

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

**Modelagem Numérica de Túneis Gêmeos
com Galerias Transversais**

Tiago Wagner Dada

Porto Alegre
2020

TIAGO WAGNER DADA

**MODELAGEM NUMÉRICA DE TÚNEIS GÊMEOS
COM GALERIAS TRANSVERSAIS**

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
2020

CIP - Catalogação na Publicação

Dada, Tiago Wagner
Modelagem Numérica de Túneis Gêmeos com Galerias
Transversais / Tiago Wagner Dada. -- 2020.
143 f.
Orientadora: 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, 2020.

1. Túneis. 2. Túneis Gêmeos. 3. Método dos
Elementos Finitos. 4. Modelagem Numérica. I. Bernaud
Maghous, Denise, orient. II. Título.

TIAGO WAGNER DADA

**MODELAGEM NUMÉRICA DE TÚNEIS GÊMEOS
COM GALERIAS TRANSVERSAIS**

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

Porto Alegre, 21 de dezembro de 2020

Prof^a. Denise Bernaud Maghous
Dr^a. pela École Nationale des Ponts et Chaussées
Orientadora

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Jorge Luis Palomino Tamayo (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre esteve presente, me apoiando e me amando de maneira incondicional. Obrigado pelo amor, carinho e pela compreensão nos momentos em que não pude estar presente.

Agradeço ao meu companheiro de todos os momentos, João Finamor, por todo o amor, paciência, cuidado, parceria e atenção, especialmente nos momentos difíceis, que não foram poucos especialmente em 2020.

Agradeço aos tantos colegas (e agora também amigos) que conheci e acompanhei nesta jornada, o companheirismo de vocês foi fundamental. Agradeço em especial a um dos meus grandes mentores na área de túneis, Felipe Quevedo, que agregou imenso valor aos meus conhecimentos.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo privilégio da bolsa cedida por dois anos, sem a qual a minha dedicação ao programa não seria possível.

Agradeço à UFRGS e ao PPGEC pela acolhida como aluno neste período, especialmente aos professores pelos conhecimentos trocados e pelos conselhos recebidos. Agradeço ao professor Inácio Morsch pelo espaço cedido em sua disciplina para realização do meu estágio docente.

Agradeço à Professora Denise por ter me orientado ao longo do desenvolvimento deste trabalho, pelo tempo de atenção a mim dispensado, pelos conhecimentos compartilhados e por me incentivar a não desistir ao longo do percurso.

Por fim, gostaria de agradecer à toda a comunidade científica brasileira, a todos os que se propõem a fazer ciência e educação neste país, apesar de todas as dificuldades impostas e todas as barreiras cada vez maiores que colocam em nossos trajetos.

"Triunfar na vida não é ganhar.
É levantar e recomeçar cada vez que se cai ".

José Alberto Mujica Cordano

RESUMO

DADA, T. W. **Modelagem numérica de túneis gêmeos com galerias transversais**. 2020. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O projeto de um túnel profundo é uma tarefa bastante complexa, levando-se em conta os diversos parâmetros a serem determinados para o dimensionamento, podendo ser necessário fazer diversos estudos diferentes para um mesmo projeto. Além das características do maciço no qual o túnel será escavado, a geometria adotada, a profundidade e as propriedades mecânicas do revestimento que será aplicado, a interação maciço-revestimento também deve ser levada em conta para a compreensão do comportamento estrutural e a determinação de alguns parâmetros-chave para o dimensionamento, como a convergência (tendência ao fechamento). Neste trabalho, buscou-se apresentar alguns métodos de dimensionamento já existentes e elaborar modelos numéricos bidimensionais e tridimensionais capazes de representar os materiais do maciço e revestimento, bem como simular as etapas de escavação e colocação do revestimento. Para este estudo, foram tomados como referência os resultados obtidos através de expressões analíticas considerando-se o maciço em elasticidade e plasticidade, bem como análises numéricas em elasticidade e plasticidade com colocação de revestimento elástico com o *software* GEOMEQ91, desenvolvido por Bernaud (1991). Baseado nestes estudos de validação, desenvolveu-se *scripts* para o *software* ANSYS, considerando uma série de configurações de túneis, desde modelos bidimensionais axissimétricos até modelos tridimensionais, incluindo-se o caso de túneis gêmeos e a presença de galerias transversais entre eles. Em analogia aos modelos de validação, considerou-se o comportamento do maciço em elasticidade e plasticidade, utilizando o critério de Von Mises, e um revestimento com comportamento elástico. O método de ativação e desativação de elementos foi empregado para reproduzir as etapas de escavação e colocação do revestimento. Variando-se alguns parâmetros, como os afastamentos entre os túneis principais e as galerias transversais e a presença ou não do revestimento, pode-se observar e compreender os efeitos de cada uma dessas alterações nos campos de tensões e deslocamentos do modelo, e conseqüentemente nas curvas de convergência de cada caso analisado.

Palavras-chave: túneis profundos revestidos, modelagem numérica, método dos elementos finitos, túneis gêmeos, galerias transversais.

ABSTRACT

DADA, T. W. **Numerical modelling of twin bored tunnels with transversal connections.** 2020 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

The designing of a deep tunnel is an extremely complex task, considering the numerous parameters that need to be determined for the sizing. In some cases, several different studies are required for the same project. Besides the rock mass properties in which the tunnel will be executed, the adopted geometry, the deepness, and the mechanical properties of the lining applied, the interaction between the rock mass and the lining must also be considered to understand the structural behavior and to determine some key-parameters for the designing, such as the convergence (tendency to closure). In this study, some designing methods were presented and bi- and tridimensional numerical models were developed to represent the rock mass and the lining materials, as well as simulating the excavation and lining placement steps. For this study, the results obtained from analytical solutions considering the rock mass in elasticity and plasticity were considered, as well as numerical analysis in elasticity and plasticity with elastic lining placement using the software GEOMECH91, developed by Bernaud (1991). Based on these validation studies, scripts for the software ANSYS were developed, considering some series of tunnel configurations, from bidimensional axisymmetric models to tridimensional models, including the case of twin tunnels with transversal connections between them. Similarly, to the validation studies, the rock mass behavior was also considered in both elasticity and plasticity, using the Von Mises criteria, and the lining as an elastic material. The death and birth element method was applied to simulate the excavation and lining placement steps. Varying some parameters, as the distances between the twin tunnels and the transversal connections, as well as placing or not the lining, it was possible to comprehend the effects of each one of these changes in the tension and displacement fields of the numerical model, furthermore in the convergence curves of each analyzed case.

Keywords: deep lined tunnel, numerical modelling, finite element method, twin bored tunnel, transversal connections

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Fluxograma das etapas de pesquisa	20
--	----

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Cloaca Maxima (IMGUR, 2019)	21
Figura 3.2 - Organograma de projeto de túneis (adaptado de ITA WORKING GROUP ON GENERAL APPROACHES TO THE DESIGN OF TUNNELS, 1988)	23
Figura 3.3 - Métodos de escavação	24
Figura 3.4 - (a) Método cut and cover e (b) método cover and cut (adaptado de MOURATIDIS, 2008).....	26
Figura 3.5 - Tuneladora com seções acopladas (VOJKOVSKÝ, 2013)	27
Figura 3.6 - Elementos de uma tuneladora (adaptado de ZHOU et. al, 2018)	28
Figura 3.7 - Parcialização da escavação (adaptado de TÚNEL NATM, 2019)	30
Figura 3.8 - Camadas de revestimento (TRAVAGIN, 2012).....	32

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Direcionamento das tensões principais no maciço inalterado e após a escavação do túnel (FRANÇA, 2006)	34
Figura 4.2 - Efeito de arqueamento de tensões (CANCELA, 2015)	35
Figura 4.3 - Deslocamentos radiais (MARQUES, 2014)	36
Figura 4.4 - Zonas de influência (adaptado de MARQUES, 2014)	37
Figura 4.5 - Campo de deslocamentos em torno do túnel	38
Figura 4.6 - Limitação das zonas plástica e elástica.....	40
Figura 4.7 - Comportamento da solução em estado plano de deformações radiais: (a) maciço elástico, (b) maciço elastoplástico (adaptado de QUEVEDO, 2017).....	41
Figura 4.8 - Curva de Fenner & Pacher, citado por Rabcewicz (1973) (KARAKUS; FOWELL, 2004).....	43
Figura 4.9 - Acidente na estação Pinheiros do Metrô de São Paulo (HANANE, 2018)	44

Figura 4.10 - Método da convergência-confinamento.....	46
Figura 4.11 - Comparação entre análise numérica e método da convergência-confinamento (adaptado de BERNAUD E ROUSSET, 1992).....	47
Figura 4.12 - Definição da função de forma $a(x)$ (adaptado de BERNAUD E ROUSSET, 1992).....	48
Figura 4.13 - Forma da função $a(x)$ para diferentes K_s^* com cálculos numéricos tridimensionais em elasticidade (adaptado de BERNAUD E ROUSSET, 1992)	49
Figura 4.14 - Principais tipos de elementos finitos	51
Figura 4.15 - Etapas de solução do método dos elementos finitos (adaptado de ROCKEY et. al, 1983).....	54
Figura 4.16 - Corte transversal do Túnel de Brenner Base (adaptado de BERGMEISTER, 2012).....	59

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 - Superfícies de plasticidade (SILVA, 2008, p. 30)	62
---	----

CAPÍTULO 6

Figura 6.1 - Processo de escavação e colocação de revestimento representado pelo método de ativação e desativação de elementos finitos (QUEVEDO, 2017, p. 62)	66
Figura 6.2 - Elemento finito PLANE182 (ANSYS, 2011, p. 845).....	67
Figura 6.3 - Elementos SOLID185 e SOLID186 (ANSYS, 2011, p. 984 e p.1000).....	68
Figura 6.4 - Modelo numérico bidimensional axissimétrico.....	69
Figura 6.5 - Modelo numérico tridimensional.....	71
Figura 6.6 - Vista frontal e detalhamento do modelo tridimensional.....	72
Figura 6.7 - Vista lateral e detalhamento do modelo tridimensional.....	73
Figura 6.8 - Malha dos elementos de revestimento	74

CAPÍTULO 7

Figura 7.1 - Comparativo Analítico, GEOMEQ91 e ANSYS: Maciço elástico sem revestimento	77
--	----

Figura 7.2 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Maciço elástico com revestimento, $d_0 = 0$	78
Figura 7.3 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Maciço elástico com revestimento, $d_0 = 2/3Re$	78
Figura 7.4 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Maciço elástico com revestimento, $d_0 = 4/3Re$	79
Figura 7.5 - Comparativo Analítico, GEOMECC91 e ANSYS: Maciço plástico sem revestimento	80
Figura 7.6 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Maciço plástico com revestimento, $d_0 = 0$	81
Figura 7.7 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Maciço plástico com revestimento, $d_0 = 2/3Re$	81
Figura 7.8 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Maciço plástico com revestimento, $d_0 = 4/3Re$	82
Figura 7.9 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos, maciço elástico sem revestimento	83
Figura 7.10 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos, maciço elástico com revestimento	84
Figura 7.11 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos, maciço plástico sem revestimento	85
Figura 7.12 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos, maciço plástico com revestimento.....	86
Figura 7.13 - Comparativo Analítico, GEOMECC91 e ANSYS: Galerias transversais, maciço elástico sem revestimento	87
Figura 7.14 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Galerias transversais, maciço elástico com revestimento.....	88
Figura 7.15 - Comparativo Analítico, GEOMECC91 e ANSYS: Galerias transversais, maciço plástico sem revestimento.....	90
Figura 7.16 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Galerias transversais, maciço plástico com revestimento.....	90
Figura 7.17 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço elástico sem revestimento, $d_2 = 20p$	92
Figura 7.18 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço elástico sem revestimento, $d_2 = 40p$	92
Figura 7.19 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço elástico sem revestimento, $d_2 = 80p$	93
Figura 7.20 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço elástico com revestimento, $d_2 = 20p$	93

Figura 7.21 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço elástico com revestimento, $d_2 = 40p$	94
Figura 7.22 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço elástico com revestimento, $d_2 = 80p$	94
Figura 7.23 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico sem revestimento, $d_2 = 20p$	97
Figura 7.24 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico sem revestimento, $d_2 = 40p$	97
Figura 7.25 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico sem revestimento, $d_2 = 80p$	98
Figura 7.26 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, $d_2 = 20p$	98
Figura 7.27 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, $d_2 = 40p$	99
Figura 7.28 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, $d_2 = 80p$	99
Figura 7.29 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, campos de deslocamentos	101
Figura 7.30 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, campos de deslocamentos, vista inferior	101
Figura 7.31 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, campos de deslocamentos na direção x	102
Figura 7.32 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, campos de deslocamentos na direção x, vista inferior	102
Figura 7.33 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, campos de deslocamentos na direção y	103
Figura 7.34 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, intensidade de tensões	104
Figura 7.35 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, intensidade de tensões, vista inferior	104

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 4

Quadro 4.1 - Comparativo de custo de túneis (adaptado de EUROPEAN COMISSION, 2018)	57
---	----

CAPÍTULO 5

Quadro 5.1 - Superfícies de plasticidade (BERNAUD, 1991, citado por QUEVEDO, 2017, p. 69)	63
--	----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 7

Tabela 7.1 - parâmetros para validação em elasticidade sem revestimento	76
Tabela 7.2 - parâmetros para validação em elasticidade com revestimento elástico	77
Tabela 7.3 - parâmetros para validação em plasticidade sem revestimento.....	79
Tabela 7.4 - parâmetros para validação em plasticidade com revestimento elástico	80
Tabela 7.5 - parâmetros para análise em elasticidade do modelo de túneis gêmeos sem revestimento e com revestimento elástico	83
Tabela 7.6 - parâmetros para análise em plasticidade do modelo de túneis gêmeos sem revestimento e com revestimento elástico	85
Tabela 7.7 - parâmetros para análise em elasticidade do modelo de galerias transversais sem revestimento e com revestimento elástico	87
Tabela 7.8 - parâmetros para análise em plasticidade do modelo de galerias transversais sem revestimento e com revestimento elástico	89
Tabela 7.9 - parâmetros para análise em elasticidade do modelo de túneis gêmeos com galerias transversais sem revestimento e com revestimento elástico	91
Tabela 7.10 - parâmetros para análise em plasticidade do modelo de túneis gêmeos com galerias transversais sem revestimento e com revestimento elástico	96

LISTA DE SÍMBOLOS

$[B]$	Matriz de relação entre as deformações no interior do elemento e os deslocamentos nodais
C	Coesão do maciço
C_{tr}	Coesão em plasticidade de Tresca
C_{vm}	Coesão em plasticidade de Von Mises
$[D]$	Matriz de relações constitutivas do material
d_0	Dimensão não suportada
E	Módulo de elasticidade
E_r	Módulo de elasticidade do revestimento
E_s	Módulo de elasticidade do maciço
E_C	Módulo de elasticidade do concreto
$\{F^e\}$	Vetor de cargas no elemento
K_s	Rigidez do revestimento
K_C	Rigidez do revestimento em concreto
$[K^e]$	Matriz de rigidez do elemento
$[N]$	Matriz das funções de forma
p	Passo de escavação
p_r	Pressão geostática hidrostática
P_i	Pressão interna na parede do túnel
P_i^f	Pressão fictícia
P_{lim}	Pressão limite entre os regimes elástico e plástico
P_∞	Pressão geostática
r	Coordenada radial na posição analisada

R_e	Raio externo da seção
R_i	Raio interno da seção
R_t	Raio do túnel
t_c	Espessura do revestimento
$u(r)$	Deslocamento radial
U	Convergência
x	Distância entre a seção analisada e a face de escavação
y	Raio plástico
$\{\delta\}$	Vetor de deslocamentos no interior do elemento
$\{\delta^e\}$	Vetor de deslocamentos nodais do elemento
$\{\varepsilon\}$	Vetor de deformações no interior do elemento
$\{\varepsilon_0\}$	Vetor de deformações iniciais no interior do elemento
$\lambda(x)$	Fator de perda de confinamento
ν	Coefficiente de Poisson
ν_r	Coefficiente de Poisson do revestimento
ν_s	Coefficiente de Poisson do maciço
$\{\sigma\}$	Vetor de tensões no interior do elemento
$\{\sigma_0\}$	Vetor de tensões iniciais no interior do elemento
σ_{rr}	Componente de tensão radial
σ_{zz}	Componente da tensão na direção do eixo do túnel
$\sigma_{\theta\theta}$	Componente da tensão ortorrádial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS E DIRETRIZES DE PESQUISA	19
2.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	19
2.2 OBJETIVOS DE PESQUISA	19
2.3 LIMITAÇÕES.....	19
2.4 DELINEAMENTO DO ESTUDO E CRONOGRAMA.....	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 HISTÓRICO DE PROJETOS DE TÚNEIS	21
3.2 TIPOS DE ESCAVAÇÃO E REVESTIMENTOS.....	24
3.2.1 Métodos de Escavação de Túneis.....	24
3.2.2 Elementos de Estabilização e Suporte.....	29
3.2.3 Revestimentos de Túneis.....	31
4 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DE TÚNEIS.....	33
4.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO E MOVIMENTOS ASSOCIADOS A TÚNEIS.....	33
4.2 MÉTODOS ANALÍTICOS.....	38
4.3 MÉTODOS SIMPLIFICADOS	42
4.3.1 NATM (New Austrian Tunneling Method)	42
4.3.2 Método da Convergência e Confinamento (CV-CF).....	44
4.3.3 NIM (‘New Implicit Method’ ou ‘Novo Método Implícito’).....	47
4.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	50
4.5 TÚNEIS GÊMEOS	55
4.6 TÚNEIS GÊMEOS COM GALERIAS	58
5 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS	61
6 MODELAGEM NUMÉRICA	65
7 ANÁLISES NUMÉRICAS E ESTUDOS PARAMÉTRICOS	76
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	106
REFERÊNCIAS	110
APÊNDICE A – SCRIPT APDL TÚNEIS GÊMEOS COM GALERIAS.....	114

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente expansão da ocupação da superfície terrestre pela humanidade, tornou-se tema recorrente a busca por alternativas que visam diminuir o impacto ambiental de grandes obras sobre seu entorno, especialmente em áreas urbanas. Uma solução alternativa bastante recorrente é a utilização de vias subterrâneas, como túneis e galerias. No Japão, por exemplo, onde o relevo é bastante acidentado e a zona urbana é muito densa, é fundamental o uso deste tipo de solução para o desenvolvimento da infraestrutura. Nas regiões de Alpes, por sua vez, um túnel diminui uma viagem em muitas horas se comparada a uma estrada externa cheia de curvas para contornar as elevações, que também oferecem riscos em épocas de nevascas e possuem velocidade de tráfego bem mais lenta.

