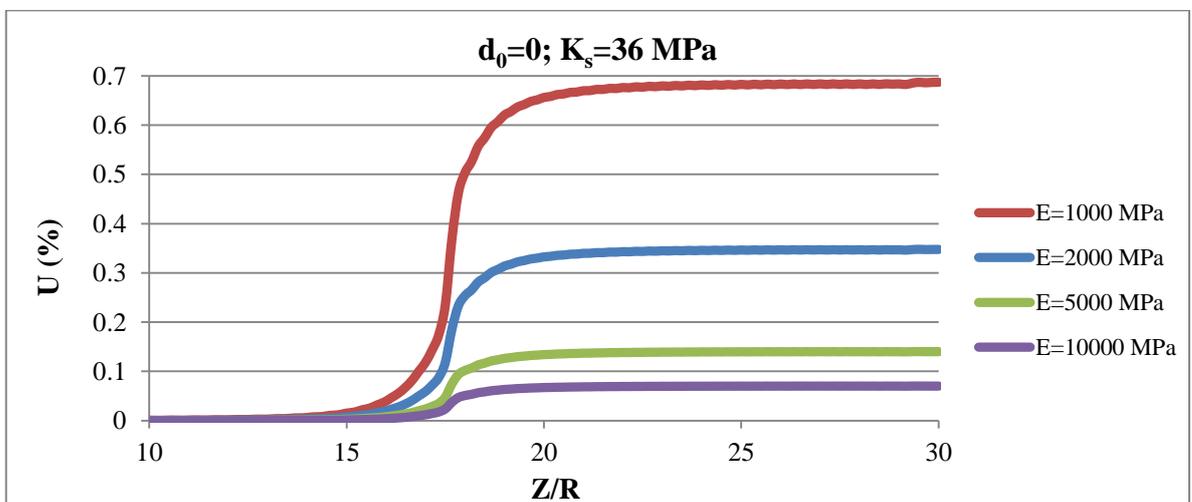


Figura 52: Curvas de convergências para  $d_0=0$  e  $K_s=36$  MPa.

Mantendo constante  $d_0=2/3R$  e variando os outros parâmetros citados, obtêm-se os gráficos das Figura 53, Figura 54 e Figura 55.

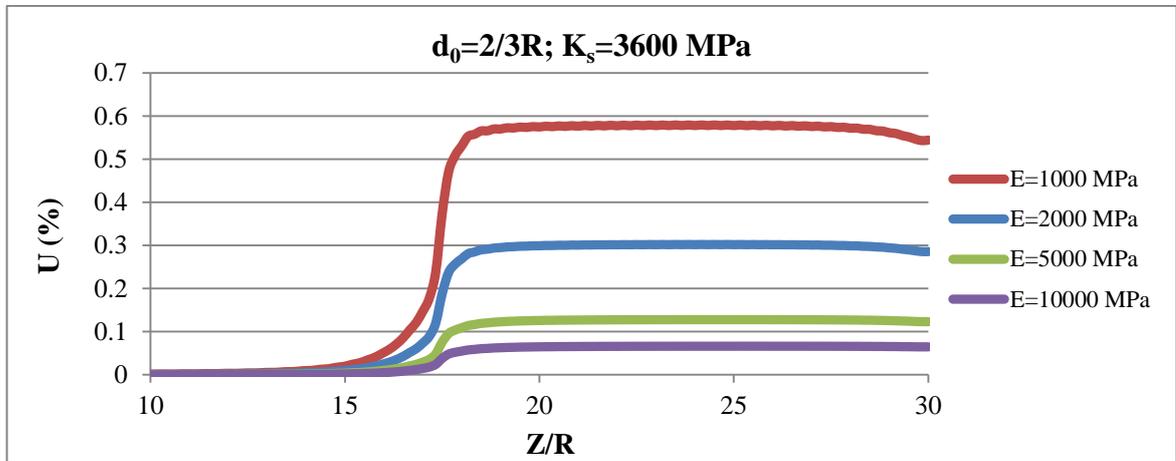


Figura 53: Curvas de convergências para  $d_0=2/3R$  e  $K_s=3600$  MPa.

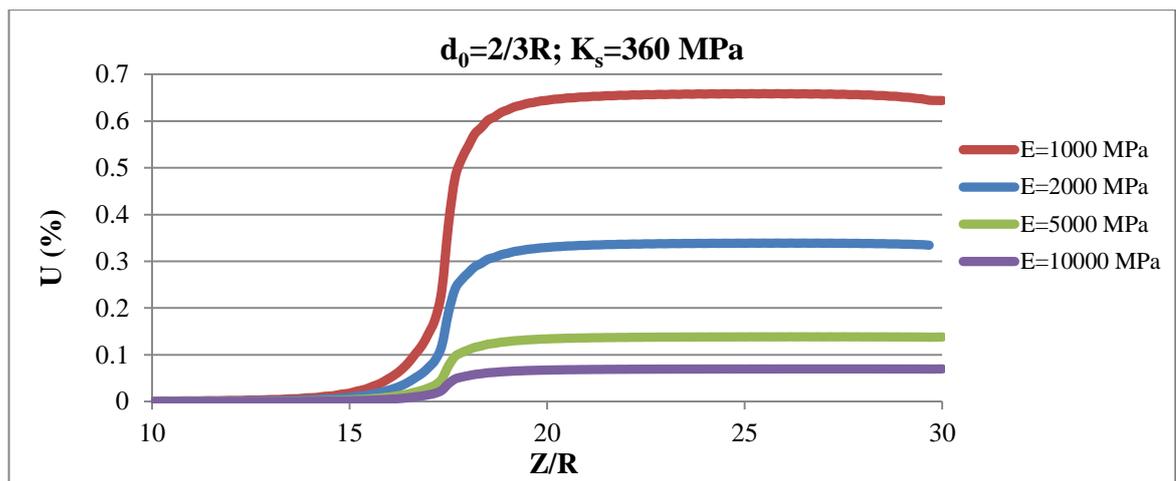


Figura 54: Curvas de convergências para  $d_0=2/3R$  e  $K_s=360$  MPa.

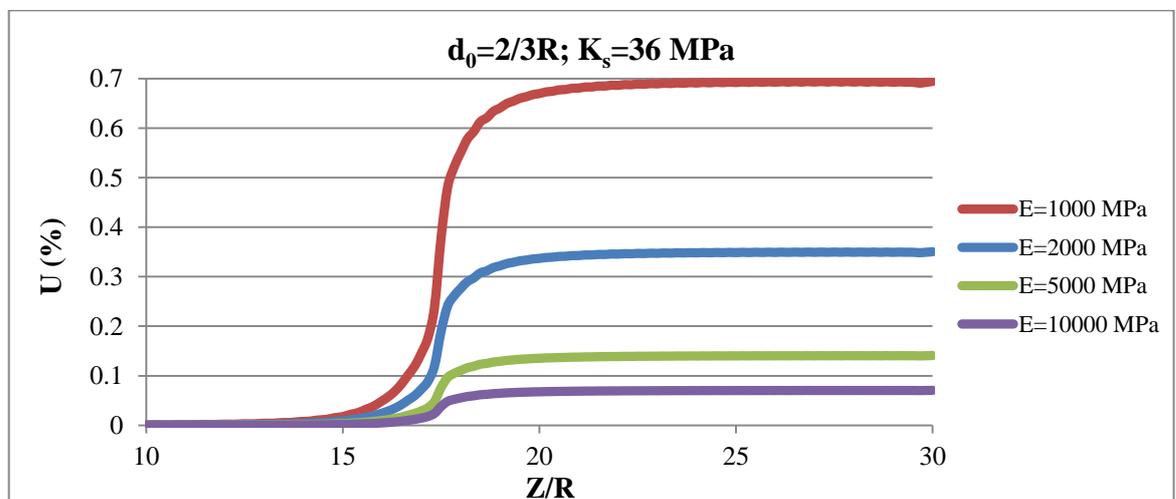


Figura 55: Curvas de convergências para  $d_0=2/3R$  e  $K_s=36$  MPa.

Mantendo constante  $d_0=4/3R$  e variando os outros parâmetros citados, obtêm-se os gráficos das Figura 56, Figura 57 e Figura 58.

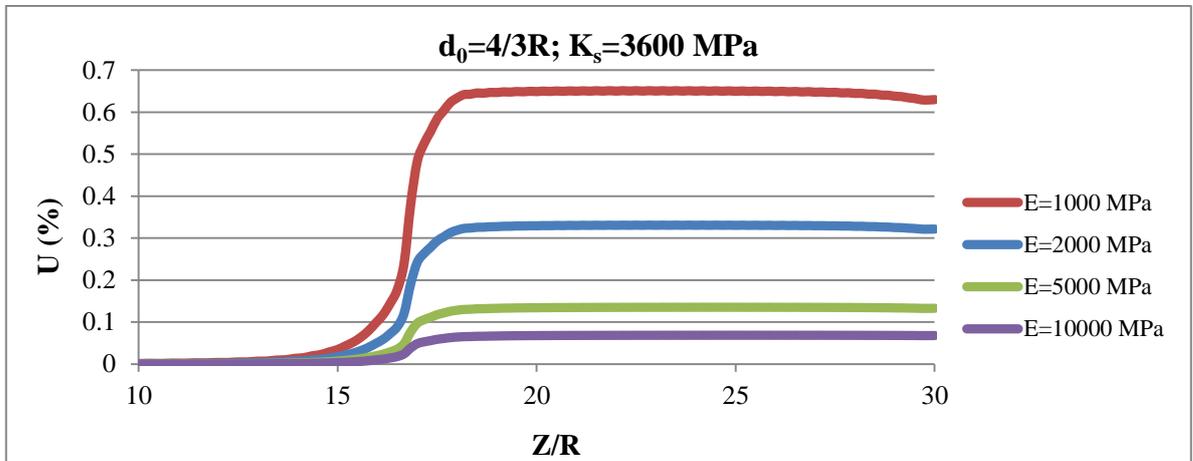


Figura 56: Curvas de convergências para  $d_0=4/3R$  e  $K_s=3600$  MPa.