Quando se fala sobre túneis, é bastante comum que se associe a túneis ferroviários ou rodoviários. Entretanto, a diversidade de tipos de túneis e seus usos é muito grande. Uma linha de metrô, por exemplo, é um tipo de túnel, bem como linhas de distribuição de água e redes de saneamento. Em alguns países a rede elétrica também é subterrânea, eliminando o desconforto visual causado por um monte de fiações penduradas. Países que utilizam geração de energia por fissão nuclear, como a França, também projetam túneis para o descarte de materiais radioativos.

No Brasil, o desenvolvimento dos túneis iniciou-se com a expansão da malha ferroviária e alguns túneis urbanos nas principais cidades da época, como Rio de Janeiro, São Paulo e Salvador. À luz do período chamado de Milagre Econômico, com investimentos em infraestrutura ampliou-se bastante a quantidade de túneis rodoviários e metroviários. Com a recessão econômica nos anos 80 e 90 a engenharia de túneis no país estagnou, sendo retomada na década de 2000 com os pacotes de desenvolvimento em infraestrutura. Mais recentemente, o desafio é acompanhar os avanços tecnológicos, como o uso de tuneladoras, que ainda é pequeno no país, visto que há uma nova baixa no desenvolvimento econômico e estes equipamentos são bastante caros.

O projeto de um túnel não é uma tarefa fácil, existe uma série de parâmetros a serem determinados para o dimensionamento, é necessária uma investigação geotécnica da região e uma avaliação de viabilidade econômica, muitas vezes sendo necessário fazer diversos estudos para um mesmo projeto, para no fim selecionar a melhor opção. Os métodos de dimensionamento já desenvolvidos, que serão apresentados no decorrer deste trabalho, têm suas

limitações e simplificações de cálculo, podendo um método ser mais ou menos adequado conforme a situação do problema.

Com o aumento do uso de tuneladoras, passou a ser mais comum a construção de túneis gêmeos, denominação dada a túneis paralelos. Principalmente por questões de segurança, passou-se a exigir que esses túneis tenham conexões entre si, restringindo os tipos de soluções conhecidas aplicáveis para o dimensionamento e verificação desses projetos. Por esta razão, busca-se neste trabalho desenvolver uma solução através de métodos numéricos para este problema, oferecendo suporte para futuros projetos e estudos.

Após esta introdução da problemática de túneis, apresenta-se as diretrizes desta pesquisa, com o problema de pesquisa, os objetivos, as limitações e o delineamento do estudo realizado. No capítulo seguinte é feita uma breve revisão histórica da evolução da engenharia de túneis, com alguns exemplos ilustrativos, seguido dos métodos de escavação e revestimentos utilizados e de uma explicação sobre os principais métodos de dimensionamento de túneis. Ainda na revisão bibliográfica, apresenta-se o caso de túneis gêmeos e, em seguida, particulariza-se para túneis gêmeos com galerias transversais, que é o objeto de estudo deste trabalho. Nos capítulos seguintes são explicados a modelagem do maciço, do revestimento e, por fim a análise numérica feita no *software* ANSYS para se obter soluções não-lineares para o problema estudado.

2 OBJETIVOS E DIRETRIZES DE PESQUISA

2.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Como é feita a modelagem e o dimensionamento de túneis gêmeos com galerias transversais, considerando o processo construtivo?

2.2 OBJETIVOS DE PESQUISA

O objetivo principal deste trabalho é produzir um estudo paramétrico sobre túneis gêmeos com galerias, utilizando-se a modelagem tridimensional através do método dos elementos finitos, verificando-se os efeitos de alguns parâmetros sobre a convergência do túnel.

O objetivo secundário é desenvolver um *script* otimizado no *software* ANSYS para a análise e dimensionamento de túneis gêmeos com galerias, considerando alguns modelos de comportamento de maciços e revestimentos.

2.3 LIMITAÇÕES

Este estudo apresenta como limitações:

- a) Modelagem apenas de túneis considerados profundos;
- b) Seção transversal circular;
- c) Velocidade e passo de escavação constantes;
- d) A face de escavação é plana e escavada por completo.

2.4 DELINEAMENTO DO ESTUDO E CRONOGRAMA

Este trabalho foi concebido conforme a realização das seguintes etapas:

- a) Pesquisa bibliográfica;
- b) Uma breve revisão histórica de projetos de túneis;
- c) Descrição dos principais tipos de escavação e revestimento;
- d) Abordagem do processo de dimensionamento de túneis;
- e) Modelagem numérica;

- f) Análise paramétrica dos resultados;
- g) Conclusões.

Na Figura 2.1 apresenta-se o fluxograma com as etapas de pesquisa desenvolvidas para a conclusão deste estudo.

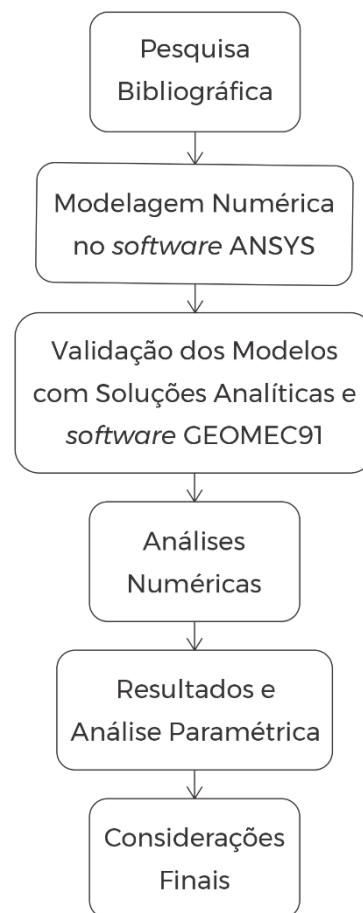


Figura 2.1 – Fluxograma das etapas de pesquisa

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Atualmente, túneis são utilizados para as mais diversas finalidades e construídos com uma vasta gama de materiais e equipamentos. Neste capítulo, buscou-se contextualizar o tema do presente trabalho através de fatos históricos e exemplos de projetos e realizou-se um estudo dos métodos utilizados para projeto e execução de túneis.

3.1 HISTÓRICO DE PROJETOS DE TÚNEIS

Estudos arqueológicos mostram que desde a Pré-História o homem já tinha certas experiências geotécnicas, como a diferença de dureza entre os tipos de solos e rochas e a utilização de instrumentos primitivos de escavação, conforme apontado por Moreira (2006). Baseando-se em observações da natureza, como em passagens e cavernas, iniciaram-se as primeiras tentativas de escavação de túneis para diversos usos, como antigas tumbas, mineração e construção de canais. Na Antiguidade, destacam-se as redes de túneis romana, especialmente a *Cloaca Maxima* ilustrada na Figura 3.1, parte da primitiva rede de esgoto da Roma Antiga, construída por volta de 600 a.C. e que para as condições tecnológicas e conhecimento da época é uma estrutura bastante impressionante.



Figura 3.1 - *Cloaca Maxima* (IMGUR, 2019)

Com o passar dos anos, as técnicas e os instrumentos de escavação foram se aprimorando. Destaca-se na linha temporal desses processos a invenção dos explosivos, que representou um grande avanço para as escavações. Os processos foram se desenvolvendo junto à melhoria dos instrumentos, cada vez mais mecanizados, até chegar nas tuneladoras, equipamentos mecânicos especializados na abertura de túneis. As aplicações de túneis também foram se ampliando, além de usados com a expansão de estradas e ferrovias, também passou a se utilizar estruturas subterrâneas para distribuição de sistemas de água, esgoto, gás, energia, estocagem de dejetos radioativos, entre outros. Na engenharia, com o avanço dos conhecimentos em mecânica dos solos iniciados principalmente por Terzaghi e um melhor entendimento do comportamento estrutural, aprimorou-se a forma de projetar túneis, utilizando-se teorias de elasticidade e plasticidade e desenvolvendo modelos baseados em métodos numéricos capazes de simular todo o processo executivo.

Um marco importante nos métodos construtivos de túneis se deu na década de 1940, quando o engenheiro Rabcewicz concluiu que a ruptura dos túneis se dava por cisalhamento e não por compressão, conforme relatado por Araújo Silva (1997). Levando isso em conta, verificou-se que este problema poderia ser resolvido com a instalação de suportes de concreto projetado com alta resistência inicial, diminuindo as movimentações do maciço.

Do ponto de vista de projeto, a Associação Internacional de Túneis (ITA WORKING GROUP ON GENERAL APPROACHES TO THE DESIGN OF TUNNELS, 1988) aborda a modelagem de um túnel como um estudo multidisciplinar, que deve abordar áreas como geologia, geotecnia, técnicas de escavação e execução de revestimentos, engenharia de estruturas, análise de confiabilidade e risco e aspectos contratuais e legislativos. Tratando-se de um problema complexo de se resolver, é necessária uma investigação da formação geológica da região, incluindo extração de amostras para análise em ensaios de laboratório. O planejamento das fases da construção também é fundamental para uma boa execução da obra, sendo que os modelos estruturais devem levar em conta também estas fases para a simulação dos carregamentos decorrentes da escavação e colocação do revestimento. O monitoramento das tensões e deformações também é de suma relevância para garantir a segurança do túnel. Um organograma contendo as principais etapas para o desenvolvimento do projeto de um túnel é apresentado na Figura 3.2.

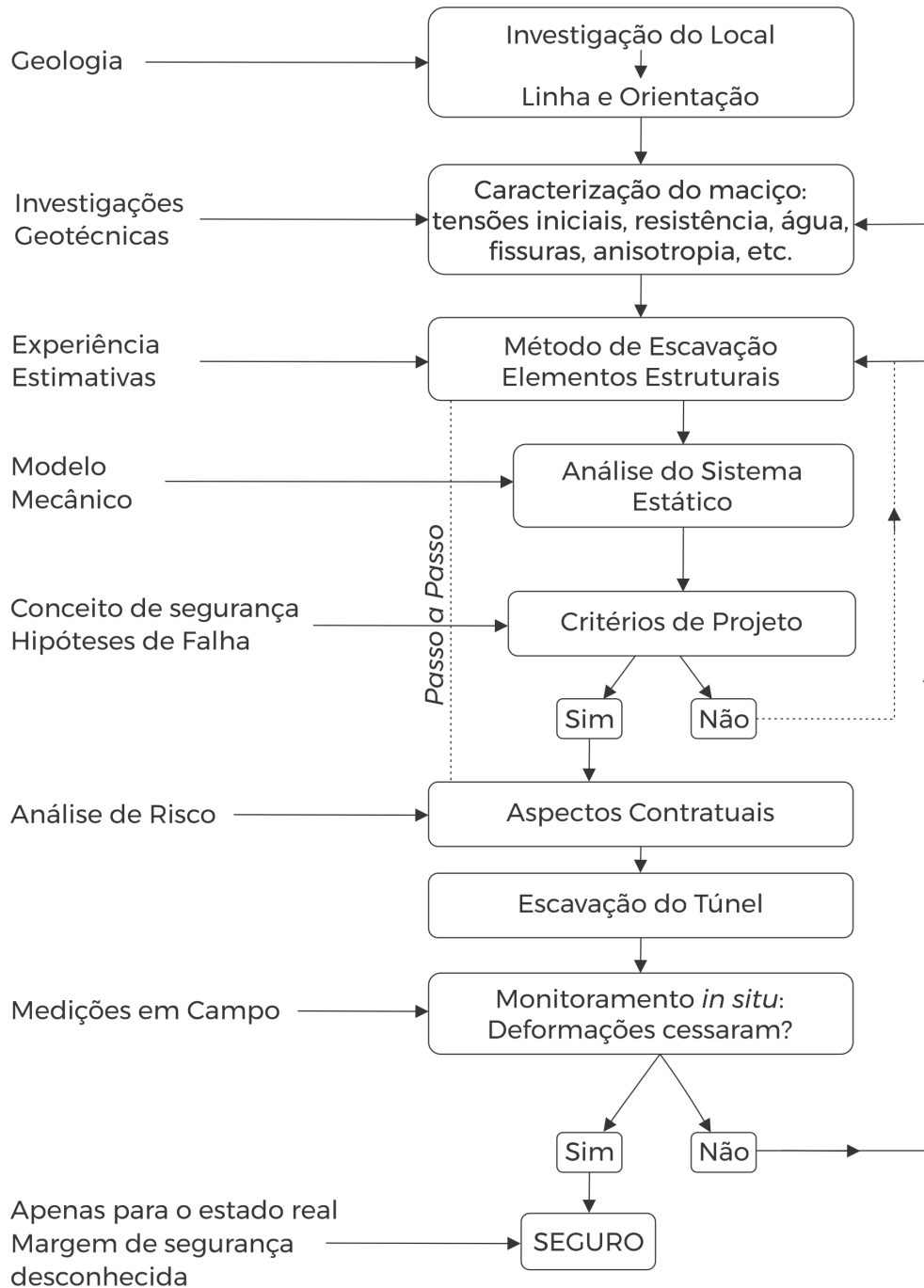


Figura 3.2 - Organograma de projeto de túneis (adaptado de ITA WORKING GROUP ON GENERAL APPROACHES TO THE DESIGN OF TUNNELS, 1988)

Conforme as propriedades do maciço a ser escavado, a escolha dos métodos de escavação e colocação do revestimento é fundamental para a viabilidade da obra, inclusive do ponto de vista orçamentário. Na seção seguinte apresenta-se os principais tipos de escavação e revestimentos e suas aplicações.

3.2 TIPOS DE ESCAVAÇÃO E REVESTIMENTOS

3.2.1 Métodos de Escavação de Túneis

A execução de um túnel pode se dar de diversas formas quanto ao processo de escavação. Segundo Quevedo (2017) “o engenheiro deve levar em conta diversos fatores, tais como: geometria da seção, o comprimento do túnel, o volume a ser escavado, condições geológicas, nível de água no terreno, restrições quanto a vibrações, estabilidade da cavidade, assentamentos do terreno, hipóteses de projeto, segurança dos operários, viabilidade ambiental e econômica”. Um resumo dos principais tipos de escavação está apresentado na Figura 3.3.

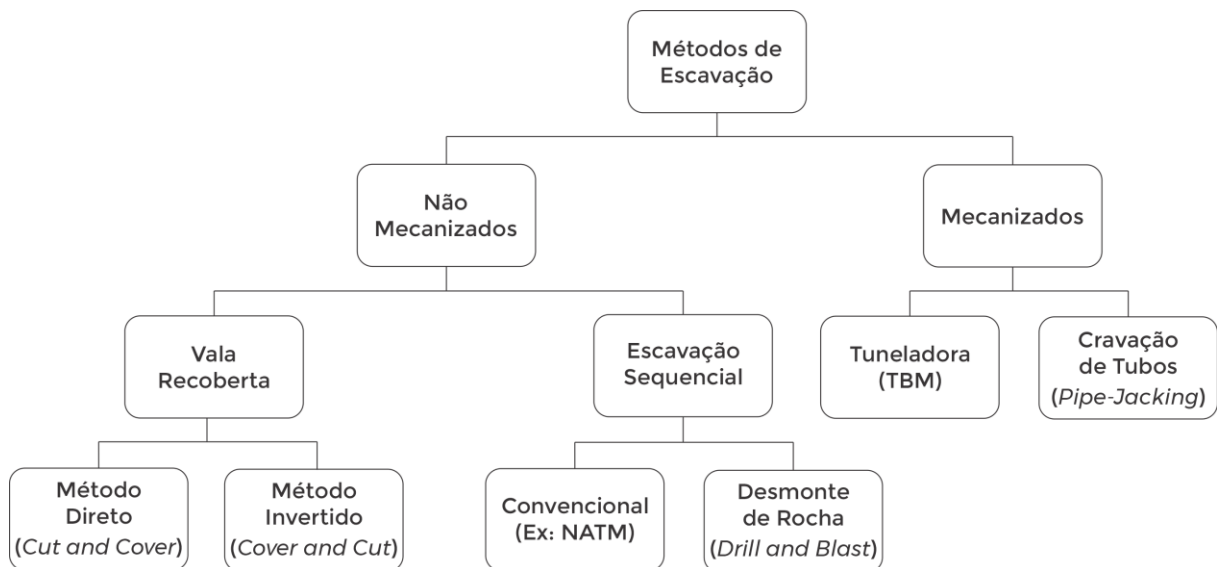


Figura 3.3 - Métodos de escavação

Os processos de escavação mais tradicionais dentro da engenharia de túneis são os não mecanizados, também conhecidos por escavação mineira, por utilizar processos empregados na mineração. Apesar de incluir alguns tipos de escavação que utilizam equipamentos mecânicos, este grupo é caracterizado como não mecânico pois se dá essencialmente pelo controle e sensibilidade do operador sobre a ferramenta. Justamente por isso, a este tipo de escavação se atribui fatores de segurança menores, devido à maior probabilidade de erros humanos durante a execução.

A chamada escavação simples é o método não mecanizado mais tradicional, trata-se da escavação direta com ferramentas manuais ou com auxílio de equipamentos mecanizados,

como escavadeiras, escarificadoras, escavadeiras rotativas (*roadheader*) e martelos hidráulicos (*hammerhead*). Tratando-se de um método em que o operador detém o total controle da escavação, perde-se em precisão na execução, entretanto possibilita a execução de geometrias de seção mais variadas, como é o caso de galerias transversais em túneis gêmeos, ou mesmo para a execução de estações e conexões de metrô. Além disso, este método também permite parcializar a seção escavada, conforme abordado na seção 3.3.3.

O método não mecanizado mais utilizado para túneis superficiais é chamado de vala recoberta, aplicado amplamente em túneis urbanos e interurbanos rodoviários. Bastante associado a túneis feitos em concreto pré-moldado, este método pode ser aplicado de duas maneiras: direta (*cut and cover*), em que se retira o solo, executa-se o túnel e cobre-se novamente; ou indireta (*cover and cut*), onde aplica-se uma contenção, onde apoia-se uma cobertura, sob a qual escava-se o túnel. Estes processos estão ilustrados na Figura 3.4.

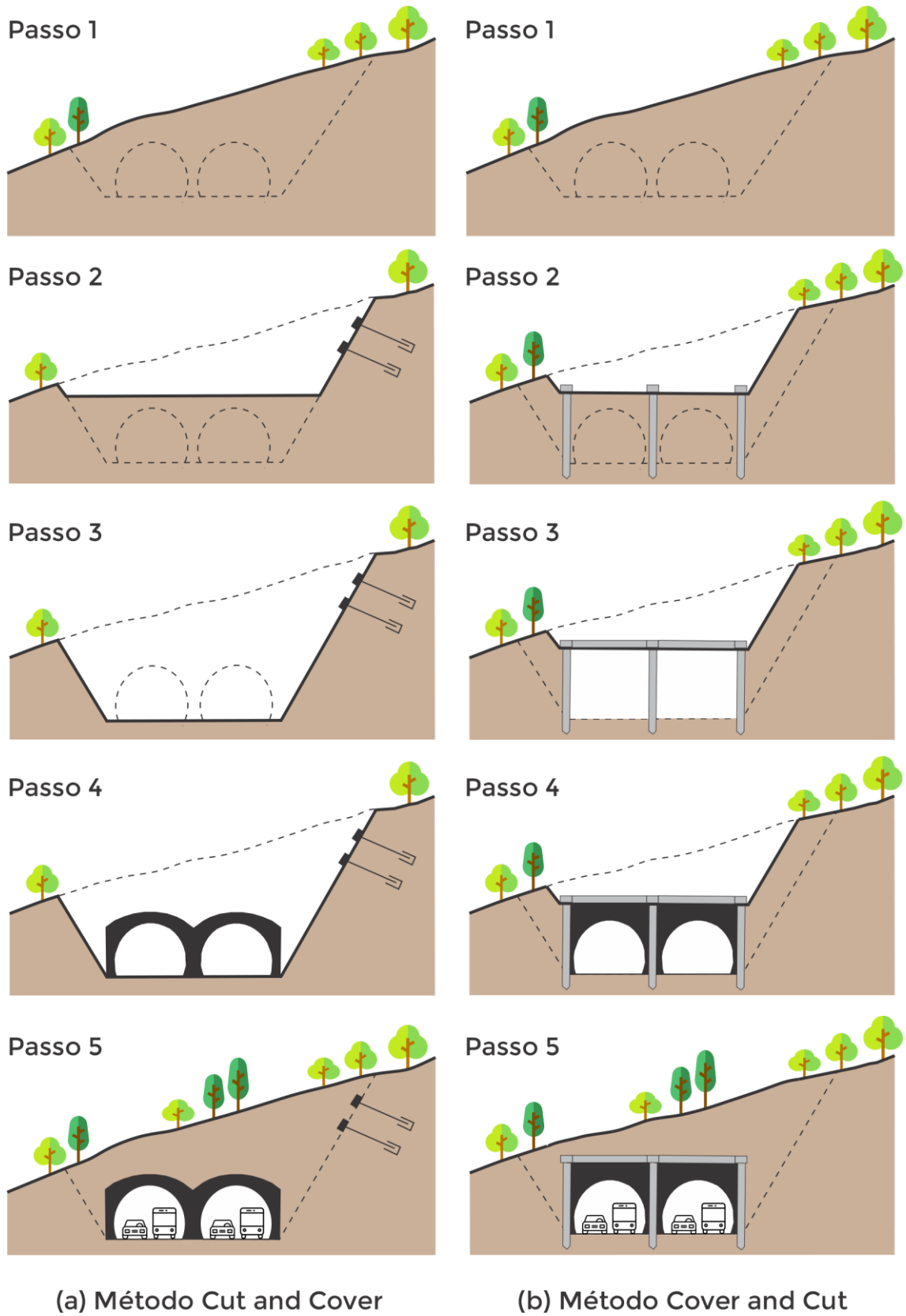


Figura 3.4 - (a) Método *cut and cover* e (b) método *cover and cut* (adaptado de MOURATIDIS, 2008)

Ainda entre os métodos não mecanizados, pode-se citar o desmonte de rocha (*drilling and blasting*), que consiste no uso de explosivos para quebrar rochas muito resistentes. Faz-se um estudo da rocha a ser explodida, são marcados alguns pontos onde são perfuradas cavidades, nas quais são inseridos os explosivos. Após a detonação, o material é retirado e o túnel é executado. Este método é bastante utilizado em associação à escavação simples, sendo o mais utilizado para escavar túneis longos em rochas antes do surgimento das tuneladoras.

Com o desenvolvimento tecnológico, surgiram os métodos de escavação mecanizados, dentre os quais se destacam as tuneladoras ou TBM (do inglês, *Tunnel Boring Machine*). Estas máquinas aumentaram significativamente a precisão da escavação, visto que executa basicamente os mesmos processos da escavação simples, porém sem o fator de erro humano associado. Destaca-se, além da qualidade da escavação, a alta produtividade, uma tuneladora escava com velocidade média estimada entre 15 e 20 metros por dia, podendo em alguns casos conforme as condições geológicas chegar a até 70 metros em um dia. Geralmente as tuneladoras se limitam à seção de formato circular, mas já foram feitos alguns protótipos com outras seções ou com acoplamento de mais de uma seção na frente de escavação, como a utilizada na escavação do metrô de Osaka, no Japão, ilustrada na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Tuneladora com seções acopladas (VOJKOVSKÝ, 2013)

Uma das principais vantagens do uso da tuneladora é que o revestimento vai sendo executado simultaneamente à escavação, minimizando o tempo em que o túnel fica sem suporte. Os revestimentos aplicados podem ser tanto em pré-moldados ou perfis metálicos quanto em concreto projetado. O avanço da escavação se dá pela extensão de macacos hidráulicos apoiados

nos anéis já executados ou nas laterais do túnel para o caso de concreto projetado. Em regiões de solos de baixa resistência utiliza-se um escudo metálico (*shield*) para segurar o solo na frente de escavação, evitando o colapso. No Brasil, o primeiro uso de tuneladora foi em São Paulo, na obra da linha azul do metrô, na década de 70. Na Figura 3.6 é apresentado como são distribuídos os elementos no interior de uma tuneladora.

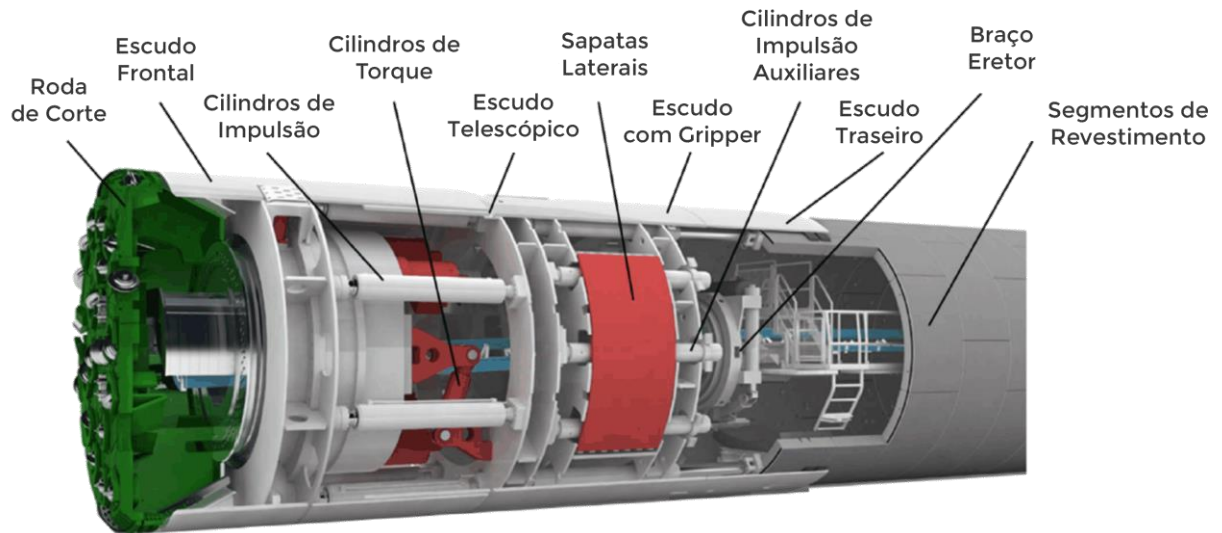


Figura 3.6 - Elementos de uma tuneladora (adaptado de ZHOU et. al, 2018)

O uso de tuneladora implica em um alto investimento para os equipamentos, podendo tornar seu uso inviável em regiões com muitas variações no maciço. Entretanto com o aperfeiçoamento tecnológico, seu uso é bastante competitivo tanto em custo-benefício como por questões de segurança da obra. A European Commission (2018) estimou a competitividade da TBM em relação aos métodos convencionais com uma fórmula que relaciona a razão entre o comprimento e o diâmetro do túnel e o esforço de compressão não confinado, conforme a Equação (3.1), onde coeficientes maiores que 1,5 indicam a preferência pela tuneladora e para índices maiores que 3 o uso da TBM é uma solução viável. O esforço de compressão não confinado pode ser obtido através de um ensaio de compressão uniaxial, realizado para determinar os parâmetros relacionados ao esforço cortante em solos coesivos, isto é, a coesão e o ângulo de atrito, conforme apontado por Alshkane et al (2020). Este esforço consiste no máximo esforço de compressão que um cilindro feito com amostra do material pode suportar sob condições não confinadas, ou seja, sem apoios nas laterais do cilindro.

$$\frac{\text{Comprimento do Túnel [m]}}{\text{Diâmetro do Túnel [m]} \cdot (\text{Esforço de Compressão Não Confinado [Pa]})^{1/3}} > 1,5 \quad (3.1)$$

Outro método mecanizado é a cravação de tubos (*pipe jacking*), muito utilizado em túneis de distribuição de serviços, como água, eletricidade e gás. Consiste na cravação de tubos metálicos ou pré-moldados, por exemplo, com a atuação de macacos hidráulicos. É um meio de executar túneis com pouca interferência na superfície, especialmente para distâncias curtas e túneis superficiais. Nas extremidades do túnel são cavados poços, sendo na extremidade onde a escavação começa instalado um bloco de ancoragem ou uma parede de reação onde o macaco hidráulico se apoiará para empurrar os tubos. Na frente de escavação, com o primeiro segmento, é acoplado uma pequena tuneladora, com ou sem escudo de proteção.

3.2.2 Elementos de Estabilização e Suporte

Ao longo do processo executivo de um túnel, podem ser necessários alguns elementos estruturais ou procedimentos para conferir maior estabilidade e segurança à obra. Essas estruturas podem ser provisórias ou até usadas como reforço da estrutura definitiva do túnel. Nesta seção serão diferenciados os métodos e elementos de pré-suporte e estabilização da face dos de suporte de túneis.

Os pré-suportes são uma série de elementos estruturais e métodos que visam garantir a estabilidade do túnel antes e durante a execução da escavação, especialmente em regiões de maciço com baixa resistência e tendência a desmoronamento.

Um dos mais usuais dentre esses elementos são as enfilagens, que consistem em elementos, geralmente metálicos em forma de perfis ou placas, aplicados na região onde o túnel será escavado. Em túneis com diâmetros grandes utiliza-se as enfilagens injetadas, que consistem em tubos metálicos introduzidos por perfuração no maciço e preenchidos com nata de cimento. Utiliza-se de maneira similar, conforme Tatiya (2005) a enfilagem estrutural passante (*Barrel Vault Method*), executando-se furos com ou sem reforços metálicos onde se injeta nata de cimento com pressão equivalente à tensão inicial do maciço, formando uma abóbada pré-tensionada sob a qual a escavação pode ocorrer de maneira mais segura e estável.

A estabilização da face de escavação visa evitar uma ruptura muito comum na execução de túneis, que é a extrusão da face de escavação, em alguns casos seguido de seu colapso. Outro

problema que gera instabilidade é o nível da linha d'água, sendo necessário em alguns casos o uso de equipamentos para controle ou até mesmo rebaixamento deste nível para garantir a estabilidade do túnel. Um tipo de pré-suporte muito utilizado em regiões de solos moles ou saturados consiste em aplicar uma pressão de confinamento com um compressor de ar na região a ser escavada. Um processo bastante utilizado para estabilização é a parcialização da escavação, mantendo-se núcleos de solo ou dividindo a seção e escavando-a em nichos e galerias. Outra opção é a instalação de tirante frontais, geralmente em fibra de vidro, para melhorar a resistência mecânica de parte da frente de escavação. Na Figura 3.7 são apresentadas 5 configurações de escavação parcializada em túneis, onde as etapas de escavação são executadas conforme a sequência numérica, destacando-se o túnel T5 onde as duas porções laterais são escavadas de maneira simultânea (primeiramente os trechos 1 e 1', seguidos dos trechos 2 e 2') para depois escavar o eixo central (passos 3, 4 e 5).

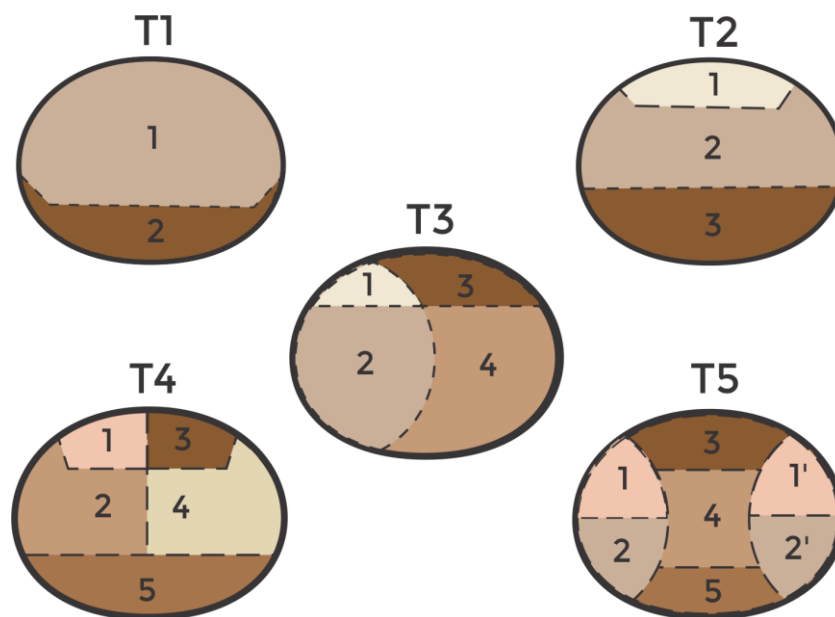


Figura 3.7 - Parcialização da escavação (adaptado de TÚNEL NATM, 2019)

O último grupo de pré-suportes se refere aos que alteram as propriedades do maciço, como por exemplo injeções de aditivos químicos, calda de cimento ou resinas. Outro processo, que foi muito utilizado nos anos 60, para estabilização é o congelamento de solo, no qual se usa equipamentos como sifões para que o solo ou rocha libere calor, congelando a água nos poros intersticiais e deixando o solo mais firme para ser escavado, conforme Song et. al (2016). Além

desses, outro procedimento é o *jet grouting*, que consiste na injeção de nata de cimento sob alta pressão, misturando-se ao solo e melhorando a resistência mecânica.

Dentre os procedimentos e elementos estruturais detalhados para pré-suporte todos são usualmente temporários, com exceção das enfilagens que podem ser incorporadas à estrutura final.

Os elementos de suporte, por sua vez, são estruturas que tem por objetivo manter a estabilidade da cavidade no período entre o fim da escavação e a execução do revestimento. O mais tradicional destes elementos é o concreto projetado, conforme relatado por Silva (1997), que nesta etapa tem por finalidade gerar resistência inicial rápida. É possível que este concreto seja armado com telas metálicas, para resistir a tensões secundárias, especialmente a tração, além de segurar blocos que possam se desprender.

Outro elemento de suporte é a cambota metálica, que tem por objetivo a resistência imediata aos esforços, podendo também ser associada a concreto projetado atuando como um tipo de armadura ou servindo como suporte para enfilagens. Os tirantes também são suportes que oferecem ancoragem imediata de blocos do maciço, aplicando-se protensão. É ideal para estabilizar regiões específicas, podendo também ser aliado ao concreto. Alguns tipos de enfilagem também são utilizadas como suporte. Todos esses métodos e estruturas são utilizados para garantir a estabilidade do túnel até a execução do revestimento, que será abordado na seção seguinte.