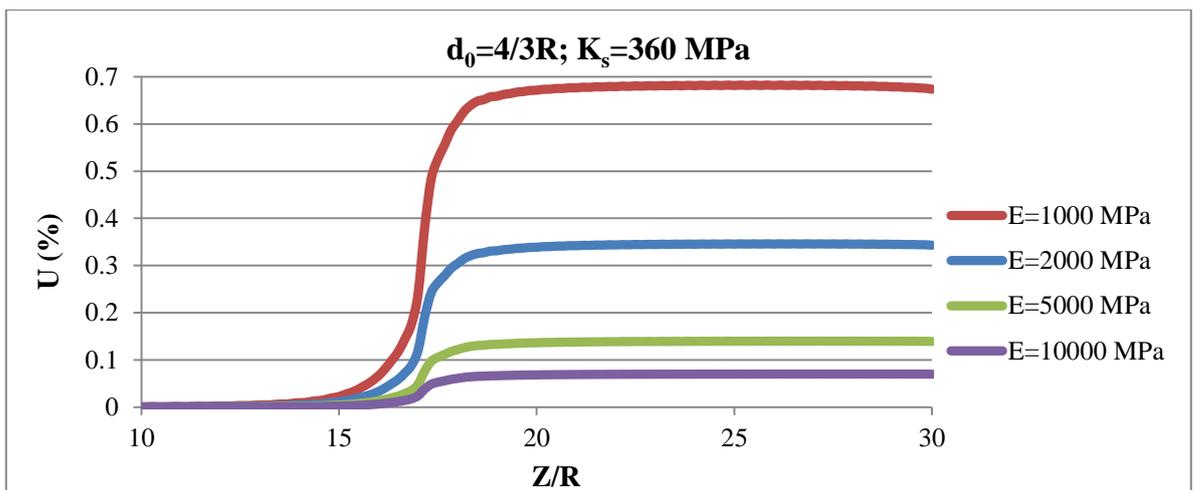


Figura 57: Curvas de convergências para  $d_0=4/3R$  e  $K_s=360$  MPa.

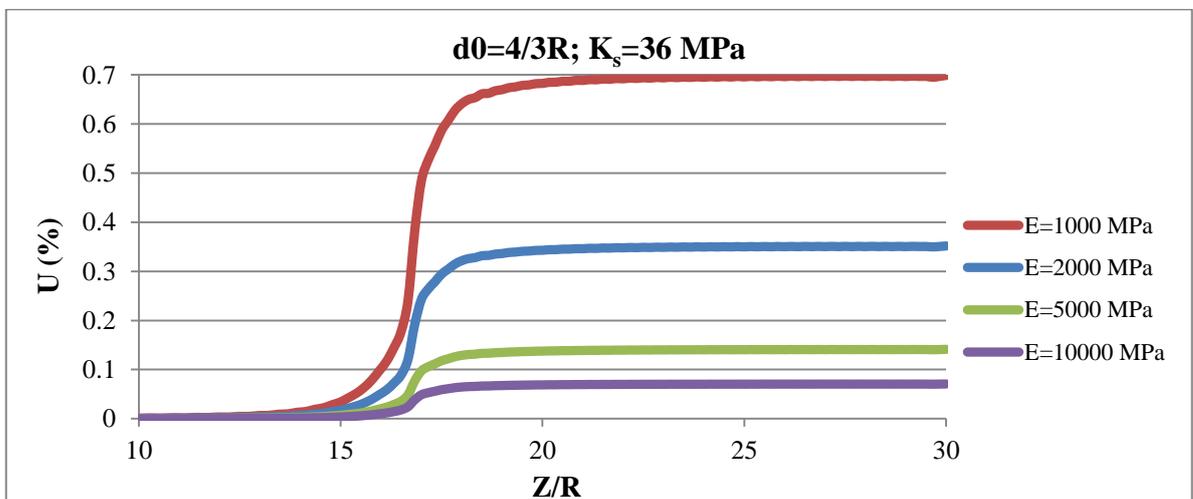


Figura 58: Curvas de convergências para  $d_0=4/3R$  e  $K_s=36$  MPa.

### 7.2.3 Conclusões da elasticidade

O programa ANSYS constitui uma ferramenta de qualidade para a simulação de túneis. Ele foi devidamente avaliado por meio de várias comparações citadas nas Figura 41 e Figura 49. Os resultados obtidos em ambos os casos da validação foram muito satisfatórios.

Neste trabalho variam-se os diferentes parâmetros de um túnel 3D em elasticidade no programa ANSYS para mostrar a relevância de cada um deles.

O estudo paramétrico realizado permite ter uma visão global do comportamento, em elasticidade, de um túnel profundo revestido em elasticidade e permite projetá-lo com maior precisão, analisando diferentes soluções variando os processos construtivos e distintas características do suporte e do maciço.

A relevância dos estudos paramétricos por simulação em um programa está em tornar mais fácil o trabalho de projeto de túneis; permitindo a escolha da configuração mais vantajosa. Por estas razões tais técnicas são cada vez mais atrativas.

## 7.3 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA ANSYS COM MACIÇO VISCOPLÁSTICO

### 7.3.1 Solução analítica

No caso de um túnel não revestido, existe a solução analítica em plasticidade, da convergência do túnel escavado em um maciço homogêneo, com seção transversal circular. A correlação com a viscoplasticidade ocorre no tempo infinito. Assim, pode-se comparar o resultado da convergência na plasticidade com o resultado da convergência na curva de estabilização do modelo viscoplástico.

Em plasticidade de Tresca, a convergência se mostra na equação (73), segundo Corbetta (1990):

$$U_{\infty} = \frac{1+\nu}{E} C e^{\left(\frac{P_{\infty}}{c}-1\right)} \quad (73)$$

Para ter a convergência em plasticidade de Mises, é necessário levar em conta a relação dada pela equação (74):

$$C_{Mises} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot C_{Tresca} \quad (74)$$

### 7.3.2 GEOMECC91

Neste caso a configuração do programa é feita para a lei de comportamento de viscoplasticidade de Mises.

### 7.3.3 ANSYS

O esquema de simulação é o mesmo que o descrito na seção 7.1.5.2. As análises são quasi-estáticas.

Neste caso utiliza-se para o maciço, um material não linear, viscoplástico, com lei de comportamento em plasticidade perfeita de Mises.

O programa ANSYS utiliza a formulação de Perzyna conforme à equação (75):

$$\hat{\varepsilon}_{pl} = \gamma \left( \frac{\sigma}{\sigma_o} - 1 \right)^{1/m} \quad (75)$$

Onde:

$\sigma$  é a tensão,

$\hat{\varepsilon}_{pl}$  é a taxa de deformação equivalente,

$m$  é o parâmetro relacionado à taxa de deformação do material,

$\gamma$  é o parâmetro relacionado à viscosidade do material; e

$\sigma_o$  é a tensão de escoamento uniaxial.

### 7.3.4 Parâmetros do modelo

A diferença em relação ao caso elástico é que neste caso, o maciço é viscoplástico sem endurecimento, com as seguintes características citadas na Tabela 8.

Tabela 8: Propriedades do maciço viscoplástico.

	<b>Maciço</b>
$E$	1000 MPa
$\nu$	0,498
$P_{\infty}$	4 MPa
$\gamma$	0,0000001 s <sup>-1</sup>
$m$	1
$\sigma_0$	3 MPa

O revestimento continua sendo elástico linear com as mesmas propriedades que no primeiro caso, mostrados na Tabela 6.

O modelo descrito foi realizado em 3D com hipóteses de axissimetria para os casos de um túnel não revestido e com revestimento de concreto. As comparações foram feitas segundo os resultados obtidos do programa ANSYS, do programa GEOMECC91 e da solução analítica (caso do túnel não revestido). A comparação em cada caso é descrita no seguinte esquema da Figura 59.

#### VISCOPLASTICIDADE:



Figura 59: Esquema das comparações para a validação do modelo em viscoplasticidade.

Foi utilizado um passo a mais, para simular a estabilização ao longo do tempo. Então se tem uma curva que corresponde ao final da construção do túnel, depois das 36 escavações e uma curva de estabilização que corresponde a um tempo muito grande depois do final da construção do túnel, que representa a situação em um tempo infinito.

#### 7.3.5 Resultados da validação em viscoplasticidade

Os cálculos no programa ANSYS em 3D são da ordem de 10 minutos.

As curvas obtidas nos cálculos, para o caso sem revestimento e para o caso com revestimento, são respectivamente, Figura 60 e Figura 61:

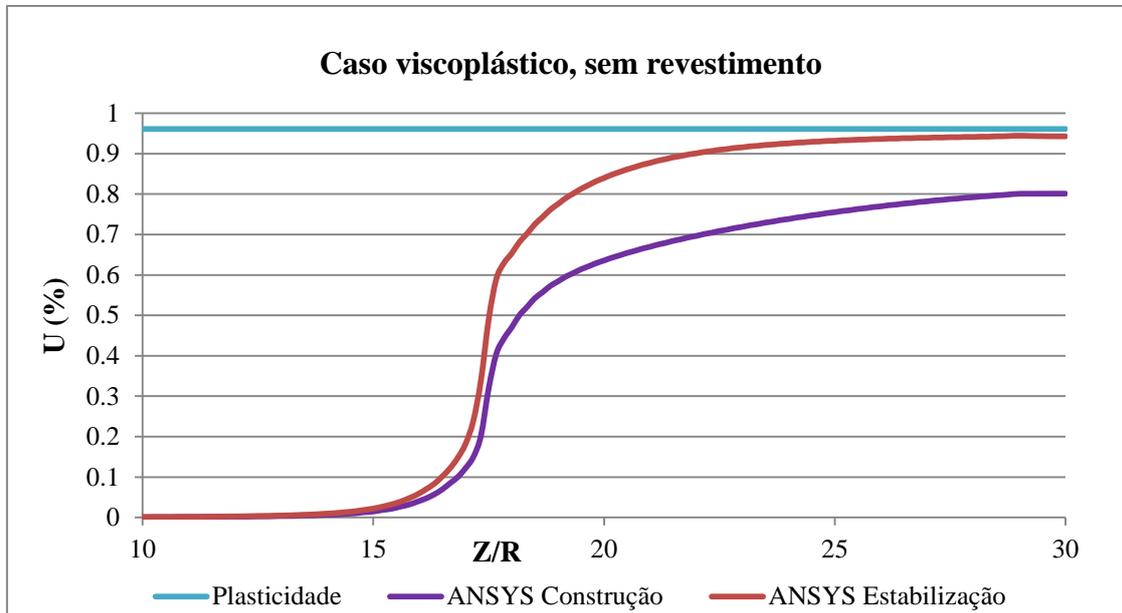


Figura 60: Curvas de convergência, caso sem revestimento.