3.2.3 Revestimentos de Túneis

O revestimento de um túnel é a estrutura responsável pela garantia da estabilidade da abertura durante toda sua vida útil. Em teoria, regiões de rochas resistentes (chamados maciços autoportantes), dispensariam a execução de revestimento, ao contrário de rochas menos resistentes e solos. Entretanto, atualmente a maioria dos túneis construídos são revestidos, a fim de garantir a segurança e estabilidade da estrutura. Muitos projetistas utilizam o suporte como parte da resistência do revestimento, especialmente no caso de suportes de concreto, cuja resistência aumenta com o tempo após a estabilização da seção, como aponta Maffei (1982). Com o passar do tempo e o aprimoramento de técnicas e materiais, hoje existe uma grande variedade de revestimentos, com diferentes aplicações. Outra função importante do revestimento é garantir a estanqueidade, sendo em alguns casos feito o uso de elementos de impermeabilização.

Por vezes, os elementos de suporte e pré-suporte são chamados de revestimento primário, sendo o revestimento secundário executado objetivando mais a estabilidade a longo prazo da estrutura, conforme detalhado na Figura 3.8. Atualmente, o revestimento mais utilizado em túneis é o concreto pré-moldado, especialmente quando o túnel é executado com tuneladora. Em casos de seções grandes, o revestimento é seccionado em anéis, executando-se o revestimento de cada seção em várias fases. Seguindo a mesma lógica, também em formatos de anel, seccionados ou não, pode-se executar os revestimentos com cintas metálicas.

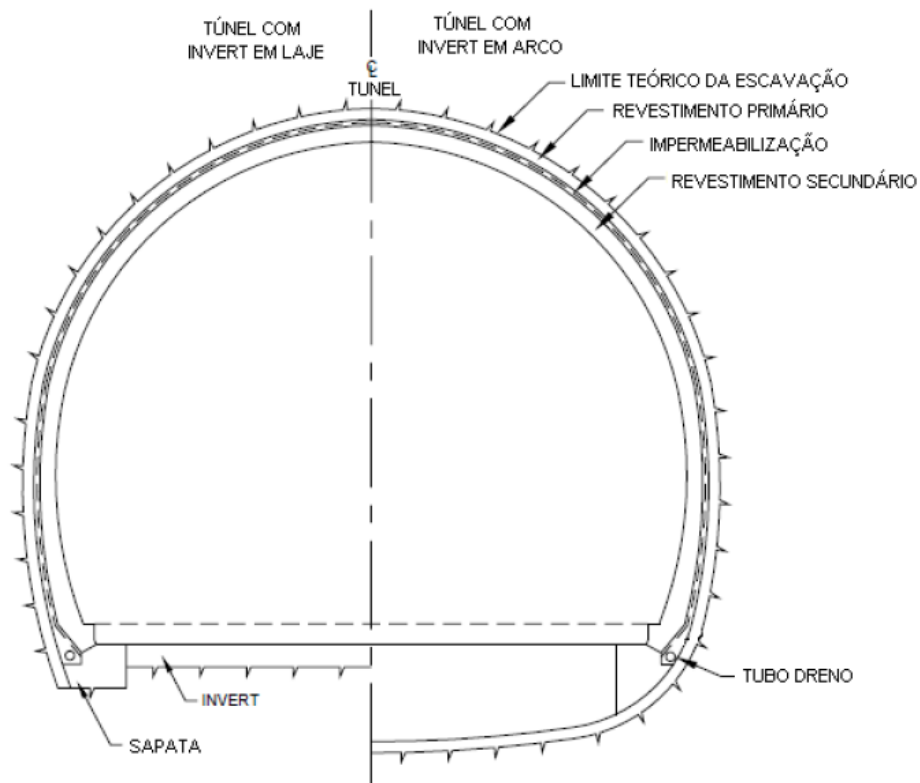


Figura 3.8 - Camadas de revestimento (TRAVAGIN, 2012)

Algumas tuneladoras possuem estruturas internas para produção e projeção de concreto *in loco*, sendo neste caso executada uma armadura para resistir aos esforços de tração, com barras, telas ou mesmo com reforços de tirantes, por exemplo. Nestes casos, conforme o ITA (1988), citado por Jensen (2019), o revestimento de concreto simples deve ter espessura mínima de 25 cm e 30 cm para o caso de concreto armado, a fim de evitar problemas de adensamento, além de uso de malhas de aço nas duas direções para evitar fissuração.

4 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO E VERIFICAÇÃO DE TÚNEIS

Com a evolução dos estudos em geociências e, concomitantemente, o desenvolvimento tecnológico de novas ferramentas para a execução de túneis, uma grande diversidade de novos métodos para projeto foram propostos.

Baseados em experiências passadas, surgiram alguns métodos empíricos. Referenciando-se em túneis já executados que apresentaram resultados satisfatórios, projeta-se um novo túnel conforme as similaridades de tipos de solo, dimensões, métodos de escavação, revestimentos, entre outros.

Tratando-se de um problema de grandes dimensões e sujeito a muitas complicações, busca-se através das ciências fazer aproximações mais precisas do comportamento do túnel a ser construído e prever em projetos possíveis cenários referentes à sua execução e segurança. Neste panorama, destacam-se os métodos baseados na mecânica do meio contínuo, que propõem soluções analíticas e numéricas a serem abordadas nas seções seguintes.

4.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO E MOVIMENTOS ASSOCIADOS A TÚNEIS

Segundo Souza (2008 *apud* Marques, 2014), a abertura de um túnel num maciço previamente em equilíbrio, submetido a um estado de tensão inicial, pode ser traduzida, do ponto de vista mecânico, como a remoção das tensões existentes no contorno da escavação realizada. Assim, o avanço da frente de escavação provoca uma perturbação no estado natural de tensões do maciço, originando um rearranjo das tensões no maciço em um movimento dirigido ao interior da cavidade escavada, até que se atinja um novo estado de equilíbrio. Como visto na seção sobre revestimentos, os maciços autoportantes são os que tem a capacidade de estabelecer este equilíbrio, mas na maioria dos casos adota-se um sistema de suporte, conforme Rocha (1971 *apud* França, 2006).

Conforme Almeida E Sousa (1998 *apud* Marques, 2014), a interação entre o maciço e o revestimento constitui um sistema altamente hiperestático, com um estado de tensão-deformação complexo de se determinar. Com as deformações ocorridas no maciço durante a escavação e a execução do revestimento, ocorre uma redistribuição das tensões da região do túnel para as partes adjacentes do maciço, em um fenômeno conhecido por efeito de arco ou

também arqueamento das tensões. Então, os esforços e deslocamentos ficam interdependentes e correlacionados, sendo função não só do estado de tensões inicial e da geometria do túnel, mas também das propriedades mecânicas do maciço e a uma série de fatores relacionados ao processo executivo, como a velocidade, o passo e o tipo de escavação adotados, as propriedades do revestimento e o espaço de tempo existente entre a escavação e sua colocação.

De maneira geral, antes da escavação e do alívio de tensões na região do túnel, as tensões estão direcionadas principalmente na vertical e horizontal, indicando a predominância de tensões normais, sendo o cisalhamento quase inexistente. Com a abertura e a redistribuição das tensões, segundo França (2006), as direções das tensões principais no entorno do túnel sofrem rotações, uma vez que os planos onde não ocorrem tensões de cisalhamento na região não coincidem mais com os planos horizontais e verticais, conforme ilustrado na Figura 4.1.

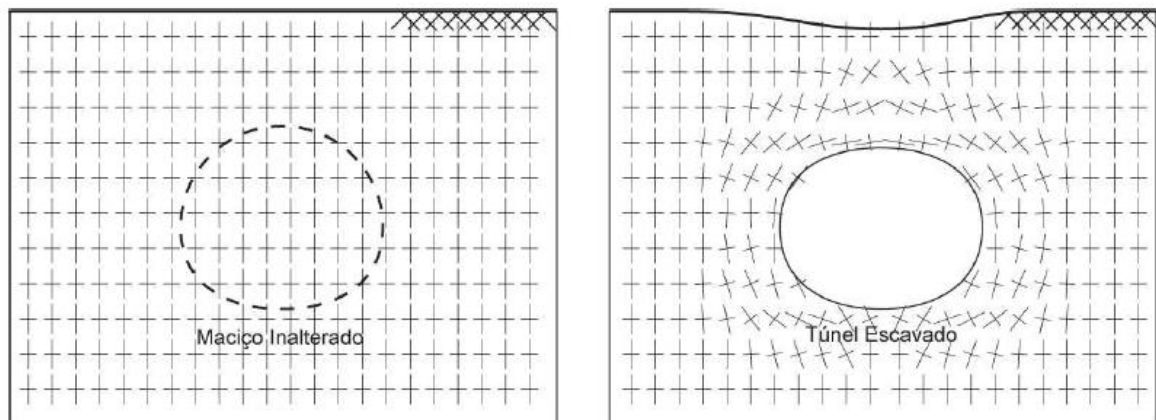


Figura 4.1 - Direcionamento das tensões principais no maciço inalterado e após a escavação do túnel (FRANÇA, 2006)

Eisenstein et al. (1984), conforme citado por Travagin (2012), salienta que este efeito de arqueamento de tensões supracitado é de natureza tridimensional, pois não se restringe apenas aos planos transversais ao eixo do túnel, mas se desenvolve também nos planos verticais e horizontais longitudinais, conforme ilustrado na Figura 4.2.

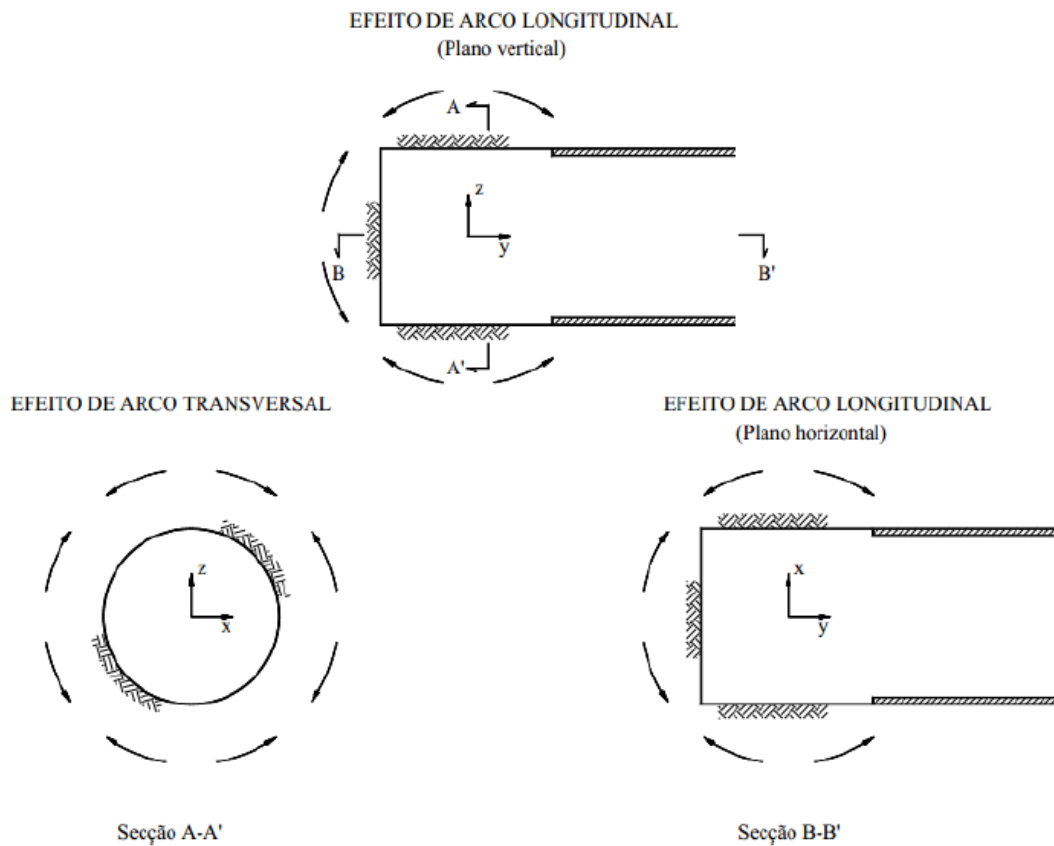


Figura 4.2 - Efeito de arqueamento de tensões (CANCELA, 2015)

Com a movimentação do maciço em direção ao eixo do túnel conforme o avanço da escavação, os deslocamentos adiante da frente de escavação são essencialmente longitudinais e, conforme Marques (2014), esta componente longitudinal atinge um valor máximo ao passar à frente de escavação e, posteriormente a essa seção, se reduz até praticamente zero. Os deslocamentos radiais, por sua vez, crescem gradualmente, aumentando com a aproximação da frente, atingindo um valor máximo a uma certa distância da frente e, exatamente na frente ocorre sua máxima taxa de variação, conforme ilustrado na Figura 4.3. Este movimento de fechamento em direção ao longo do eixo do túnel denomina-se convergência, é a medida física representativa do comportamento do túnel, sendo positiva quando a seção tende a se fechar.

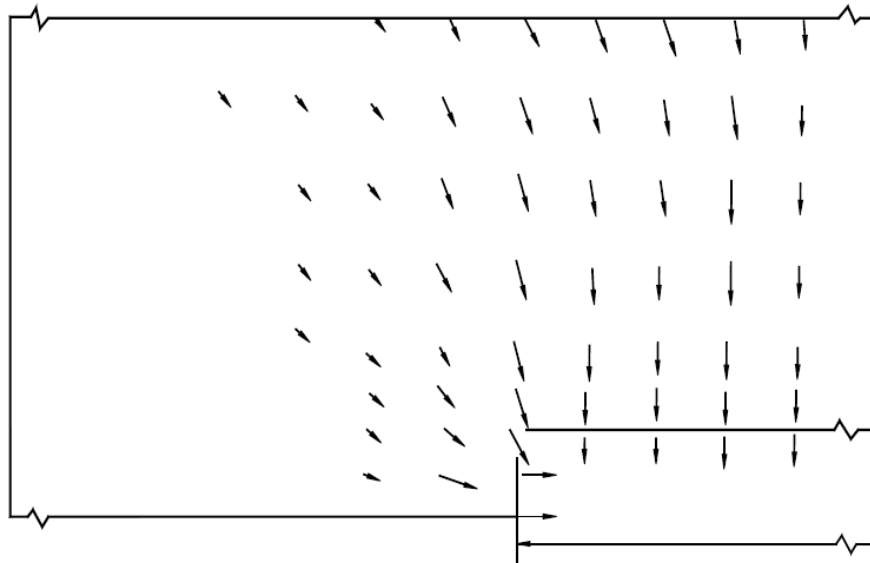


Figura 4.3 - Deslocamentos radiais (MARQUES, 2014)

Nas proximidades da frente de escavação o estado de deformação é tridimensional, mas ao afastar-se da frente de escavação, na região onde o equilíbrio já foi reestabelecido, o comportamento é aproximado ao de um estado plano de deformações. Segundo Galli et. al (2004), citado por França (2006), esta distância entre a frente e a região já equilibrada está relacionada às características do maciço e do suporte adotado. Maciços com menor resistência tendem a desenvolver uma zona de plastificação maior, aumentando essa distância até a condição de equilíbrio. Quanto ao suporte, quanto mais rígido e mais rápido ele for instalado, mais rápido se dará o reestabelecimento do equilíbrio, conforme Shahrour e Ghorbabeigi (1996 *apud* França, 2006). De maneira geral, a zona de influência de escavação se estende a uma distância entre três e quatro diâmetros, conforme se observa na Figura 4.4.

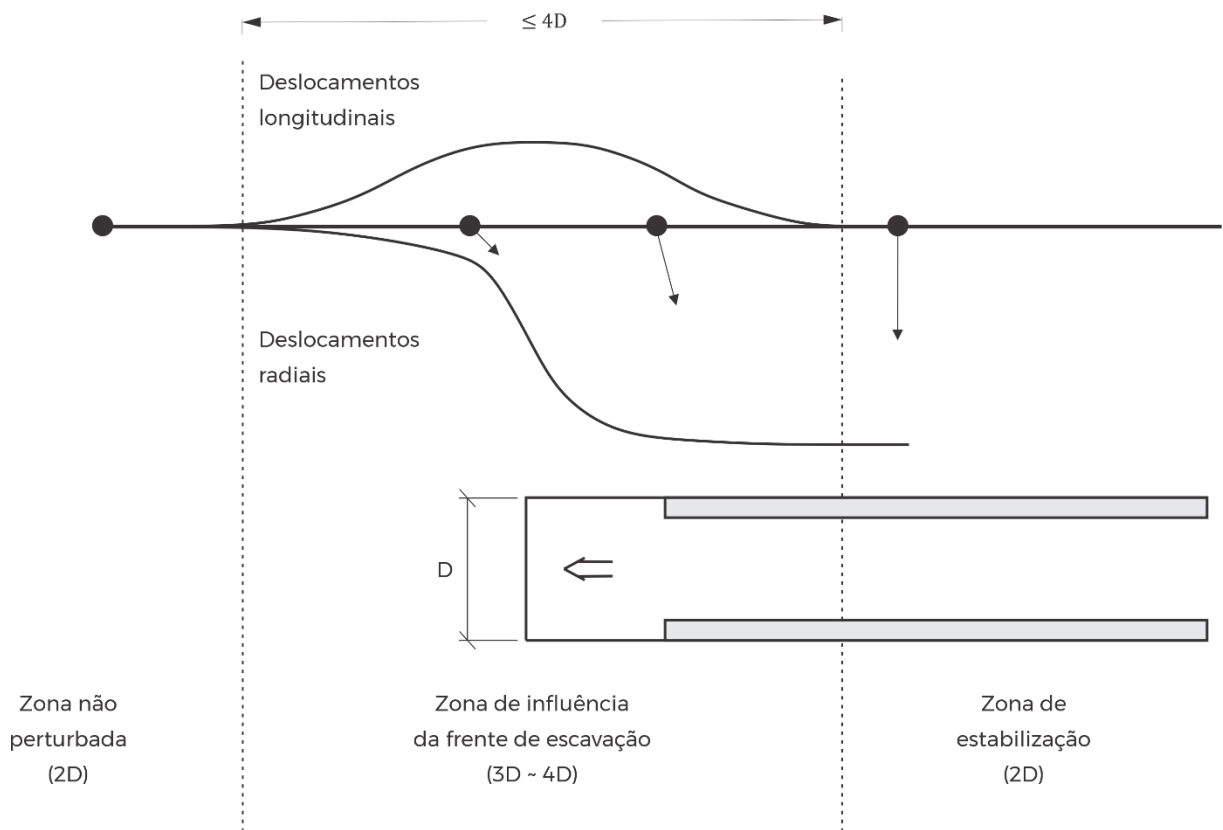


Figura 4.4 - Zonas de influência (adaptado de MARQUES, 2014)

Alguns outros fatores também influenciam o comportamento mecânico de túneis, como a influência da forma da seção transversal, por exemplo túneis com seções que possuem quinas apresentam concentrações de tensões nestes pontos. Há também influência da profundidade a que o túnel está localizado. No caso deste trabalho serão analisados apenas túneis com profundidades maiores que 10 vezes o raio, em que a diferença de tensão horizontal no diâmetro do túnel é desprezível em relação à tensão horizontal no eixo do túnel. Quevedo (2017) demonstrou com análises numéricas de túneis gêmeos que há influência da presença de outros túneis paralelos no campo de tensões e deformações no interior do maciço. Além da interação maciço-revestimento já citada, a reologia dos materiais envolvidos também influencia no comportamento do túnel, especialmente a longo prazo.

Conforme visto, o tratamento mais correto para a resolução do equilíbrio de um túnel é considerando o problema tridimensional e levando em conta a execução. Entretanto, diversas soluções se desenvolveram com base no estado plano de deformações da região em equilíbrio, fazendo algumas simplificações e adaptações para a região influenciada pela frente de escavação. Essas soluções serão abordadas nas próximas seções.

4.2 MÉTODOS ANALÍTICOS

Para a solução via métodos analíticos, considera-se o maciço como um meio contínuo e desenvolve-se equacionamentos a partir das teorias de elasticidade e plasticidade, que são capazes de determinar o comportamento ao longo do túnel. No desenvolvimento destas equações, é necessário tomar algumas decisões sobre alguns parâmetros, como a forma da seção transversal, as possíveis simetrias, o estado de tensões e deformações, tendo em vista a simplificação do problema.

Para este trabalho, estudou-se especificamente o caso de túneis profundos (com profundidade maior que 10 vezes o diâmetro da seção), com seção transversal circular, considerando-se o meio homogêneo e isótropo. Desta forma, o raio do túnel se torna muito pequeno em relação à sua profundidade e ao comprimento do túnel e, considerando o comportamento inicial do maciço como um estado de tensões geostático, pode-se descrever a solução como um estado plano de deformações, com todas as equações dependentes apenas da componente radial. Para o caso em estudo, o campo de deslocamentos em torno das paredes do túnel se comporta conforme ilustrado na Figura 4.5 a seguir.

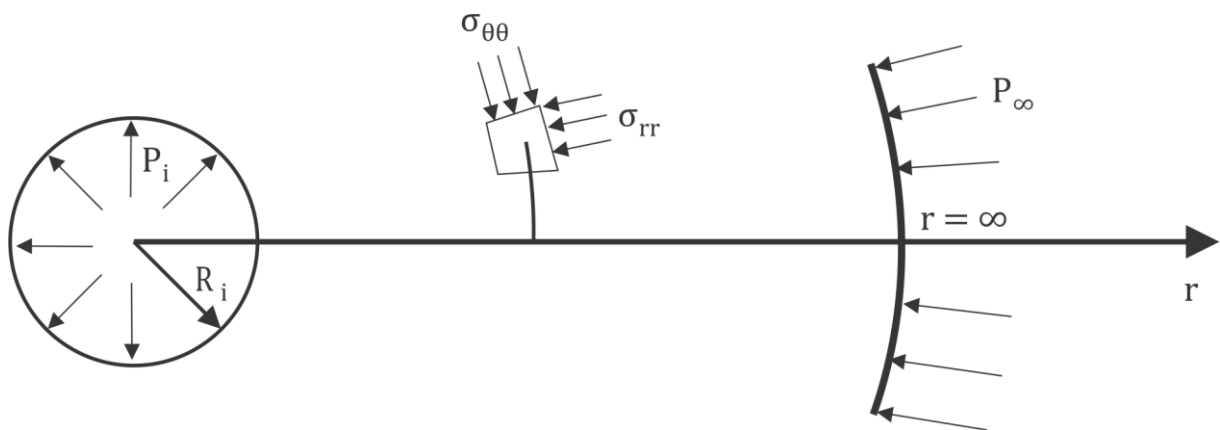


Figura 4.5 - Campo de deslocamentos em torno do túnel

A solução analítica para o problema descrito, considerando uma solução desenvolvida sobre a teoria de elasticidade, proposta por Corbetta (1990), é dada pelo seguinte conjunto de Equações: em (4.1) a (4.3) estão descritas as formulações que determinam as tensões radiais, ortorradiais

e na direção do eixo do túnel, respectivamente; a Equação (4.4) refere-se aos deslocamentos em função do raio.

$$\sigma_{rr} = (P_{\infty} - P_i) \left(\frac{R_i}{r} \right)^2 - P_{\infty} \quad (4.1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = -(P_{\infty} - P_i) \left(\frac{R_i}{r} \right)^2 - P_{\infty} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{zz} = -P_{\infty} \quad (4.3)$$

$$u(r) = -\frac{(1 + \nu)}{E} (P_{\infty} - P_i) \frac{R_i^2}{r} \quad (4.4)$$

Onde:

σ_{rr} = componente de tensão radial;

P_{∞} = pressão geostática;

P_i = pressão interna na parede do túnel;

R_i = raio do túnel;

r = coordenada radial na posição analisada;

ν = coeficiente de Poisson;

E = módulo de elasticidade do maciço;

$\sigma_{\theta\theta}$ = componente da tensão ortorradial;

σ_{zz} = componente da tensão na direção do eixo do túnel;

$u(r)$ = deslocamento radial.

É possível estender o mesmo formato de solução para a teoria de plasticidade, ou seja, considera-se o surgimento de uma zona de plastificação do maciço em torno da abertura e o restante fora desta região permanece em regime elástico. Isso ocorre quando a pressão interna atinge um valor limite, calculado a partir de um critério de plasticidade. O tamanho da zona

plástica é medido pelo raio de plastificação y , conforme ilustrado na Figura 4.6. Os valores de raios menores que y indicam que o maciço se encontra na zona plástica e raios maiores que y significam que o maciço se encontra em regime elástico.

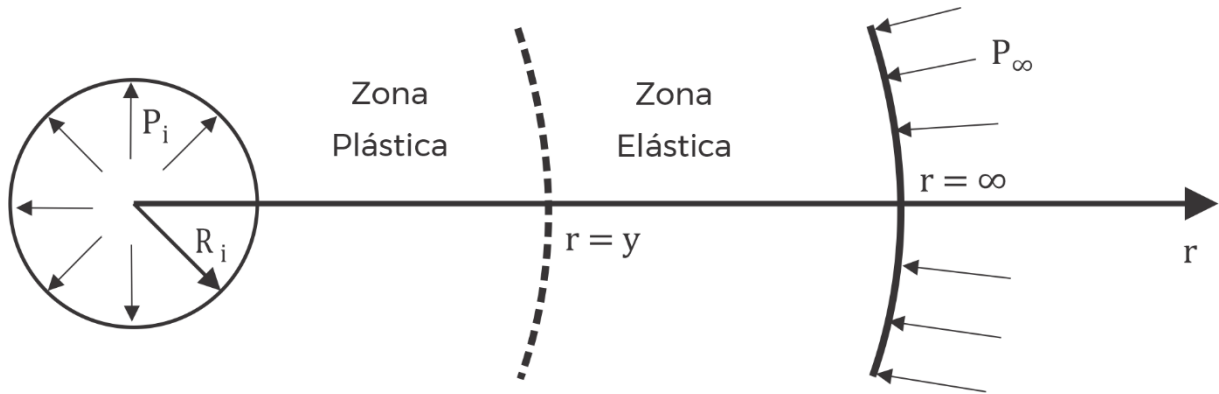


Figura 4.6 - Limitação das zonas plástica e elástica

Considerando-se a plasticidade perfeita, as deformações plásticas se desenvolvem somente se um critério de plasticidade for atingido. Para este trabalho, adotou-se o critério de plasticidade de Tresca para a solução analítica, devido à sua compatibilidade com o critério de Von Mises, que será utilizado na modelagem numérica. A seguir são explicitadas as equações definidas por Corbetta (1990), para o mesmo problema anterior, porém aplicando-se o critério de plasticidade de Tresca. A Equação (4.5) define o valor limite para a pressão interna, enquanto a (4.6) define o raio plástico. Em (4.7) a (4.9) define-se novamente as componentes de tensões e em (4.10) os deslocamentos.

$$P_{lim} = P_{\infty} - C \quad (4.5)$$

$$y = e^{\left(\frac{P_{\infty} - P_i - \frac{1}{2}}{2C}\right)} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{rr} = \begin{cases} C \left(\frac{y}{r}\right)^2 - P_{\infty}, & \text{caso } r > y \\ -2C \ln\left(\frac{r}{R_i}\right) - P_i, & \text{caso } r < y \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \begin{cases} -C \left(\frac{y}{r}\right)^2 - P_{\infty}, & \text{caso } r > y \\ -2C \left(1 + \ln\left(\frac{r}{R_i}\right)\right) - P_i, & \text{caso } r < y \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\sigma_{zz} = \begin{cases} -P_{\infty}, & \text{caso } r > y \\ \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta}) + (2\nu - 1)P_{\infty}, & \text{caso } r < y \end{cases} \quad (4.9)$$

$$u(r) = \begin{cases} -rC \frac{(1+\nu)}{E} \left(\frac{y}{r}\right)^2, & \text{caso } r > y \\ -2rC \frac{(1-\nu^2)}{E} \left(\frac{y}{r}\right)^2 + r \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E} \left(-2C \ln\left(\frac{r}{R_i}\right) - P_i + P\right), & \text{caso } r < y \end{cases} \quad (4.10)$$

Onde:

P_{lim} = pressão limite entre os regimes elástico e plástico;

C = coesão do maciço;

y = raio plástico;

Na Figura 4.7 estão exemplificados os diagramas típicos de tensões e deslocamentos para a solução em estado plano de deformações radiais, considerando o maciço elástico e elastoplástico.

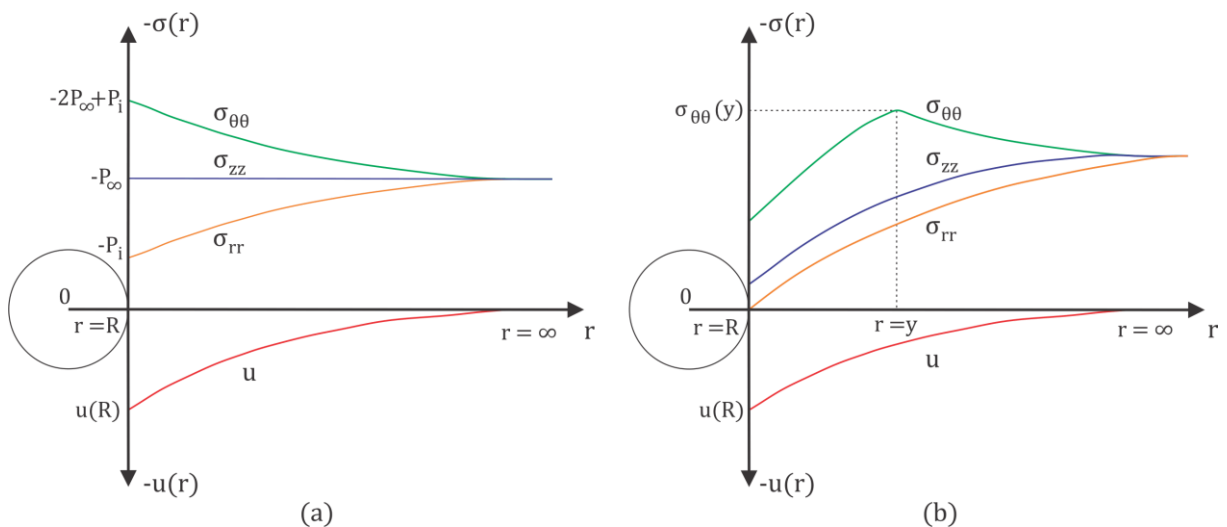


Figura 4.7 - Comportamento da solução em estado plano de deformações radiais: (a) maciço elástico, (b) maciço elastoplástico (adaptado de QUEVEDO, 2017)

4.3 MÉTODOS SIMPLIFICADOS

Os métodos simplificados consistem em estimativas do estado de equilíbrio final do túnel, utilizando ferramentas que simplificam bastante o processo de determinação deste estado, transformando o problema tridimensional em um unidimensional. Pela rapidez com que geram boas estimativas do resultado final, são bastante utilizados para o pré-dimensionamento de túneis, tomando-se os valores fornecidos por estes cálculos como base para os modelos de cálculo posteriores mais refinados. Nesta seção serão abordados três destes métodos.

4.3.1 NATM (New Austrian Tunneling Method)

O NATM (New Austrian Tunneling Method) é um dos mais difundidos desses métodos simplificados, suas primeiras citações na literatura datam dos anos 1960, por Rabcewicz, um de seus principais desenvolvedores. Segundo Araújo Silva (1997), o NATM é um método que conduz a uma estabilização pelo alívio controlado de pressão. O alívio de tensões é efetuado intencionalmente; os valores das deformações e tensões são rigorosamente medidos e controlados de acordo com as necessidades.

O NATM pode ser abordado de duas formas principais: como uma filosofia ou como um método construtivo. Tomando a via filosófica do método, mobiliza-se ao máximo a resistência ao redor do túnel escavado, instrumentaliza-se o túnel e mede-se os deslocamentos gerados pela convergência, permitindo controlar a deformação do maciço. Ao atingir a convergência desejada, instala-se o suporte inicial seguindo as curvas de convergência e confinamento, que serão abordadas no segundo método estudado nesta seção. Como método construtivo, o túnel deve ser sequencialmente escavado e revestido, diminuindo-se o máximo possível os espaços de tempo entre as duas ações, ou seja, minimizando o comprimento não revestido. Após escavado, aplica-se um suporte inicial, geralmente em concreto projetado, com ou sem reforços. Deixa-se então o maciço se deformar e na sequência inicia-se a execução do suporte permanente, de maneira usual também em concreto.

A sequência construtiva do método, de maneira geral, inicia-se pela escavação da abertura em forma de círculo, por exemplo. Executa-se então os primeiros elementos de contenção, como cambotas e enfilagens para túneis em solo ou tirantes para caso de rochas, seguidos pelo revestimento primário, usualmente em concreto projetado. Se necessário, são aplicadas telas e executado o arco invertido provisório. Em seguida, executa-se o arco invertido definitivo e aplica-se tela. Por fim, aplica-se o revestimento secundário, também normalmente em concreto

projetado. Na Figura 4.8 está ilustrada a curva proposta por Fenner & Pacher para a interação entre o maciço e o revestimento.

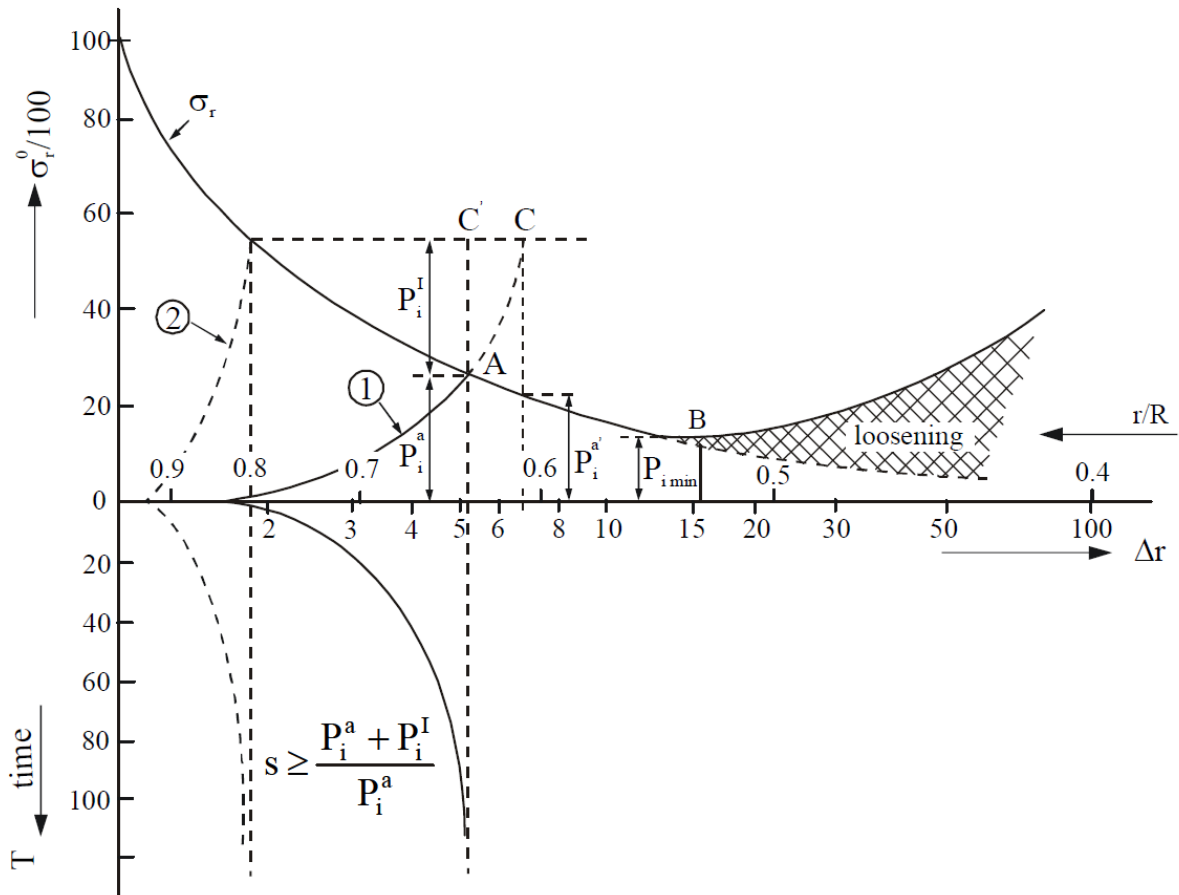


Figura 4.8 - Curva de Fenner & Pacher, citado por Rabcewicz (1973) (KARAKUS; FOWELL, 2004)

Dentre as principais vantagens deste método se destacam: a flexibilidade de geometrias de seção; o baixo custo de equipamentos comparados a outros métodos; a facilidade de adicionar suportes extras caso necessário e de executar a impermeabilização; o monitoramento das deformações e distribuição de tensões; o bom desempenho do contato entre maciço e revestimento propiciado pelo uso do concreto projetado e o uso em diversos tipos de maciço.