No caso do túnel não revestido, comparam-se os resultados obtidos na solução analítica da plasticidade e no ANSYS. Eles apresentam uma boa aproximação na estabilização, correspondente a um tempo infinito, como mostra a Figura 60.

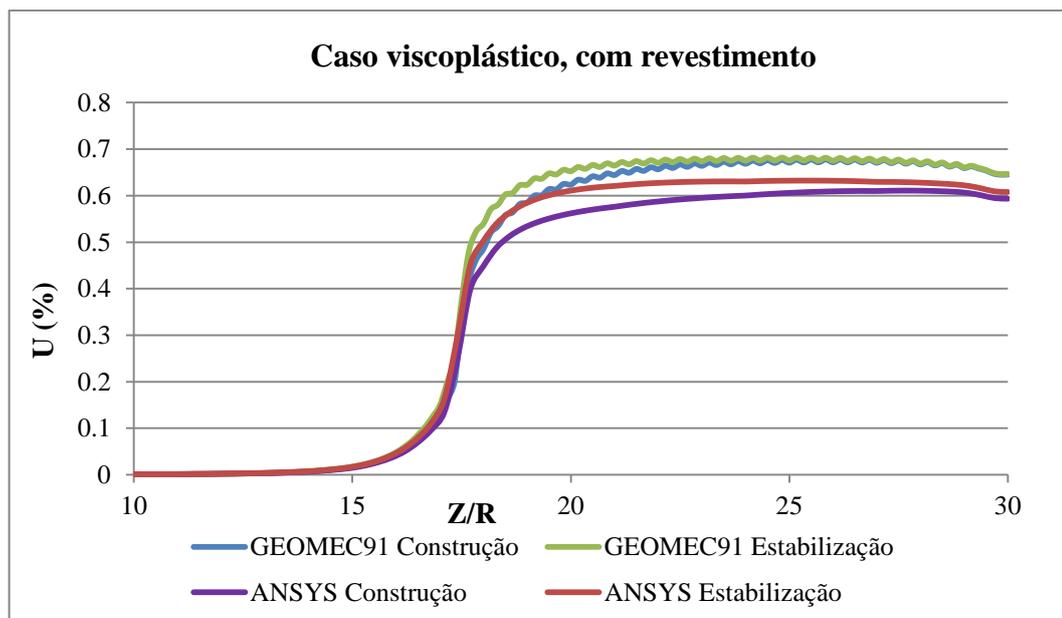


Figura 61: Curvas de convergência, caso com revestimento.

No caso do túnel com revestimento, os resultados obtidos no programa GEOMECC91 e no ANSYS, deram resultados com características semelhantes, que podem ser observados nos gráficos da Figura 61.

As duas curvas de estabilização em ambos os programas estão acima das curvas correspondentes ao tempo depois da construção. A curva de estabilização tende a ser horizontal, enquanto que a outra curva tende a ser crescente. Este aspecto pode se notar melhor na parcela do maciço perto da face do túnel, entre os 18 e 21 m no eixo longitudinal do túnel. Esta parcela ainda está deformando-se conforme o tempo vai passando.

Os programas ANSYS e GEOMECC91 trabalham com leis de viscoplasticidade diferentes em alguns aspectos da formulação. Por esta razão as curvas não coincidem perfeitamente. Existe uma diferença de 5,9% entre as duas curvas no fim da construção e 4,8% entre as duas curvas na estabilização. Não obstante, pode-se dizer que os modelos se correspondem bem pelas características anteriormente observadas nas curvas, mesmo sendo calculadas com diferentes formulações.

Assim, fica demonstrado o bom desempenho da abordagem do programa ANSYS para um maciço viscoplástico.

#### 7.4 REPRESENTAÇÃO DE UM TÚNEL UTILIZANDO AS CADEIAS DE MAXWELL E KELVIN

Neste capítulo, apresenta-se a simulação do processo de construção de um túnel e colocação do revestimento através do programa ANSYS. Combina-se o comportamento viscoplástico do maciço e o comportamento viscoelástico do concreto no revestimento do túnel. A lei de comportamento viscoelástico para o concreto é incorporada por meio da sub-rotina *usermat*, pelo processo explicado anteriormente na seção 6.1.

Na simulação são comparados os modelos de Maxwell e Kelvin, para concreto projetado e pré-moldado. Pode-se comparar a convergência do túnel para cada caso em vários instantes e a evolução dos valores para um nó ao longo do tempo.

### 7.4.1 Parâmetros do modelo

Na simulação foram utilizados um concreto viscoelástico e um maciço viscoplástico com as características apresentadas na Tabela 9 e Tabela 10:

Tabela 9: Propriedades do concreto viscoelástico.

Parâmetros	Concreto
$\nu$	0,2
$f_{cm28}$	4 kN/cm <sup>2</sup>
RH	65 %
h (espessura fictícia)	200 mm
Temperatura	20 C
n	5
$\alpha$	0
$t_s$	3 e 28 días
$\alpha_{as}$	700
$\alpha_{ds1}$	4
$\alpha_{ds2}$	0,012
s	0,25

Adaptando a fórmula da espessura fictícia  $h = 2A_c/u$  em termos de volume  $V$ , fica  $h = 2V/A$ . Considera-se uma porção de revestimento de 1000 mm x 1000 mm x 100 mm de espessura. A área exposta é só a face interior. Assim a espessura fictícia fica em 200 mm.

Para o maciço viscoplástico foram utilizados os parâmetros da Tabela 10, segundo a formulação citada na equação (75):

Tabela 10: Propriedades do maciço viscoplástico.

Parâmetro	Solo
$E$	1000 MPa
$\nu$	0,498
$P_\infty$	5 MPa
$\gamma$	0.0000001 s <sup>-1</sup>
$m$	1

Para simular as escavações foram levadas em conta as condições apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Parâmetros do processo de construção do túnel.

Parâmetros	Processo de construção
Modelo	20m x 20m x 30m
R	1 m
L	13 m
e	0,1 R
p	1/3 R
d <sub>0</sub>	2/3 R
V	10 m/dia

Esta velocidade foi escolhida porque é a velocidade normal de uma tuneladora.

A malha e as condições de contorno correspondem às apresentadas na seção 7.1.5.2

#### 7.4.2 Relatório do processo no ANSYS

A entrada de dados é feita por um arquivo .txt que o ANSYS lê como arquivo de entrada.

A simulação consta de vários passos. Primeiramente é criado o modelo completo, com o material 1 correspondente ao maciço viscoplástico. Também é duplicado o revestimento (624 elementos duplicados), com mesmos nós. Assim, o total de elementos fica em  $7504+624=8128$  elementos. Os elementos duplicados são criados com material 2 (*usermat*) e logo desativados. É feita a malha do modelo e são colocadas as condições de contorno e pressão interna, como nos casos anteriores. O primeiro passo é resolvido e corresponde ao equilíbrio, onde os deslocamentos são iguais a zero em todos os pontos da malha.

No passo seguinte é feita a primeira escavação, de 1 metro de comprimento (144 elementos), desativando estes elementos. Nos passos seguintes continuam as escavações (48 elementos) e colocação de revestimento (16 elementos), ativando estes elementos.

Ao ativar os elementos de concreto, eles são trocados para um novo material, no qual a sua idade é controlada segundo o tempo em que é ativado o elemento. Assim por diante até alcançar o comprimento desejado do túnel.

Ao alcançar o comprimento desejado, os passos têm como objetivo acabar de preencher com revestimento o túnel completo, porém não continuam as escavações. Logo, os últimos passos constituem a estabilização, nos quais o túnel se deforma ao longo do tempo.

### 7.4.3 Resultados

Para simplificar a nomenclatura de cada caso, de agora em diante vão ser utilizadas as seguintes abreviaturas: os casos resolvidos com formulação do modelo Kelvin terão o código KE e com o Maxwell o código MA, seguido do sinal “-“ e logo a letra J ou M segundo seja concreto projetado ou pré-moldado.

Nos gráficos da Figura 62, Figura 63, Figura 64 e a Figura 65 se apresentam as convergências do túnel em vários instantes de tempo, para cada caso de formulação do concreto.

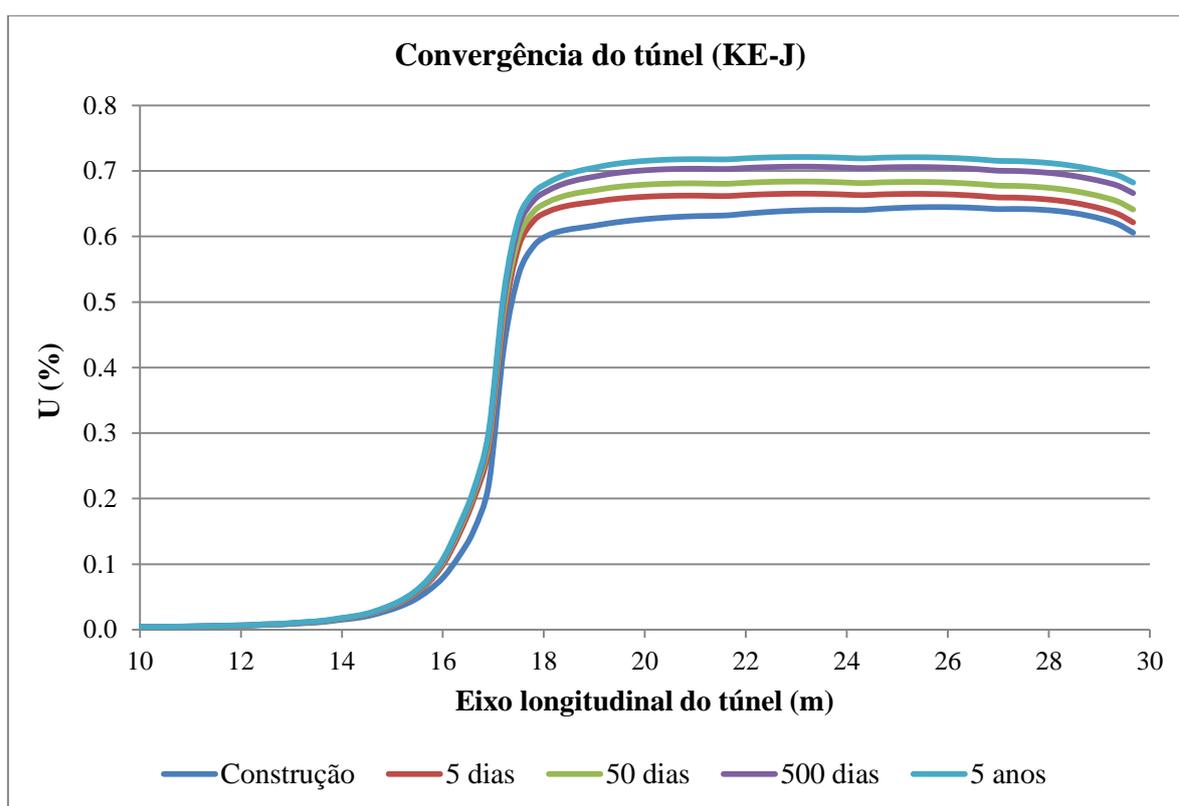


Figura 62: Convergência no caso KE-J.