Como fatos negativos deste método, destaca-se uma série de acidentes que ocorreram em túneis deste tipo, decorrentes tanto durante a execução quanto com o túnel já operando, sendo um dos casos mais recentes e conhecidos o acidente no túnel do metrô de São Paulo, na estação Pinheiros, no ano de 2007, conforme ilustrado na Figura 4.9, onde é possível ver parte do solo

colapsado e as instalações e prédios ao redor inclinadas. A eficiência e a segurança deste método são bastante questionáveis, porém seu uso pode ser bastante qualificado quando associado a modelos numéricos para ratificar os resultados obtidos.



Figura 4.9 - Acidente na estação Pinheiros do Metrô de São Paulo (HANANE, 2018)

4.3.2 Método da Convergência e Confinamento (CV-CF)

Este método é uma evolução de diversas pesquisas, incluindo a de Fenner-Pacher ilustrada na Figura 4.8, e baseia-se sobre duas curvas referentes ao túnel em estudo: uma de convergência (CV), relacionada ao comportamento do maciço; e outra de confinamento (CF) representando o desempenho estrutural do revestimento. Este método leva em conta a interação maciço-revestimento, porém simplifica o problema a um estudo em deformações planas, tratando de forma independente cada uma das curvas e analisando a interação com a intersecção das duas.

A curva de convergência do maciço pode ser obtida, por exemplo, através dos métodos analíticos apresentados na seção anterior, dividindo-se o valor calculado dos deslocamentos na parede do túnel pelo raio. Para simular o efeito do avanço da face de escavação, considera-se

uma pressão fictícia P_i^f , variando do valor da pressão hidrostática P_∞ até zero, conforme indicado pela Equação (4.11). Nota-se que neste caso, P_i^f depende apenas da distância entre a seção analisada e a face de escavação e do comportamento do maciço.

$$P_i^f = [1 - \lambda(x)P_\infty] \quad (4.11)$$

Onde:

P_i^f = pressão fictícia;

$\lambda(x)$ = fator de perda de confinamento;

x = distância entre a seção analisada e a face de escavação;

Traçada a curva de convergência, para um dado d_0 (distância entre o fim do revestimento e a face de escavação), conhecido o valor de $P_i^f(d_0)$, aplica-se este valor sobre a curva, encontrando-se o valor da convergência inicial U_0 . No ponto em que este valor de convergência toca o eixo das abcissas posiciona-se o início da reta ou curva de confinamento, que depende das características do revestimento adotado. No ponto em que as duas curvas se interceptam está o ponto de equilíbrio do túnel, representado pelos parâmetros pressão de equilíbrio P_{eq} e convergência de equilíbrio U_{eq} , que são os parâmetros que dimensionam o túnel. A representação gráfica deste processo está na Figura 4.10. A convergência do túnel, por sua vez, pode ser determinada através da expressão apresentada na Equação (4.12).

$$U_i = - \frac{u(r = R_i)}{R_i} \quad (4.12)$$

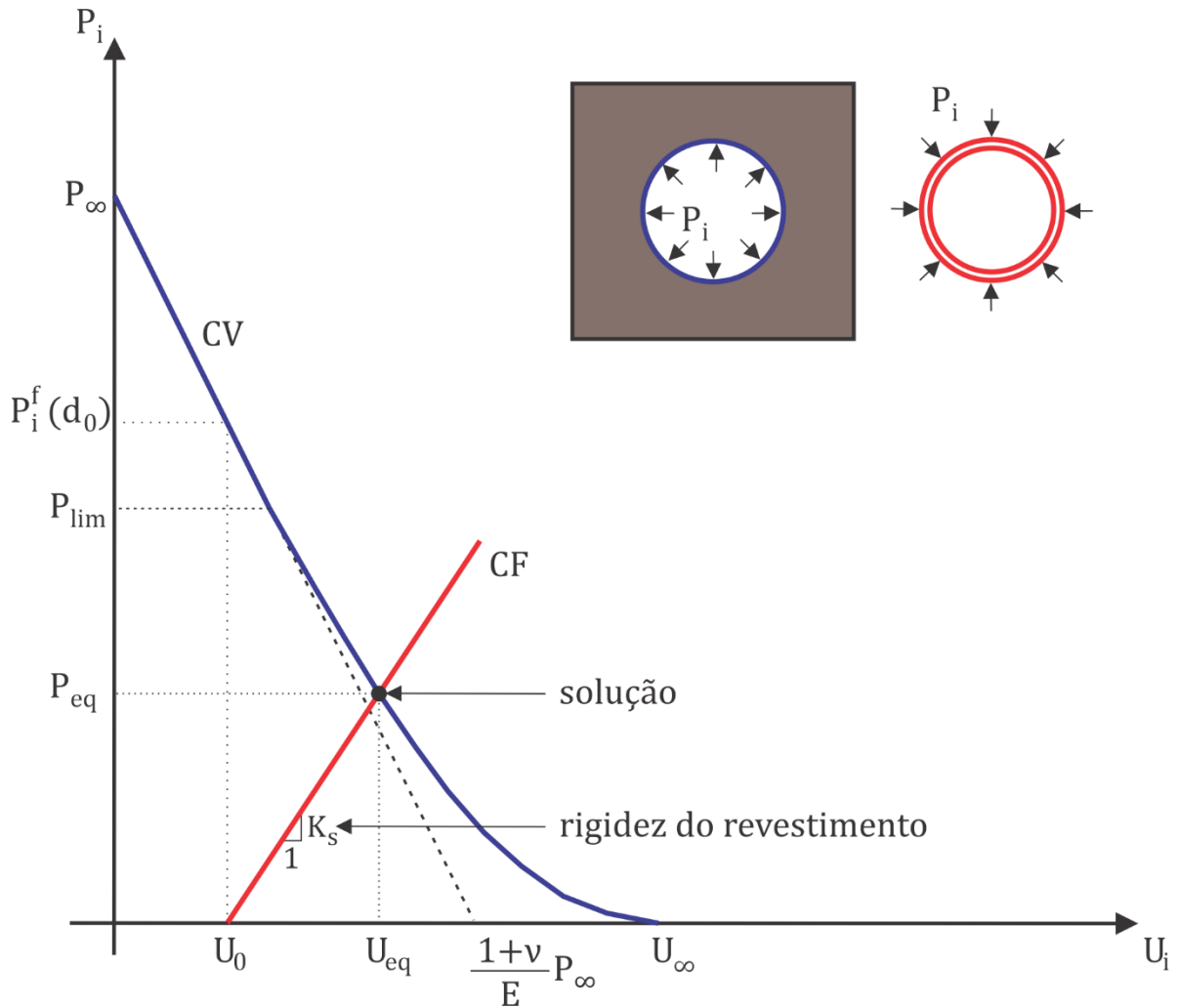


Figura 4.10 - Método da convergência-confinamento

A curva de confinamento pode ser obtida de várias maneiras, tanto numéricas como analíticas em estado plano de deformações. Para exemplificar estas formulações, apresenta-se na Equação (4.13), conforme Panet (2004) apontado por Quevedo (2017), a rigidez K_C de revestimentos em concreto para um tubo espesso ($R_e/t_c \leq 10$) e de uma casca cilíndrica ($R_e/t_c > 10$), considerando o comportamento elástico linear do material.

$$K_C = \begin{cases} \frac{E_C [R_e^2 - (R_e - t_c)^2]}{(1 - \nu)[(1 - 2\nu)R_e^2 + (R_e - t_c)^2]}, & \text{se } \frac{R_e}{t_c} \leq 10 \\ \frac{E_C}{(1 - \nu^2)} \frac{t_c}{R_e}, & \text{se } \frac{R_e}{t_c} > 10 \end{cases} \quad (4.13)$$

Onde:

K_C = rigidez do revestimento em concreto;

E_c, ν = módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson do concreto, respectivamente;

t_c = espessura do revestimento;

R_e = raio externo do túnel;

O parâmetro-chave deste método é a convergência inicial do túnel U_0 , que é função do comportamento do maciço e da distância entre a face de escavação e o último revestimento colocado. Ao desconsiderar a rigidez do revestimento sobre a estimativa da convergência U_0 , subestima o valor da P_{eq} , o que vai contra a segurança, especialmente para o caso em plasticidade, devido à aproximação pouco efetiva da interação maciço-revestimento.

4.3.3 NIM (‘New Implicit Method’ ou ‘Novo Método Implícito’)

Baseando-se no método da convergência e confinamento, porém buscando melhorar a estimativa da convergência inicial levando em conta a rigidez do revestimento e refinando a solução do equilíbrio, Bernaud e Rousset (1992) propuseram o *New Implicit Method* (NIM). Na Figura 4.11, nota-se a diferença da consideração do revestimento na convergência inicial ao comparar as curvas de convergência de um mesmo túnel obtidas por análise numérica e o método da convergência e confinamento.

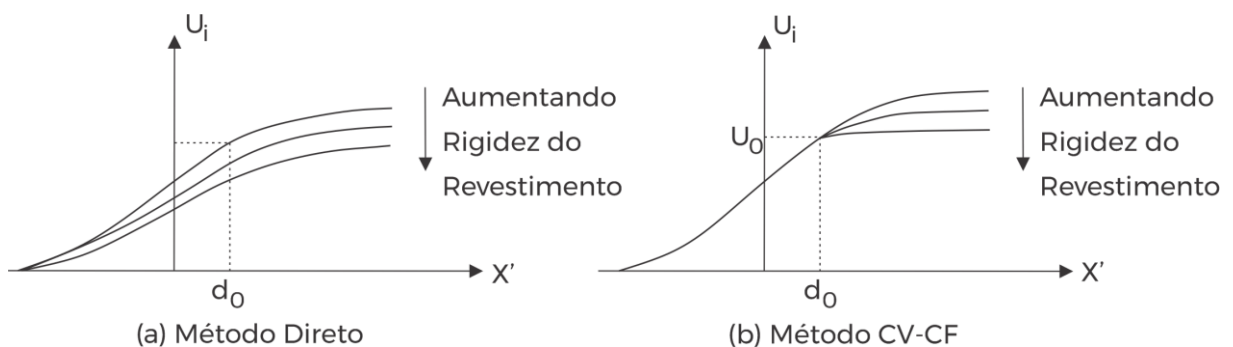


Figura 4.11 - Comparação entre análise numérica e método da convergência-confinamento (adaptado de BERNAUD E ROUSSET, 1992)

O objetivo deste método é obter a curva de convergência do túnel com revestimento a partir de uma transformação geométrica simplificada da curva do túnel não revestido. Para tal, foi proposto o uso de uma função de forma dependente da convergência em alguns pontos, conforme a Equação (4.14), para o caso de análise em elasticidade e plasticidade. A forma gráfica da definição da função apresentada na Equação (4.14) é mostrada na Figura 4.12.

$$a(x) = \frac{U_i(x) - U_i(0)}{U_{eq} - U_i(0)}, \quad \text{com } 0 \leq a \leq 1 \quad (4.14)$$

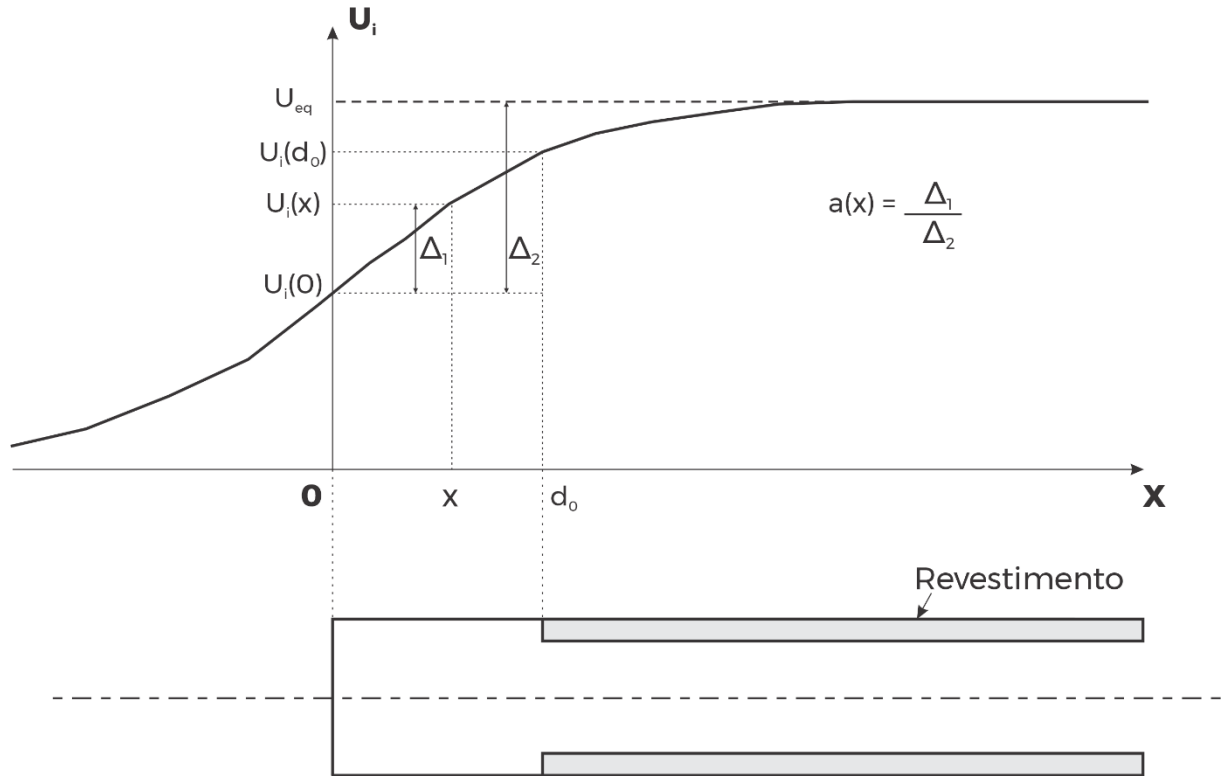


Figura 4.12 - Definição da função de forma $a(x)$ (adaptado de BERNAUD E ROUSSET, 1992)

Para cálculos numéricos tridimensionais em elasticidade, a função definida na Equação (4.14) tem as formas presentes na Figura 4.13, definidas para uma série de valores de rigidez de revestimento (K'_s). Neste caso, a função de forma foi apresentada para os parâmetros independentes na forma adimensional, conforme as Equações (4.15) a (4.17).

$$K'_s = \frac{K_s}{E} \quad (4.15)$$

$$P'_\infty = \frac{P_\infty}{E} \quad (4.16)$$

$$d_0' = \frac{d_0}{R_e} \quad (4.17)$$

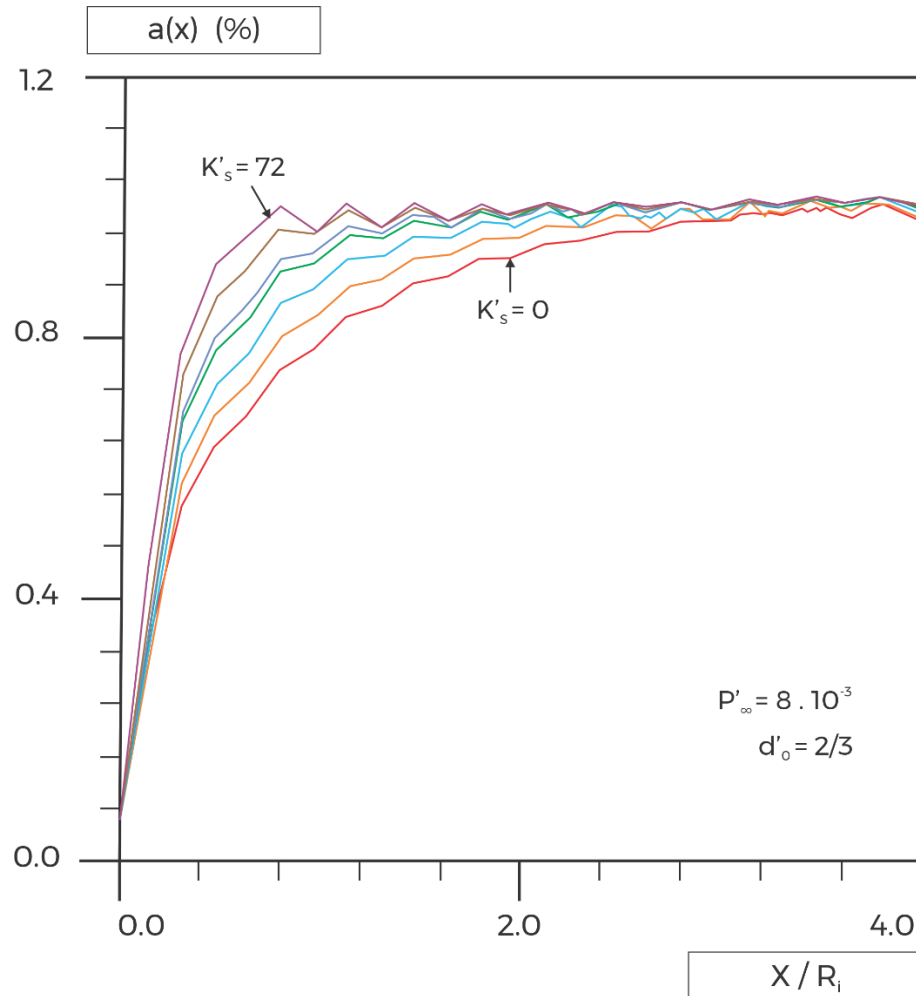


Figura 4.13 - Forma da função $a(x)$ para diferentes K'_s com cálculos numéricos tridimensionais em elasticidade (adaptado de BERNAUD E ROUSSET, 1992)

Para a solução, opera-se de forma semelhante à do método da convergência e confinamento, com a diferença que para a curva de confinamento a pressão de equilíbrio é dado no ponto da convergência de equilíbrio U_{eq} subtraída do ponto de convergência inicial U_0 . Benamar et al. (1994) ainda estendeu a aplicabilidade do método para meios viscoplásticos, considerando a influência da velocidade de escavação sobre o equilíbrio, tornando assim o método mais abrangente. Comparado a soluções numéricas, o erro estimado é da ordem de 10%, tornando o método uma ótima ferramenta para estimativas iniciais e pré-dimensionamento de túneis, visto a simplicidade da aplicação frente aos métodos numéricos.