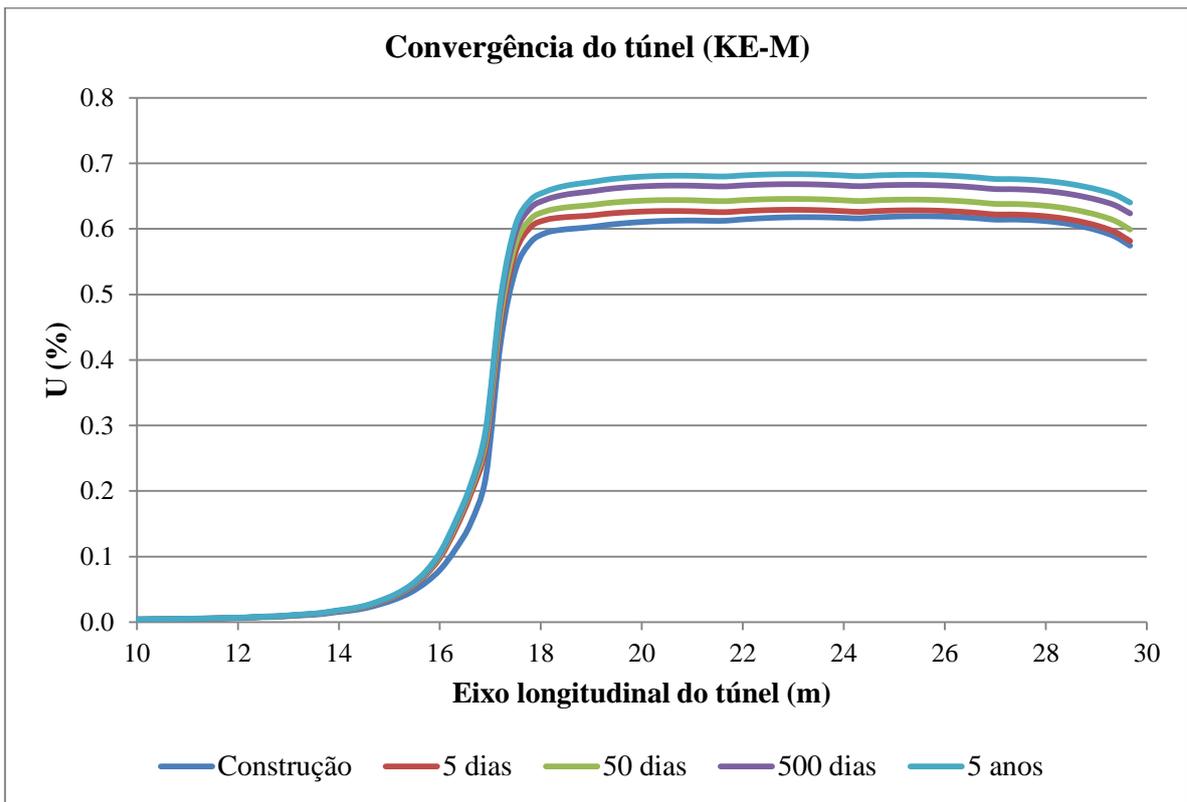


Figura 63: Convergência no caso KE-M.

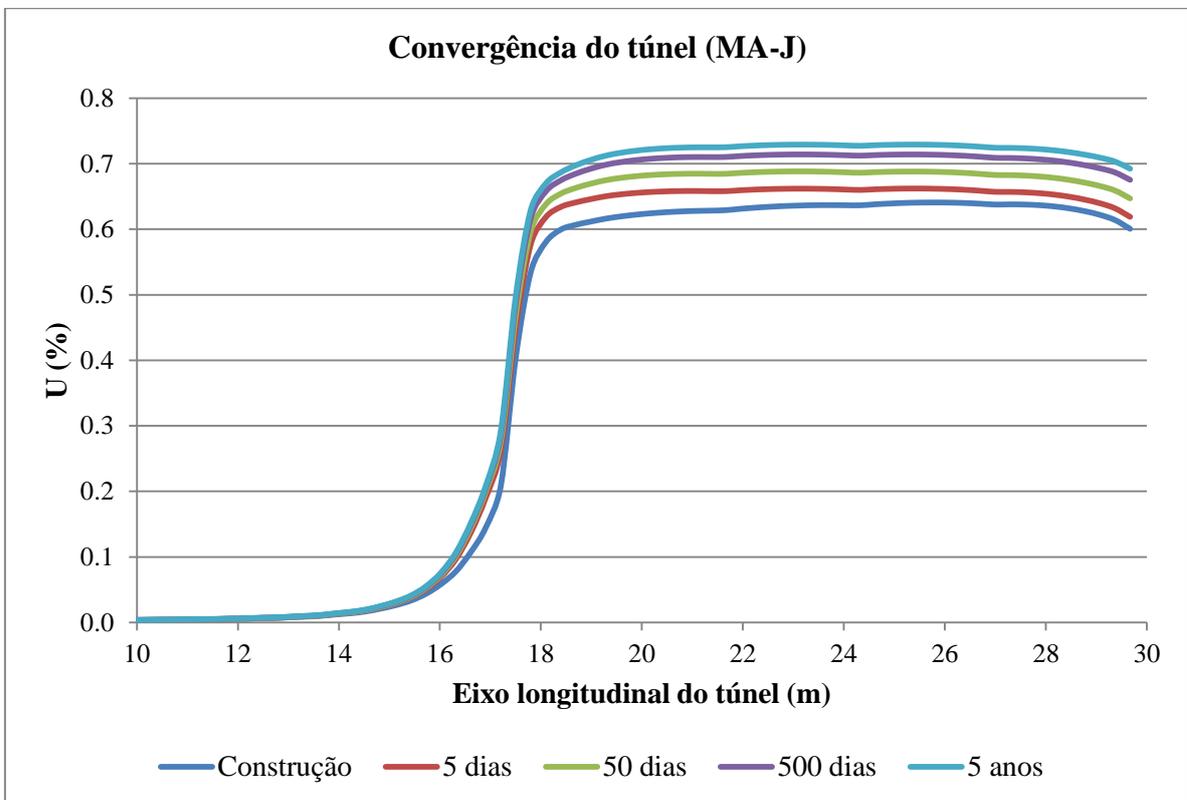


Figura 64: Convergência no caso MA-J.

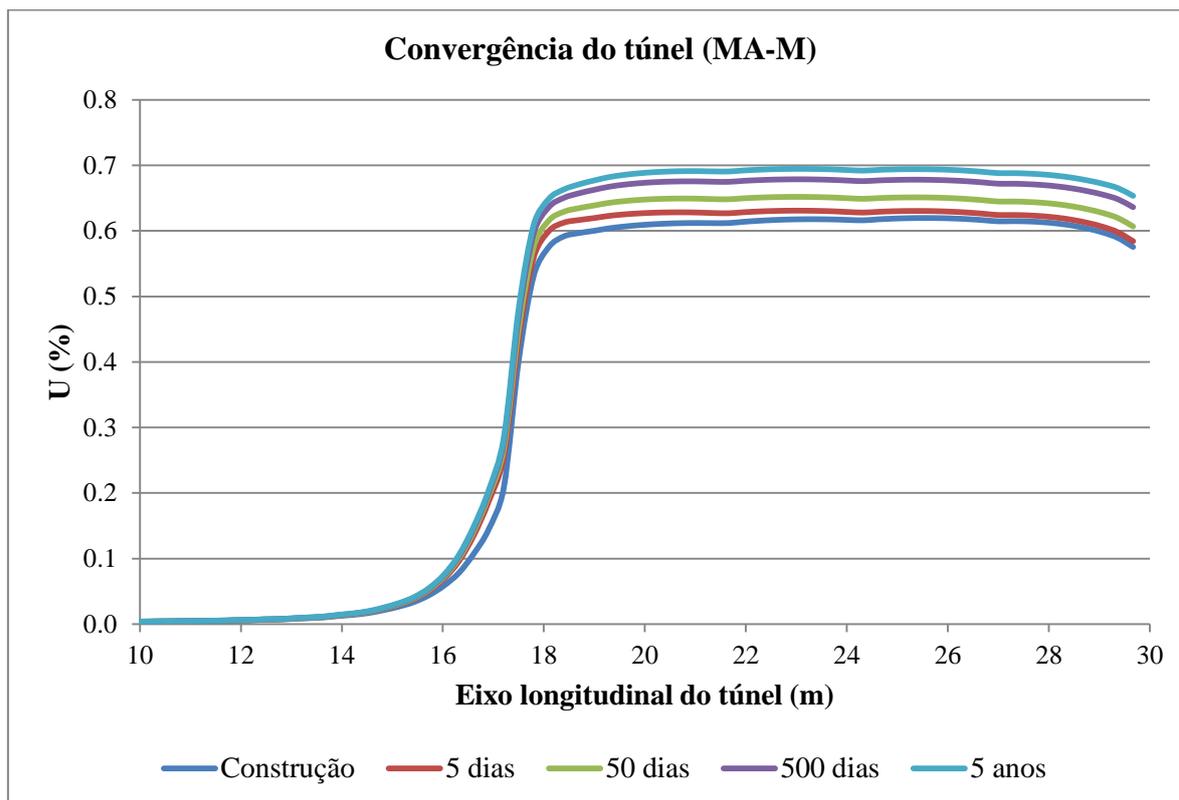


Figura 65: Convergência no caso MA-M.

Devido ao comportamento viscoelástico do concreto e ao comportamento viscoplástico do maciço pode-se observar que a deformação radial do túnel continua ao longo do tempo, tendendo à estabilização. Entre a construção e os cinco dias as deformações aumentam rapidamente; entre os 5 dias e 50 dias aumentam em menor proporção. Entre os 50 dias e 500 dias (1,37 anos) a deformações aumentam um pouco, logo entre os 500 dias e 5 anos aumentam muito pouco. Pelas hipóteses do modelo implementado neste estudo, o concreto não rompe devido à configuração viscoelástica do material. Ele continua se deformando ao longo do tempo, cada vez com um incremento de deformação menor.

Note-se que na comparação das curvas da construção e as curvas em  $t=5$  dias, ao redor dos 19 m no eixo longitudinal apresenta-se uma diferença maior. Isso acontece devido a que no momento do fim da construção, nesse lugar, encontram-se os elementos de revestimento com idades menores, enquanto que no final do eixo encontram-se os elementos de revestimento que foram colocados no começo da construção.

Na Figura 66 mostra-se a convergência em todos os casos de modo a comparar as formulações de Maxwell e Kelvin, os casos de concreto projetado e pré-moldado e os tempos ao final da construção e depois de 5 anos.

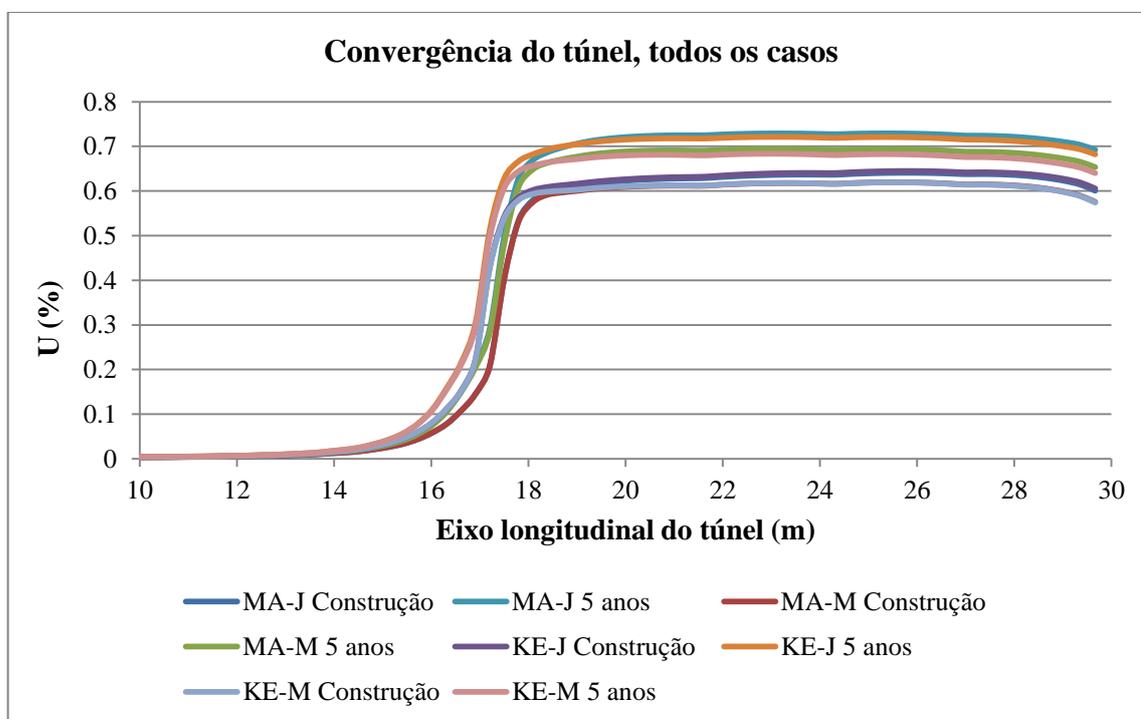


Figura 66: Convergência em todos os casos depois da construção e aos 5 anos.

As curvas no final da construção apresentam uma coincidência satisfatória. Depois dos 5 anos é possível observar que o caso de Maxwell projetado se deforma mais que os outros.

Em geral, os casos de Maxwell deformam mais que os correspondentes aos de Kelvin.

Para avaliar o comportamento ao longo do tempo em um ponto do revestimento, foi estudado um nó. Foi escolhido o nó número 11430 (sendo as coordenadas x,y,z do ponto no modelo, em cm: -70,71; 70,71; 2883,33) que corresponde a um elemento do revestimento número 4. Foi escolhido um nó um pouco afastado da face limite do modelo, para que não sofresse efeito das condições de contorno. Este nó está indicado em uma seção transversal, na Figura 67.

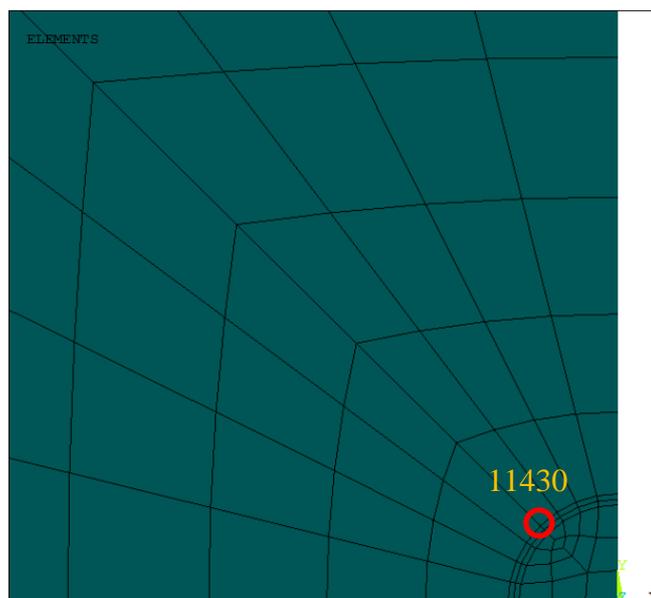


Figura 67: Localização do nó 11430.

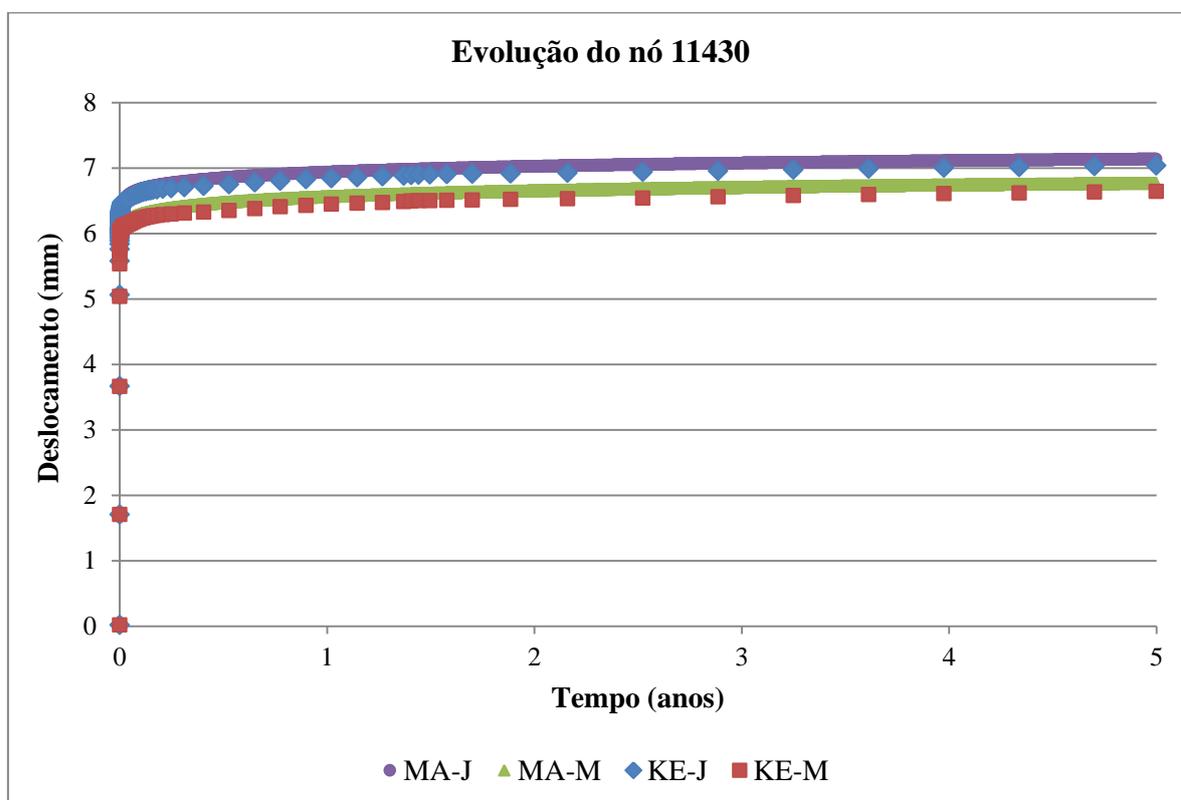


Figura 68: Evolução do nó 11430 ao longo do tempo

Os 4 casos podem ser vistos na Figura 68. Como já foi observado antes, nos casos resolvidos com Maxwell o nó se desloca mais. E as curvas do concreto pré-moldado sempre estão

embaixo das curvas do concreto projetado, devido ao fato que o concreto pré-moldado é colocado quando o concreto já tem uma rigidez maior que no caso do concreto projetado.

#### 7.4.4 Comparação entre os modelos de Kelvin e de Maxwell

No modelo de Kelvin as deformações viscosas totais são calculadas independentemente dos passos anteriores e convergem sem problemas mesmo mudando o tamanho dos passos de tempo. No modelo de Maxwell as deformações viscosas totais são determinadas em uma formulação explícita, muito instável, e que é muito sensível às mudanças do tamanho dos passos de tempo. Os cálculos com o modelo de Maxwell foram feitos para um passo de tempo de um dia, enquanto com o modelo de Kelvin o passo de tempo foi crescente, avançando muito mais rápido. O processo com o modelo de Kelvin demorou, nesta análise, em torno de 35 minutos e para o caso do modelo de Maxwell umas 7 horas, utilizando o computador citado anteriormente no começo do capítulo.

A densidade dos pontos nas curvas da Figura 68 mostra que as curvas de Kelvin têm menos quantidade de pontos e as curvas do Maxwell apresentam maior densidade de pontos, devido aos passos de tempo requeridos para a resolução. Ao longo de todo o processo computacional o programa salvou resultados para 1872 valores de tempo no caso de Maxwell, enquanto que no caso de Kelvin o programa salvou uma quantidade de 100 valores de tempo.