4.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Dentre os métodos numéricos utilizados para simulações e projetos de engenharia, o mais difundido atualmente é o método dos elementos finitos, especialmente para determinar carregamentos, tensões e deformações, como é o caso do estudo de túneis. Zienkiewicz e Taylor (2005) definem o início da análise e um problema neste método pela divisão do domínio de interesse em um conjunto de subdomínios, que são os elementos. Para o caso de estruturas complexas, é comum fazer simplificações, como por exemplo em relação à simetria na geometria da estrutura ou ainda dividir a estrutura em subestruturas para se analisar com mais cuidado algumas particularidades. O conjunto de elementos denomina-se malha, podendo ser formado por elementos de vários tipos e formas, conforme o problema. Um resumo com os tipos de elementos mais usuais está presente na Figura 4.14.

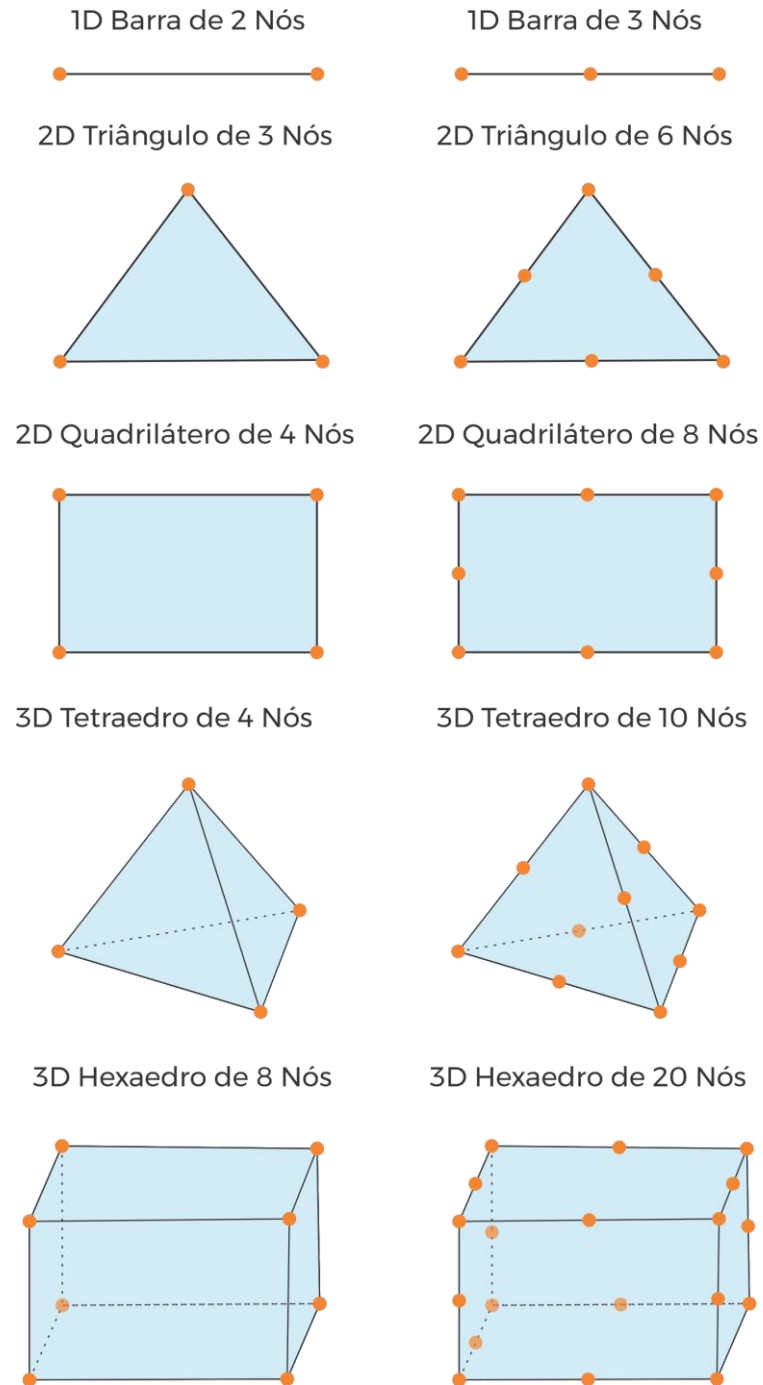


Figura 4.14 - Principais tipos de elementos finitos

A formulação do método baseia-se no princípio dos trabalhos virtuais, isto é, no equilíbrio entre as forças externas e internas através de relações força-deslocamento. Conhecidos os graus de liberdade do elemento escolhido, os deslocamentos nodais e o vetor de cargas, a matriz de rigidez do elemento pode ser definida conforme a Equação (4.18), segundo Rockey et. al (1983).

$$\{F^e\} = [K^e]\{\delta^e\} \quad (4.18)$$

Onde:

$\{F^e\}$ = vetor de cargas no elemento;

$[K^e]$ = matriz de rigidez do elemento;

$\{\delta^e\}$ = vetor de deslocamentos nodais do elemento;

Conforme Rockey et. al (1983) é necessário escolher uma função de forma (também conhecida por função de interpolação) adequada para o elemento utilizado, que defina univocamente o estado de deslocamentos em todos os pontos no interior do elemento. Como o objetivo é exprimir os deslocamentos em função dos deslocamentos nodais, a função de forma deve ter um coeficiente desconhecido para cada grau de liberdade do elemento. Relaciona-se então os deslocamentos conforme a Equação (4.19).

$$\{\delta\} = [N]\{\delta^e\} \quad (4.19)$$

Onde:

$\{\delta\}$ = vetor de deslocamentos no interior do elemento;

$[N]$ = matriz das funções de forma;

Estabelece-se então as relações entre deformação e deslocamento, sendo as deformações no interior do elemento relacionadas aos deslocamentos e, por consequência, aos deslocamentos nodais. Conforme Rockey et. al (1983) a relação entre as deformações e os deslocamentos são dadas pela derivação da função de forma escolhida, por exemplo em elasticidade plana as deformações correspondem às derivadas primeiras dos deslocamentos, representados na forma matricial pela Equação (4.20).

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta^e\} \quad (4.20)$$

Onde:

$\{\varepsilon\}$ = vetor de deformações no interior do elemento;

$[B]$ = matriz de relação entre as deformações no interior do elemento e os deslocamentos nodais;

Introduz-se então as propriedades do elemento para determinar as relações entre as tensões e os deslocamentos. Para representar os materiais, define-se a matriz constitutiva. No caso de elasticidade, por exemplo, devem conter grandezas como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson do material. Feitas essas considerações, conforme Rockey et. al (1983), pode-se estabelecer a Equação (4.21) que determina as tensões internas em função dos deslocamentos nodais do elemento.

$$\{\sigma\} = \{\sigma_0\} + [D]\{\varepsilon_0\} + [D][B]\{\delta^e\} \quad (4.21)$$

Onde:

$\{\sigma\}$ = vetor de tensões no interior do elemento (nos pontos de Gauss);

$\{\sigma_0\}$ = vetor de tensões iniciais no interior do elemento (nos pontos de Gauss);

$[D]$ = matriz de relações constitutivas do material;

$\{\varepsilon_0\}$ = vetor de deformações iniciais no interior do elemento (nos pontos de Gauss).

Definida a matriz de rigidez dos elementos, é possível montar a matriz de rigidez global da estrutura, aplicar condições de contorno, como deslocamentos prescritos ou forças e solucionar a Equação (4.18) com os vetores e matrizes globais da estrutura completa. A partir daí pode-se fazer o cálculo das tensões e análise dos resultados. Um resumo dos principais passos envolvidos na solução pelo método dos elementos finitos está na Figura 4.15.

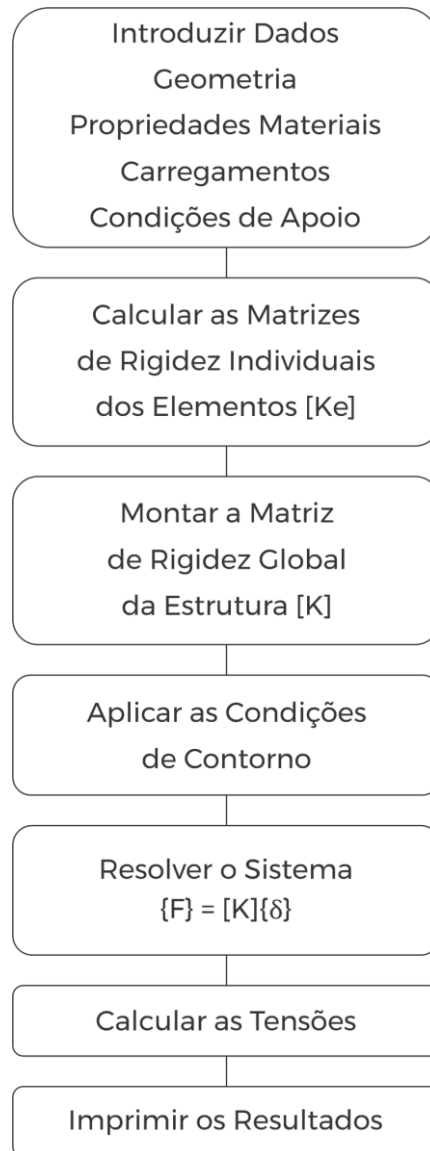


Figura 4.15 - Etapas de solução do método dos elementos finitos (adaptado de ROCKEY et. al, 1983)

Conforme França (2006), as principais vantagens do uso de métodos numéricos para o projeto de túneis, especificamente, são a simulação das etapas construtivas em verossimilhança e a possibilidade de reproduzir além de geometrias complexas, também descontinuidades no maciço, com estratos não homogêneos ou não isotrópicos, etc. Além disso, Cancela (2015), acrescenta outros aspectos, como a existência de níveis freáticos, a consideração do estado de tensão inicial, visto que a principal ação no dimensionamento é advinda do alívio de tensões no maciço, a interação maciço-revestimento e uma melhor aproximação do comportamento dos materiais. Por fim, Cancela (2015) ressalta a facilidade com que em simulações numéricas se consegue facilmente alterar os fatores que determinam o comportamento estrutural, o que é essencial na elaboração de estudos paramétricos, como é o caso desta dissertação.

Apesar do problema de dimensionamento e projeto de túneis ser de natureza tridimensional, nos métodos numéricos também é recorrente a simplificação em alguns casos, como por exemplo modelo em deformações planas para túneis superficiais. Quevedo (2017) menciona também as soluções numéricas em axissimetria, que são bidimensionais e simulam o processo de escavação e colocação do revestimento através da ativação e desativação de elementos, mas cuja simplificação gera uma série de limitações, como geometria de seção e propriedades do maciço. Um exemplo de *software* que opera desta maneira é o GEOMECC91, utilizado para realizar simulações deste estudo.

Os modelos tridimensionais, por sua vez, requerem maior trabalho na elaboração das geometrias e malhas para representação do problema e exigem mais recursos computacionais para sua solução. Entretanto, esse tipo de análise amplia muito as possibilidades dos fatores que podem ser simulados, tornando o modelo mais fidedigno à realidade. Dentre estes fatores, Quevedo (2017) destaca o detalhamento do processo construtivo, através da ativação e desativação de elementos, incluindo escavações com seção parcializada, os tipos de carregamentos e seções, as variações no maciço, os efeitos de assentamento na superfície e próximo a fundações e a interação com elementos como estações e galerias transversais.

França (2006) aponta ainda uma série de estudos dos últimos 30 anos que mostram uma tendência à utilização de modelos tridimensionais mesmo para túneis de geometrias mais simples, para melhor simular as etapas construtivas e as particularidades de cada túnel estudado, fato bastante associado à maior disponibilidade de *softwares* e capacidade de *hardware* para processar esses modelos.

4.5 TÚNEIS GÊMEOS


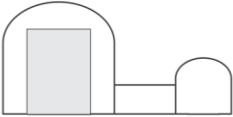
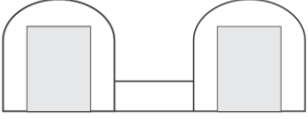
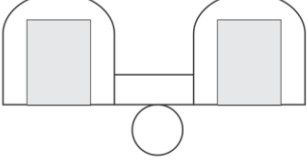
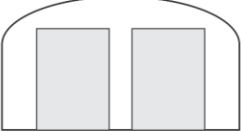
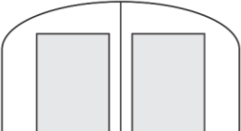
Túneis gêmeos são, de maneira geral, utilizados para formar duas vias de transporte independentes. Podem ser usados para operar em dois sentidos de um mesmo modal de transporte, como por exemplo túneis gêmeos rodoviários, em que cada túnel se trafega em um sentido. É possível também que em cada túnel opere um modal de transporte, como no caso do túnel de Fréjus, que liga a França à Itália, em que um túnel rodoviário de circulação bidirecional foi construído paralelamente a um túnel ferroviário já existente.

Conforme Mohammed e Hrubesova (2018), recentemente muitos desses túneis são construídos, especialmente em ambientes urbanos, resultando em túneis muito próximos um ao outro. Outro

caso em que há o comportamento de túneis gêmeos é ao construir um túnel adjacente a um já existente. Em algumas situações, como metrô em regiões muito urbanizadas, constrói-se túneis acima ou abaixo de outros pré-existentes para desviar de fundações.

Quando se trata deste tipo de túnel, geralmente se resolve o problema por duas abordagens: considerando um modelo bidimensional em deformações planas, que possui uma série de limitações, principalmente relacionadas à dificuldade de obtenção de alguns parâmetros; ou um modelo numérico tridimensional em elementos finitos, que apesar de ser uma ferramenta bastante precisa, ainda é pouco utilizada frente à complexidade de elaboração dos modelos e malhas, na simulação das fases da escavação e colocação do revestimento e pelo custo computacional envolvido.

Segundo a European Commission (2018), o orçamento para a construção de túneis gêmeos é aproximadamente o dobro de um túnel simples, podendo este custo ser ainda mais oneroso caso seja necessário executar galerias entre eles ou túneis de serviço. Dentre alguns benefícios da escavação de um túnel de serviço para o túnel principal pode-se citar o conhecimento aprofundado das características do solo, a melhoria da condição do solo próximo à região da face de escavação do túnel principal, o uso técnico para manutenção e drenagem ou uso como túnel de segurança. A decisão entre as diversas configurações de túneis está relacionada ao custo-benefício, às condições geológicas, à demanda operacional do trecho, e à análise de risco e segurança. No Quadro 4.1 é apresentada uma estimativa de custo de algumas configurações de túneis em relação a um túnel simples.

Tipo de Túnel	Seção	Custo (Túnel Simples de Via Única= 100)
Túnel Simples de via única		100
Túnel Simples de via única com Túnel de Serviço		160
Túneis Gêmeos com Galerias Transversais		220
Túneis Gêmeos com Galerias Transversais e Túnel de Serviço		250
Túnel Simples de via dupla		130
Túnel Simples de via dupla sem paredes de segurança		140

Quadro 4.1 - Comparativo de custo de túneis (adaptado de EUROPEAN COMMISSION, 2018)

Com o aprimoramento da tecnologia, o uso de tuneladoras tem sido bastante associado à construção deste tipo de túnel. Em um estudo de caso, Namli (2016) faz um comparativo entre o uso do NATM e tuneladora para a construção de um túnel gêmeo na expansão de uma linha de metrô. Levando em conta as variações de solo da região, utilizando-se duas tuneladoras operando paralelamente reduziria o custo em 29% em relação ao NATM, além de concluir a obra quase um ano antes.

Uma das principais questões no estudo de túneis gêmeos é quanto à distância ideal entre os dois túneis. Basicamente o problema a ser solucionado é posicionar estes túneis de forma que a zona

de plastificação de um não interfira na do túnel adjacente. Na literatura, alguns trabalhos sugerem fórmulas empíricas, um exemplo é o trabalho de Siahmansouri et. al (2014), que ensaiou 167 túneis deste tipo com diversas configurações e condições de solo e utilizou análise de regressão não-linear para ajustar um equacionamento que determina esta distância.