Desacoplando o efeito instantâneo do envelhecimento, é possível descrever o comportamento diferido com o modelo da cadeia de Kelvin utilizando propriedades  $E_\mu$  e  $\eta_\mu$  independentes do tempo. Este fato representa uma considerável simplificação.

#### 7.4.5 Comparação entre os resultados do concreto pré-moldado e concreto projetado

O concreto projetado e o pré-moldado são diferenciados pela idade. Supõe-se que o concreto pré-moldado é colocado com 28 dias de idade, enquanto o concreto projetado começa atuar com a idade da rigidez mínima correspondente a 2,8 dias. Isto é formulado por meio de um parâmetro escolhido no arquivo *input* do ANSYS que indica se o concreto vai ser considerado projetado ou pré-moldado. Este parâmetro e o número do revestimento ingressam na sub-rotina como dados do material. A idade de cada elemento de concreto é calculada na *usermat* com os dados próprios do material e o tempo geral que ingressa como variável de entrada (Figura 32 e Figura 33).

O tempo de cura é considerado de 2,8 dias para o concreto projetado e de 31 dias para o concreto pré-moldado. Eles possuem diferentes módulos de elasticidade no instante da aplicação da carga.

A convergência aos 5 anos é maior em 12%, 14%, 10%, 12% para os casos KE-J, MA-J, KE-M, MA-M, respectivamente, em relação à convergência no instante da construção.

No instante da colocação do revestimento, a diferença na convergência do concreto projetado e pré-moldado é de 4% para o método de Kelvin e de 3% para o método de Maxwell. Aos 5 anos, a diferença na convergência do concreto projetado e pré-moldado é de 6% para o método de Kelvin e de 5% para o método de Maxwell.

## 7.5 REPRESENTAÇÃO DO TÚNEL KIELDER

Nesta seção se compara o comportamento do túnel experimental Kielder da bibliografia disponível e o modelo resolvido no ANSYS.

Ward (1983) descreve a história e o processo de construção do túnel experimental e apresenta os resultados correspondentes.

Utilizando esses dados e resultados, pode-se comparar a convergência do túnel em ambos casos (real e modelo numérico).

### 7.5.1 Descrição do túnel Kielder

O túnel experimental Kielder foi construído para ajudar a projetar e construir o túnel “Kielder Water Scheme” na Inglaterra, de 32 km de comprimento e 3,3 m de diâmetro.

A localização do túnel foi escolhida adjacente ao túnel principal, de modo a atravessar 3 diferentes estratos: argilito (mudstone), siltito (limestone) e arenito (sandstone), como mostram a Figura 69 e a Figura 70 que teria o túnel principal.

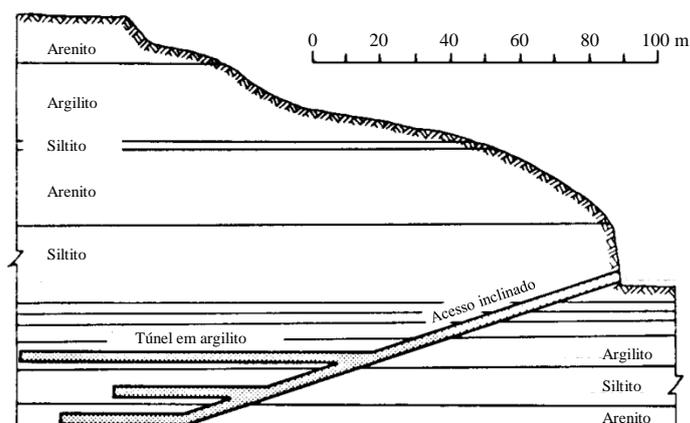


Figura 69: Corte do terreno do túnel Kielder. Adaptação de Ward (Ward, et al., 1976).

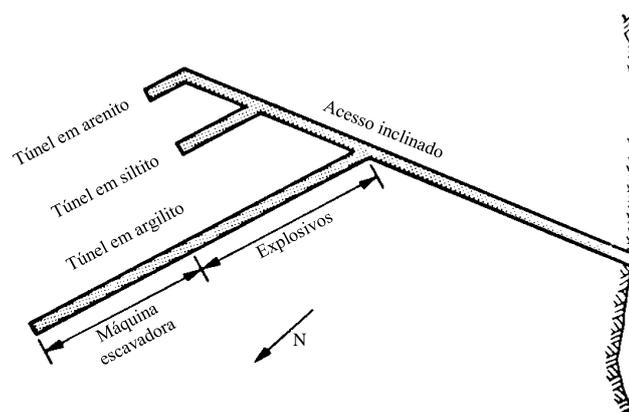


Figura 70: Planta da região do túnel Kielder. Adaptação de Ward (Ward, et al., 1976).

A construção do túnel experimental começou em 1974 e foi fechado em 1979, depois de ser monitorado por 5 anos. A maioria dos estudos foi feita em argilito, como mostra a Figura 70, que seria o estrato que traria maiores dificuldades em relação ao revestimento.

Os objetivos deste túnel experimental eram: comparar o comportamento de diferentes sistemas de suporte, ganhar experiência na construção dos suportes mais novos (em tecnologia), pesquisar o efeito dos métodos de escavação (explosivos ou máquina escavadora) no comportamento do revestimento e entender melhor a interação maciço-revestimento, em termos de cargas no suporte e deslocamento do maciço, como ocorrem em um túnel real.

Sete diferentes suportes foram utilizados no trecho do túnel em argilito e dois métodos de escavação foram utilizados. Cada trecho com suporte diferente foi de 11 m de comprimento. A primeira parte foi escavada com explosivos e os suportes foram: (a) anéis de aço, (b)

tirantes passivos de 1,8 m de comprimento, (c) arco de concreto projetado junto com (b), (d) concreto projetado em arco. A segunda parte do túnel experimental foi escavada com máquina escavadora (cabeça de corte Dosco) e os suportes foram: (e) arco de concreto projetado com tirantes passivos, como o (c), (f) revestimento de aço de 12,7 mm de espessura colado ao maciço, (g) anel de concreto projetado com malha de aço, (h) sem suporte. Pode-se observar a disposição dos trechos na Figura 71.

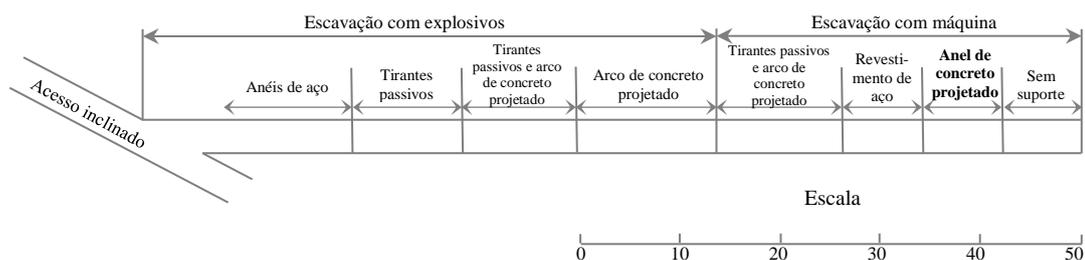


Figura 71: Trechos do túnel experimental Kielder. Adaptação de Freeman (T J Freeman, 1978).

A instrumentação foi colocada a 30 cm acima do revestimento, na parte central de cada trecho para evitar efeitos de extremidade. Os instrumentos mediram os deslocamentos da rocha ao longo de 5 anos. Na Figura 72 se mostra o comportamento dos diferentes suportes estudados.

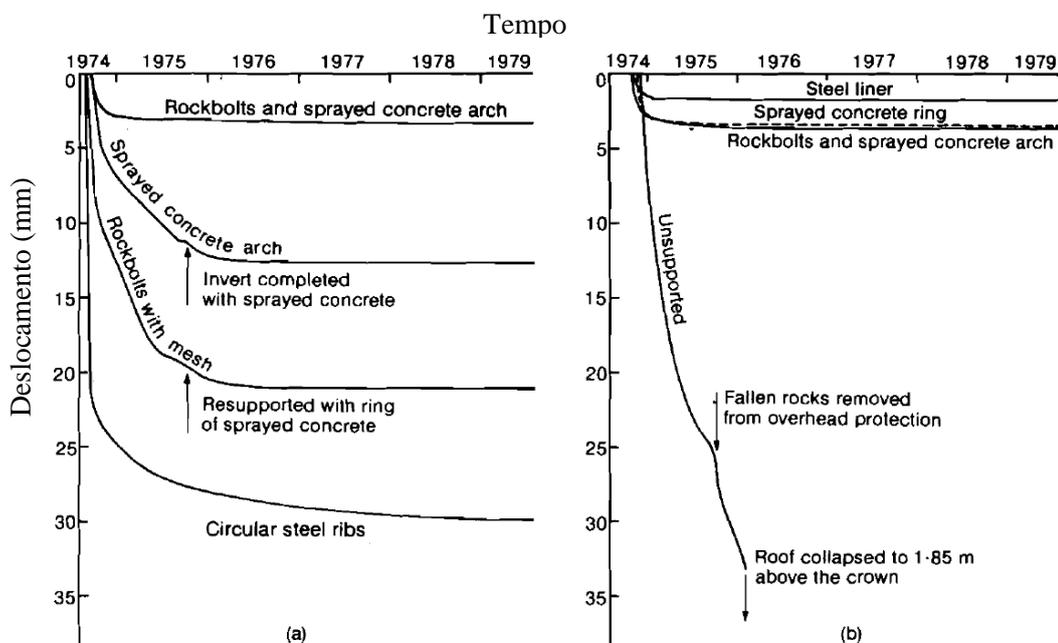


Figura 72: Deslocamento a 0,3 m por encima do revestimento para todos os tipos de revestimento (Ward, et al., 1983). a) Escavações com explosivos b) Máquina escavadora

### 7.5.2 Parâmetros do modelo

Nesta simulação, analisa-se o processo de construção do túnel Kielder, comparando-se os resultados com valores experimentais. Na simulação vai ser utilizado o modelo de Kelvin. Os parâmetros físicos e geométricos, utilizados na simulação, estão baseados nos trabalhos de Ward (1983) e Freeman (1978).

Foram utilizados um concreto viscoelástico e um maciço viscoplástico com as características apresentadas na Tabela 12 e Tabela 13:

Tabela 12: Propriedades do concreto no túnel Kielder.

Parâmetros	Concreto
$\nu$	0,2
$f_{cm28}$	4 kN/cm <sup>2</sup>
RH	80 %
h (espessura fictícia)	200 mm
Temperatura	28 C
n	5
$\alpha$	0
$t_s$	3 e 28 días
$\alpha_{as}$	700
$\alpha_{ds1}$	4
$\alpha_{ds2}$	0,012
s	0,25

Tabela 13: Propriedades do maciço.

Parâmetros	Maciço
E	1200 MPa
$\nu$	0,3

Para o modelo de Perzyna, do ANSYS, foram utilizados os parâmetros da Tabela 14 segundo a formulação citada na equação (75):

Tabela 14: Parâmetros de entrada do modelo de Perzyna

Parâmetros	Modelo de Perzyna
$m$	1
$\gamma$	0.0000001 s <sup>-1</sup>
$\sigma_o$	0,48 MPa

Para simular as escavações foram levadas em conta as condições apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15: Parâmetros do processo de construção do túnel.

Parâmetros	Processo de construção
Modelo	15m x 15m x 20m
R	1,65 m
L	11 m
e	0,143 m
$P_{\infty}$	2,7 MPa
p	1/3 R
$d_0$	2/3 R
V	10 m/dia

A velocidade de escavação não está especificada na documentação disponível, assim, adotara-se a mesma velocidade dos casos anteriores.

A malha tridimensional contém 3904 elementos hexaédricos e 16599 nós e pode ser observada na Figura 73.

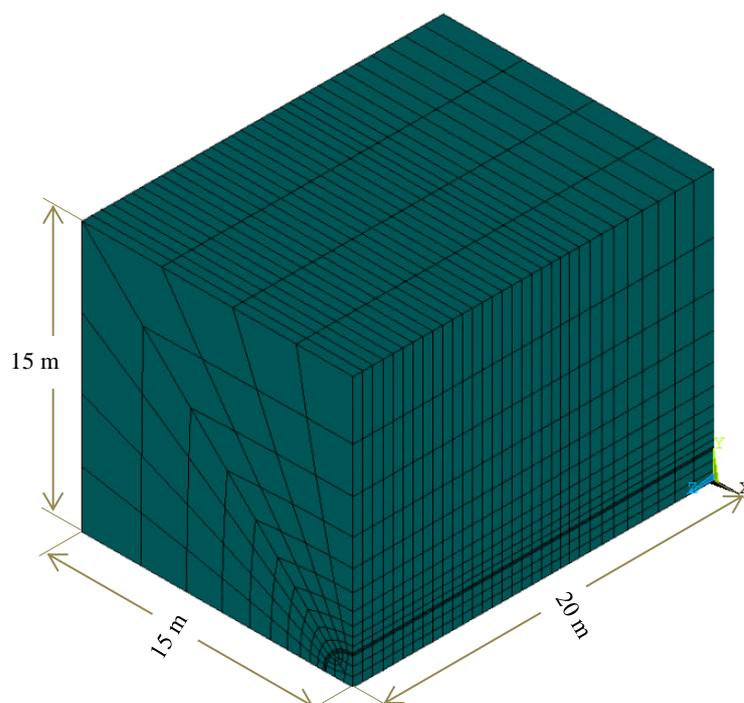


Figura 73: Malha tridimensional

A disposição das condições de contorno são as mesmas que nos casos anteriores (seção 7.1.5.2), mas com diferentes valores numéricos, conforme a Figura 74.

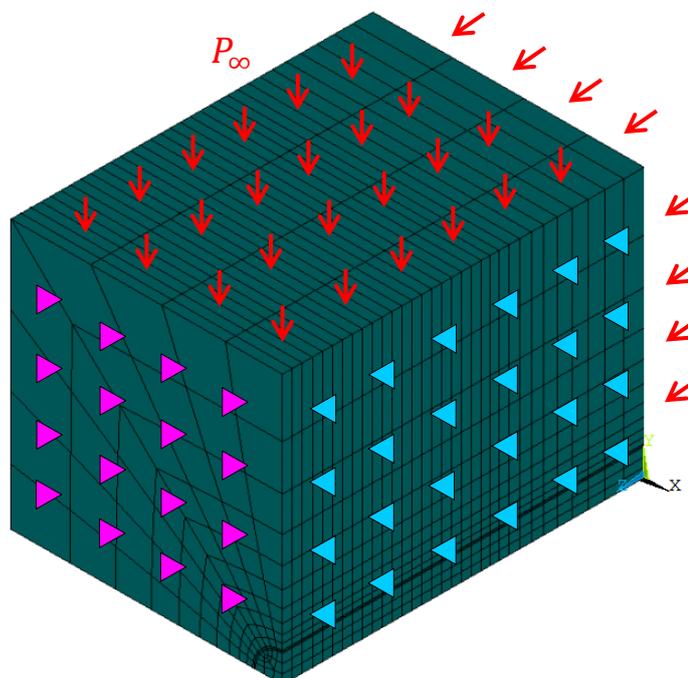


Figura 74: Condições de contorno no túnel Kielder.

O processo no ANSYS é o mesmo que o relatado na seção 7.4.2.

### 7.5.3 Resultados

Na Figura 76, mostra-se a evolução do deslocamento do nó 9724, que fica no meio do trecho longitudinal do túnel e a 47 cm do revestimento. Foi escolhido este nó para comparar com os resultados do instrumento de medição colocado a 30 cm do revestimento, no meio do trecho do túnel real.

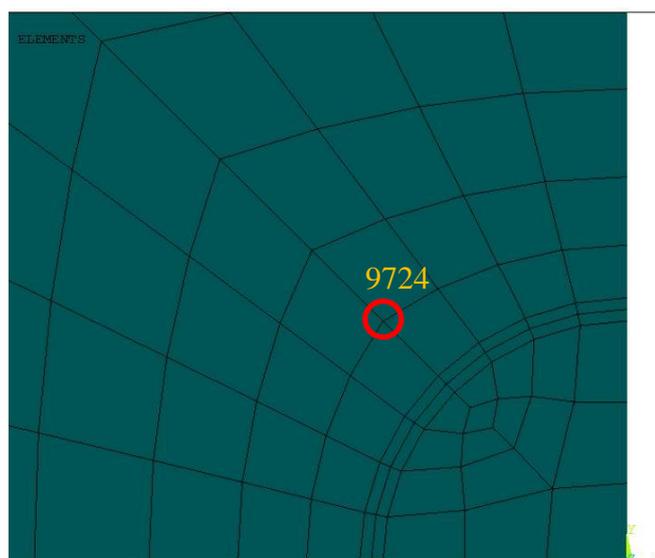


Figura 75: Localização do nó 9724.

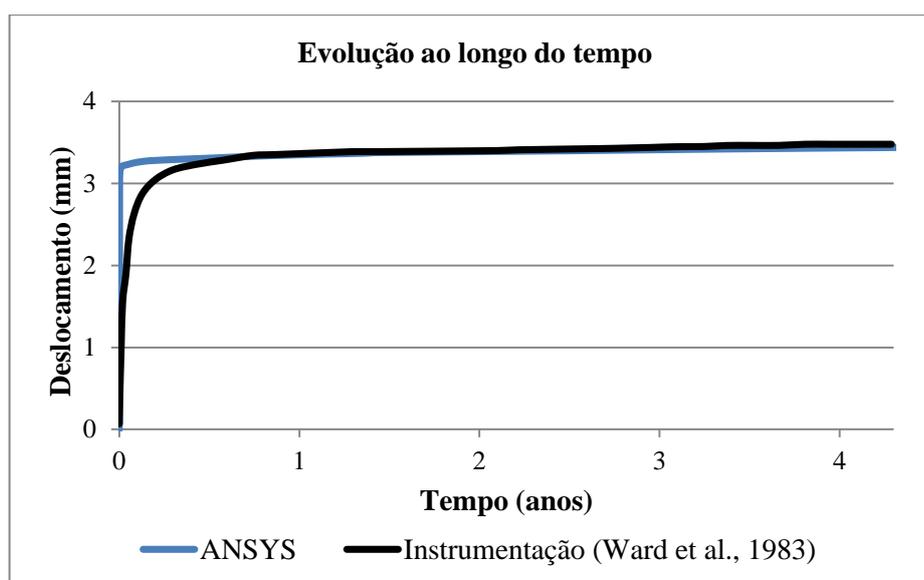


Figura 76: Comparação dos resultados ao longo do tempo.

O gráfico da Figura 76 mostra que o resultado a longo prazo coincide com as medições no local. Observe-se entre tanto uma diferença nos resultados a curto prazo; isto se deve ao desconhecimento das propriedades dos materiais não disponíveis na bibliografia consultada. A curva da medição da instrumentação do revestimento de anel de concreto projetado foi extraída da Figura 72, do trabalho de Ward (1983).

## 8 CONCLUSÕES

O programa ANSYS demonstrou ser uma ferramenta útil na simulação de escavações de um túnel e colocação do revestimento por meio do comando ativação/desativação.

Primeiro foi demonstrado o bom desempenho da abordagem do programa ANSYS com materiais com comportamento elástico, utilizando para isso as comparações com o programa GEOMECC91 (Bernaud, 1991), o método NIM (Bernaud & Rousset, 1992) e a solução analítica Corbetta (1990) quando o túnel não tem revestimento.

No estudo paramétrico em elasticidade, foram variados os seguintes parâmetros: o módulo de elasticidade do maciço  $E_s$ , a rigidez do revestimento  $K_s$  e a distância de colocação do revestimento  $d_0$ . Este estudo permite analisar a influência de cada um dos parâmetros para projetar um túnel com maior precisão, analisando diferentes soluções e variando os processos construtivos e as características do suporte.

Em uma segunda etapa, estuda-se o maciço com a lei de comportamento em viscoplasticidade e comparam-se os resultados obtidos pelo programa ANSYS com o programa GEOMECC91. Os resultados foram bastante satisfatórios.

A seguinte variação no modelo foi a incorporação do modelo viscoelástico no concreto do revestimento do túnel. Estes modelos, de Maxwell e de Kelvin (Bazant, 1988), antes foram testados comparando cada um com a formulação do Código Modelo *fib* 2010 (Fédération Internationale du Béton, 2012). Assim, foi demonstrado que os métodos de Kelvin e de Maxwell podem representar o comportamento do concreto viscoelástico.

O modelo de Kelvin ao considerar propriedades  $E_\mu$  e  $\eta_\mu$  independentes do tempo e calcular o efeito de envelhecimento do concreto em forma independente, computacionalmente, é mais conveniente e econômico. O método de Kelvin não apresenta problemas de convergência, enquanto que o método de Maxwell é sensivelmente instável devido a sua formulação explícita e atualização dos parâmetros. Além disso o processo na formulação de Maxwell é

mais extenso. Pelas causas citadas, o tempo total de cálculo é maior no método de Maxwell em relação ao método de Kelvin.

No caso do túnel com revestimento viscoelástico foram apresentados dois tipos de concreto: o concreto projetado e o concreto pré-moldado. Eles são diferenciados nas suas idades e nos correspondentes módulos de elasticidade no instante da colocação. Para um mesmo método, estes dois revestimentos apresentaram pouca diferença, da ordem de 3 a 6%, na convergência nos instantes analisados. A convergência obtida ao longo do tempo varia entre 10 e 14% comparando o instante do fim da construção e aos 5 anos, para os diferentes métodos utilizados. A escolha do revestimento depende do tipo de túnel e do maciço circundante.

Finalmente tudo o que foi feito anteriormente é utilizado para representar um trecho revestido em concreto projetado de um túnel real, o túnel Kielder, construído na Inglaterra (Ward, et al., 1983). Neste caso, para representar o revestimento do túnel foi utilizado o método de Kelvin, pelas vantagens de convergência e tempo de cálculo. A convergência do túnel aos 5 anos no programa ANSYS foi comparada com os resultados da instrumentação disponível, apresentando uma boa correspondência.

A relevância da simulação de um túnel em um programa de elementos finitos está em tornar mais fácil o trabalho de projeto, permitindo a escolha da configuração mais vantajosa em termos de projeto e construção. O programa ANSYS em elementos finitos permite obter uma ampla variedade de resultados numéricos, bem como as diversas opções visuais de pós-processamento. Isto tem um papel importante na análise de um projeto.

O comportamento do revestimento em concreto projetado e concreto pré-moldado depende do tempo. A incorporação dos modelos viscoelásticos por meio de sub-rotinas no programa ANSYS permite representar com maior precisão o comportamento a longo prazo do concreto, especialmente para estudar o revestimento de um túnel onde é importante o seu comportamento diferido.

Por estas razões tais técnicas são cada vez mais atrativas na representação de modelos numéricos para obras de arte (o túnel neste caso), aproveitando assim os recursos de pré e pós-processamento de um programa comercial. Por outro lado a utilização de um programa comercial, como o ANSYS, permite incorporar modelos adicionais de acordo com o caso, desenvolvidos para análises de determinadas situações, diferentes das opções originalmente oferecidas pelo programa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFTES, 2000. AFTES Recommendations. In:: [www.aftes.asso.fr](http://www.aftes.asso.fr), ed. *Design of Sprayed Concrete for Underground Support*. s.l.:Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, p. 36.
- AFTES, 2001. AFTES Recommendations. In:: [www.aftes.asso.fr](http://www.aftes.asso.fr), ed. *The Convergence-confinement Method*. s.l.:Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, p. 11.
- ANSYS, 2012. *Mechanical APDL Element Reference*, Versão 14.5: ANSYS Inc.
- ANSYS, 2012. *Mechanical APDL Structural Analysis Guide*, Versão 14.5: ANSYS, Inc..
- ANSYS, 2013. *Mechanical APDL Programmer's Reference*, Part II: Guide to User-Programmable Features. Versão 15: ANSYS, Inc.
- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J., 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics* 6, pp. 189-236.
- Bazant, Z. P., 1988. *Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete*. s.l.:John Wiley & Sons.
- Bazant, Z. & Prasannan, S., 1988. Solidification theory for aging creep. *Cement and Concrete Research*, Volume 18, pp. 923-932.
- Bernaud, D., 1991. Tunnels profonds dans les milieux viscoplastiques: approches expérimentale et numérique. *Thèse de Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, França*.
- Bernaud, D. & Rousset, G., 1992. "New Implicit Method" to study tunnel design. *Revue Française de Géotechnique*, Volume 60, pp. 5-26.
- Bieniawski, Z. T., 1989. *Engineering Rock Mass Clasifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.

- Comitê Brasileiro de Túneis, 2006. *Túneis do Brasil*. São Paulo: DBA Dórea Books and Arts.
- Comité Euro International du Béton, 1993. CEB-FIP Model Code 1990: Design Code. *Bulletin d'Information*, p. 437.
- Corbetta, F., 1990. Calculs Analytiques et Numériques de Tunnels Profonds. *Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, França*.
- Couto, E., 2011. *Um modelo tridimensional para túneis escavados em rocha reforçada por tirantes passivos.*, Porto Alegre, Brasil: Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Creus, G. J., 1986. *Viscoelasticity - Basic Theory and Applications to Concrete Structures*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
- Fédération Internationale du Béton, 2012. Fib Model Code 2010. Final Draft. 1(Bulletins 65), p. 350.
- Gomes, R., 2006. *Análise tridimensional de túneis considerando o comportamento dependente do tempo na interação maciço-suporte*, São Carlos: Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Jiménez Montoya, P., García Meseguer, Á. & Morán Cabré, F., 2001. *Hormigón Armado*. 14 ed. Barcelona: Gustavo Gil S.A..
- Karakus, M. & Fowell, R. J., 2004. An insight into the New Austrian Tunneling Method (NATM). In: *ROCKMEC'2004: The VIIth Regional Rock Mechanics Symposium*. Sivas: s.n., p. 14.
- Möller, S. C. & Vermeer, P. A., 2004. NATM - Tunneling in Softening Stiff Clays and Weak Rocks. *Proceedings of the Ninth International Symposium on 'Numerical Models in Geomechanics - NUMOG IX'*, pp. 407-414.
- Pande, G. N., Owen, D. R. J. & Zienkiewicz, O. C., 1977. Overlay models in time-dependent non-linear material analysis. *Computers and Structures*, 7(3), pp. 435-443.
- Panet, M. & Guellec, P., 1974. Contribution à l'Etude du Soutènement d'un Tunnel à l'Arrière du Front de Taille. *Proc. 3rd Int. Cong. Rock Mechanics, IIB*.

Rousset, G., 1988. Comportement Mécanique des Argiles Profondes. Application au Stockage de Déchets Radioactifs. *Thèse de Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, França.*

Rzhia, F., 1872. *Lehrbuch der Gesamten Tunnelbunkunst. Band II.* Berlin: Ernst & Sohn.

Sauer, G., 2003. *NATM and Its Toolbox.* New York, Earth Retentions Systems.

T J Freeman, B., 1978. The behaviour of fully-bonded rock bolts in the Kielder Experimental tunnel. *Tunnels & Tunneling*, June, pp. 37-40.

Tchuyep Piepi, G., 1995. Comportement viscoplastique avec rupture des argiles raides. Applications aux ouvrages souterrains.. *Thèse de Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, França.*

The British Tunneling Society and The Institution of Civil Engineers, 2004. *Tunnel lining design guide.* 1st ed. London: Thomas Telford Ltd.

Ward, W. H., Coats, D. J. & Tedd, P., 1976. Performance of tunnel support systems in the Four Fathom mudstone. *Proc. of Tunneling '76*, pp. 329-340.

Ward, W. H., Tedd, P. & Berry, N. S. M., 1983. The Kielder experimental tunnel: final results. *Géotechnique*, 33(3), pp. 275-291.

Zienkiewicz, O. & Corneau, I., 1974. Visco-Plasticity and Creep in Elastic Solids - A Unified Numerical Solution Approach. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Volume VIII, pp. 821-845.

## **APÊNDICE A – Comandos de entrada para o ANSYS**

## A – Comandos de entrada para o ANSYS

### Configuração do elemento escolhido:

ET,1,SOLID186                      !Configura o elemento a ser utilizado, neste caso: SOLID186

### Configuração do material para *usermat*:

!-----Definição de parâmetros:-----  
t=2880                                      !Parâmetro relacionado à velocidade de escavação  
comport=2                                      !1: Maxwell; 2: Kelvin  
trev=3    !3: Projetado; 4: Pré-moldado  
Poisson=0.2                                      !Coeficiente de Poisson  
i:i+1    !Parâmetro relacionado ao número de revestimento  
!-----Entrada de dados para o material da *usermat*-----  
TB,user,i+2,,                                      !Número de material i+2  
TBDATA,1,,Poisson,trev,i,comport      !Parâmetros do material  
TBDATA,7,t    !Parâmetros do material

### Configuração da escavação e colocação do revestimento

!-----Step 8: escavação número 7, revestimento 6-----  
Csys,1    !Sistema de coordenadas cilíndricas  
fe=ce    !Final da escavação se define como o começo da escavação anterior, de acordo com o sentido de escavação deste modelo.  
ce=ce-p    !Começo da escavação se define ao começo anterior menos o passo de escavação, de acordo com o sentido de escavação deste modelo  
esel,s,cent,z,ce,fe                                      !Seleciona os elementos entre ce e fe, no eixo Z  
ESEL,R,CENT,X,0,re                                      !Re-seleciona os elementos entre 0 e o raio externo, no eixo radial

ESEL,R,CENT,Y,-270,180	!Re-seleciona os elementos localizados no arco desejado
CM,esc7,ELEM	!Da um nome à seleção anterior de elementos
Cmsel,s,esc7,elem	!Seleciona o conjunto de elementos com esse nome
EKILL,ALL	!Desativa os elementos selecionados
ESEL,all	!Seleciona todos os elementos
esel,s,cent,z,ce+d0+p,fe+d0+p eixo Z	!Seleciona os elementos que vão ser revestimento, no eixo Z
esel,r,mat,,2	!Re-seleciona os elementos de material 2
CM,rev6,ELEM	! Da um nome à seleção anterior de elementos
Cmsel,s,rev6,elem	!Seleciona o conjunto de elementos com esse nome
TB,user,i+2	!Define o material i+2
TBDATA,1,,Poisson,,trev,i,comport	!Parâmetros do material
TBDATA,7,t	!Parâmetros do material
MPCHG,i+2,all material i+2	!Troca o material atual dos elementos selecionados pelo material i+2
EALIVE,ALL	!Ativa os elementos selecionados
ESEL,all	!Seleciona todos os elementos