Algumas pesquisas buscam, a partir de estudos em túneis simples, definir soluções analíticas para o cálculo de túneis gêmeos. Um exemplo disso é apresentado por Fu et. al (2015), que considerou os dois túneis rasos em um meio semi-plano elástico, aproximando o deslocamento na região de interação entre os túneis por uma análise de Fourier e aplicando o método iterativo de Schwarz. Os resultados foram comparados a um modelo numérico em elementos finitos e concluiu-se que a precisão da resposta está relacionada à correta escolha dos termos na série de Fourier, a discretização das integrais de Fourier e a quantidade de passos de iteração. Se para um modelo em elasticidade este modelo já é bastante complexo e passível de produzir erros conforme a escolha dos parâmetros, em modelos que levam em conta a plasticidade, por exemplo, uma solução analítica se torna ainda mais complexa. Conforme os próprios autores concluíram que materiais homogêneos e lineares elásticos são uma parcela pouco representativa dos solos na engenharia de túneis, indicando a solução desenvolvida para estudos preliminares, servindo de referência para um modelo numérico e mais detalhado.

Em um outro trabalho mais recente, Wang et. al (2017) propõe uma solução analítica em viscoelasticidade para as tensões e deslocamentos levando em conta a reologia das rochas e a sequência de escavação em túneis gêmeos. A solução analítica foi comparada a um modelo em elementos finitos e foi feito um estudo paramétrico para verificar a influência de um túnel sobre o outro. Concluiu-se que o espaçamento entre os túneis afeta mais os deslocamentos que as tensões e que quanto mais espaço de tempo se der entre a escavação do primeiro e do segundo túnel, menores serão os deslocamentos que o segundo túnel provocará no primeiro.

4.6 TÚNEIS GÊMEOS COM GALERIAS

Essencialmente por questões de segurança, quando são construídos túneis gêmeos de comprimentos muito longos, é recomendável que seja previsto em projeto galerias transversais fazendo uma conexão entre os dois túneis, oferecendo uma rota de saída no caso de uma emergência, facilitando a manutenção entre os túneis e em alguns casos até melhorando a ventilação e a qualidade do ar no interior do túnel.

A distância mínima recomendada entre as galerias é bastante variada conforme os regulamentos de cada país ou região. No Reino Unido, por exemplo, o UK Government (2019) determina que a cada 500 metros do túnel principal seja posicionada uma galeria transversal fazendo a conexão entre os dois túneis, bem como rotas de saída ao longo do túnel conectadas à superfície nos portais de entrada e saída dos túneis. Vetsch et. al (2016) citam alguns outros exemplos de distâncias entre as galerias de grandes projetos de túneis, como: Seikan Tunnel, no Japão, com galerias transversais a cada 600 m do túnel principal; o Gotthard Base Tunnel, com distância entre as galerias de 333 metros; e o Channel Tunnel ou Eurotunnel, que liga a França ao Reino Unido e possui um afastamento de 375 metros entre as galerias transversais. Um corte da seção transversal do túnel de Brenner Base, nos alpes entre a Áustria e a Itália, com a galeria transversal, mostra um túnel de serviço e alguns detalhes pode ser vista na Figura 4.16.

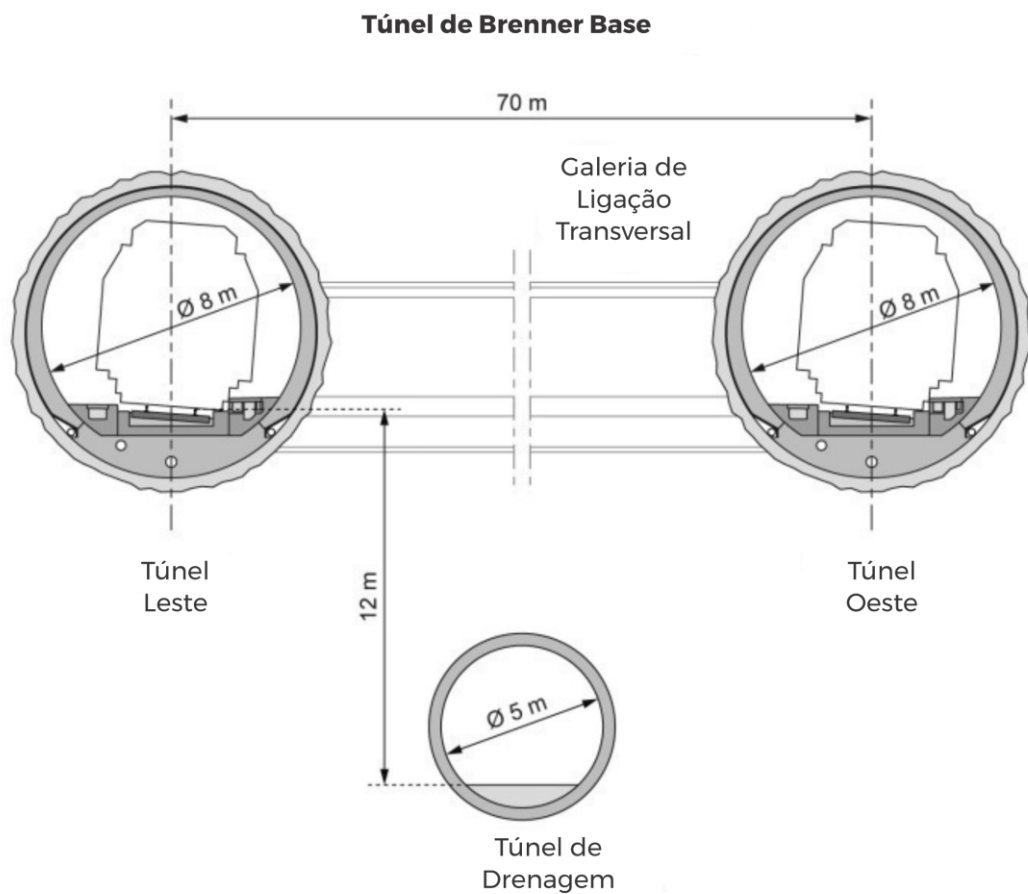


Figura 4.16 - Corte transversal do Túnel de Brenner Base (adaptado de BERGMEISTER, 2012)

Segundo Song et. al (2016), nas regras do código chinês de rotas de emergência em túneis, devem ser previstas passagens transversais entre dois túneis paralelos para garantir a segurança dos usuários, usualmente construindo-se as galerias após a execução dos túneis principais. Também baseado nos códigos da China, Zhang et. al (2019) reiteram a obrigatoriedade das galerias em túneis gêmeos e detalha alguns limites. Nesses moldes, a distância entre galerias não deve ultrapassar 500 metros para túneis ferroviários ou 600 metros para linhas de metrô. Para o caso de túneis rodoviários, a exigência é de galerias transversais para passagem de pedestres a cada 500 metros e galerias com passagem para automóveis a cada 1000 metros do túnel principal. Neste mesmo estudo, também é analisada a importância de se avaliar as vibrações nestas galerias, especialmente em regiões de sismos, visto que as seções transversais, o comprimento e a rigidez das galerias são pequenos em relação às do túnel.

Um outro ponto importante para o bom desempenho de túneis gêmeos com galerias transversais é apontado por Wang et. al (2019), e refere-se à distribuição e qualidade do ar ao longo dos túneis. Como em alguns casos um túnel possui maior fluxo de ventilação que outro, é importante que haja um sistema capaz de realizar trocas de ar entre eles, equilibrando o volume total de ar na ventilação, também garantindo uma melhor qualidade do ar no interior do túnel.

Se para a modelagem de túneis gêmeos é ideal a utilização de modelos numéricos tridimensionais, para túneis com galerias transversais é praticamente uma obrigatoriedade, visto que as soluções analíticas existentes não contemplam este tipo de não linearidade geométrica. Também é recomendável que o modelo seja detalhado dadas a complexidade deste problema, conforme visto em exemplos de regras ou recomendações de alguns países um túnel gêmeo com galerias transversais tem alguns quilômetros de extensão. A exploração e monitoramento do maciço aliadas às modelagens numéricas são um ótimo meio de se fazer aproximações bastante realistas e precisas sobre o túnel que está sendo projetado, prevendo possíveis complicações e otimizando o processo de construção do túnel.

Um ponto particularmente crítico a ser analisado na modelagem tridimensional é a junção entre as galerias e os túneis principais, sendo necessário fazer testes de sensibilidade da malha e verificando os campos de tensões nessas regiões para apurar a procedência e a qualidade das soluções oferecidas.

5 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS

No estudo da estrutura de túneis, avalia-se muito a interação entre os elementos principais que a compõem, ou seja, o maciço e o revestimento. Entretanto, além disso é imprescindível para uma boa compreensão do funcionamento de uma estrutura o conhecimento dos modelos reológicos dos materiais presentes em sua composição. Esse estudo reológico, isto é, do comportamento mecânico dos materiais se dá através de equações constitutivas, que tem como parâmetros principais a relação entre as tensões e deformações e a forma como essa relação se dá ao longo do tempo.

Neste capítulo, são apresentados os modelos constitutivos mais comuns e a aplicação desses modelos de materiais para representação do maciço e revestimento nos estudos de caso de túneis realizados neste trabalho.

Partindo do conceito mais simples, temos a teoria da elasticidade, definida por Nader (2015) como a mais conhecida teoria constitutiva para sólidos. Para este caso, uma função linear relaciona as tensões com as deformações do corpo no qual as tensões são aplicadas. Nessa teoria, considera-se que ao aplicar tensões imediatamente aparecem as deformações correspondentes, de forma que se as tensões permanecem aplicadas ao longo do tempo, as deformações também se manterão de forma proporcional e caso as tensões sejam retiradas o corpo retorna ao estado original, ou seja as deformações neste caso são reversíveis.

Na teoria da plasticidade, por sua vez, a partir de um certo limite de tensões aplicadas, parte do corpo passa a apresentar deformações irreversíveis. Neste caso, para um material elastoplástico perfeito, o corpo se divide em duas partes. Esta teoria se divide em duas equações constitutivas, uma para o meio elástico e outra para o elastoplástico.

Dentre os principais modelos constitutivos ainda há os viscosos, que envolvem comportamentos diferidos no tempo, isto é, as tensões podem variar com o tempo e há ocorrência de deformações não-imediatas. Conforme Jensen (2019), materiais reais se comportam como combinações destes três materiais ideais, dando origem aos chamados modelos conjugados. Esses modelos podem ser viscoelásticos, quando a tensão for constante e as deformações se desenvolverem ao longo do tempo, ou viscoplásticos, quando aparecem também deformações residuais.

Neste trabalho, os modelos constitutivos adotados para representar o comportamento do maciço foram o elástico e o plástico. Os revestimentos, quando aplicados, foram representados com o modelo elástico.

Um conceito importante a ser abordado em problemas geotécnicos quanto ao modelo plástico é o de critérios de plasticidade. A zona de transição entre os regimes elástico e plástico é definida por uma função de escoamento, que define superfícies geométricas no espaço de tensões. Quando o estado de tensões está incluído em uma dessas superfícies, ocorre o escoamento e plastificação. Conforme abordado por Silva (2008), as superfícies de escoamento mais comumente empregadas são as de Tresca, Von Mises, Mohr-Coulomb e Drucker-Prager, que são representadas na Figura 5.1. As superfícies de Tresca e Von Mises são cilíndricas ou prismáticas, paralelas ao eixo hidrostático, sendo seu escoamento independente da componente hidrostática do estado de tensão. Para o caso de escoamentos dependentes da componente hidrostática, representa-se as superfícies sob a forma cônica ou piramidal, como apresentado para as superfícies de Mohr-Coulomb e Drucker-Prager. As duas últimas constituem equações mais generalistas, porém caso o ângulo de atrito do material seja nulo, estas ficam reduzidas às superfícies de Tresca e Von Mises, respectivamente.

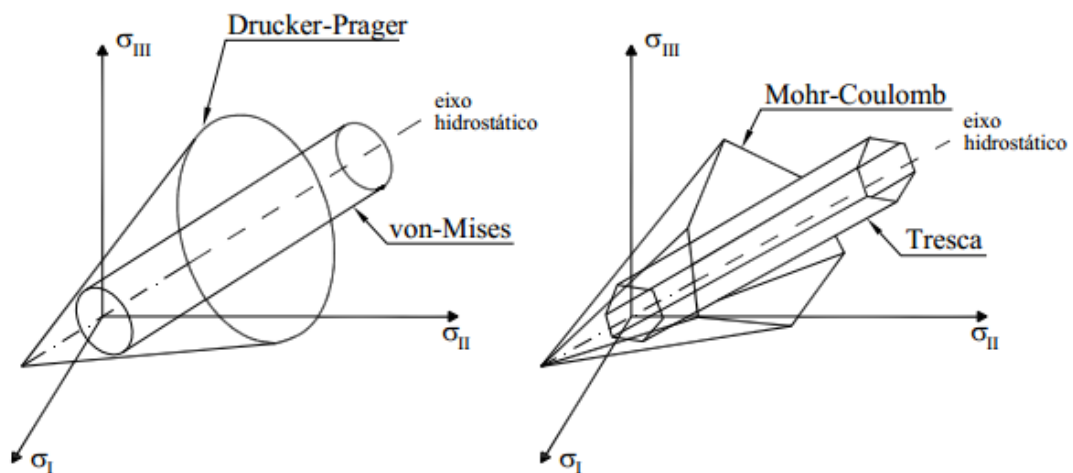


Figura 5.1 - Superfícies de plasticidade (SILVA, 2008, p. 30)

Bernaude (1991), apresenta as superfícies em função do tensor desviador e dos parâmetros do material, conforme resumido no Quadro 5.1, citado por Quevedo (2017), onde os critérios de

plasticidade são representados pelo tensor de tensões $\underline{\underline{\sigma}}$ e pelo parâmetro adimensional de endurecimento isotrópico α , sob a forma $F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha)$.

CRITÉRIO	SUPERFÍCIE
von-Mises	$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha) = \sqrt{\frac{3}{2}} \ \underline{\underline{\sigma}}^D\ - \sigma_s$
Tresca	$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha) = \sqrt{2} \cos(\theta) \ \underline{\underline{\sigma}}^D\ - \sigma_s$
Mohr-Coulomb	$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha) = \frac{k-1}{3} \text{tr}(\underline{\underline{\sigma}}) + \frac{\sqrt{3}(k+1)\cos(\theta) - (k-1)\text{sen}(\theta)}{\sqrt{6}} \ \underline{\underline{\sigma}}^D\ - S(\alpha)$
Drucker-Prager	$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha) = \frac{k-1}{3} \text{tr}(\underline{\underline{\sigma}}) + \frac{k_1}{\sqrt{6}} \ \underline{\underline{\sigma}}^D\ - S(\alpha)$
<p>Sendo:</p> <p>$C(\alpha)$ - coesão do material</p> <p>$\sigma_s = 2C(\alpha)$ - tensão de escoamento para Von-Mises e Tresca</p> <p>ϕ - ângulo de atrito interno</p> <p>$S(\alpha) = 2C(\alpha)\sqrt{k}$ - tensão de escoamento para Mohr-Coulomb e Drucker-Prager</p> <p>$k = \frac{1 + \text{sen}(\phi)}{1 - \text{sen}(\phi)}$ - coeficiente de empuxo</p> <p>$k_1 = \begin{cases} 2k + 1 & \text{- cône inscrito na pirâmide de Mohr-Coulomb} \\ k + 2 & \text{- cône circunscrito na pirâmide de Mohr-Coulomb} \end{cases}$</p> <p>$\theta = \frac{1}{3} \arcsen\left(-3\sqrt{6} \det \underline{\underline{\sigma}}^D \ \underline{\underline{\sigma}}^D\ ^{-3}\right)$; $\theta \in \left[-\frac{\pi}{6}, +\frac{\pi}{6}\right]$ - Ângulo de Lode</p> <p>$\sigma_m = \frac{1}{3} \text{tr}(\underline{\underline{\sigma}})$ - tensão média</p> <p>$\underline{\underline{\sigma}}^D = \underline{\underline{\sigma}} - \sigma_m \underline{\underline{1}}$ - tensor desviador</p> <p>$\ \underline{\underline{\sigma}}^D\ = \sqrt{\sigma_{ij}^D \sigma_{ij}^D}$ - norma do tensor desviador</p>	

Quadro 5.1 - Superfícies de plasticidade (BERNAUD, 1991, citado por QUEVEDO, 2017, p. 69)

Em algumas situações, quando apenas os parâmetros de um desses critérios é conhecido, mas o modelo de cálculo disponível é outro, é possível estabelecer uma relação de aproximação entre os critérios de plasticidade, válida em deformações planas. Jensen (2019) estabelece duas dessas relações, uma entre os critérios de Von Mises e Tresca e outra entre os de Mohr-Coulomb e Drucker-Prager, igualando as superfícies e isolando a coesão, resultando nas relações apresentadas nas Equações 5.1 e 5.2.

$$C_{tr} = \frac{\sqrt{3}}{2 \cos(\theta)} C_{vm} \quad (5.1)$$

$$C_{dp} = \frac{(\sqrt{3}(k+1)\cos(\theta) - (k-1)\sin(\theta))}{k+2} C_{mc} \quad (5.2)$$

No capítulo seguinte, é feita uma abordagem sobre a modelagem numérica dos modelos estudados, bem como a aplicação desses conceitos de comportamentos dos materiais e critérios de plasticidade nos casos estudados.

6 MODELAGEM NUMÉRICA

Como visto no Capítulo 4, as análises numéricas de túneis utilizando-se o Método dos Elementos Finitos podem ser uma boa aproximação do comportamento real dessas estruturas, visto que pode levar em conta por exemplo variações nas propriedades mecânicas do maciço, não linearidades dos materiais, complexidades na geometria das seções e, principalmente, simular as etapas de escavação e colocação do revestimento tal qual ocorre na realidade. Neste capítulo, buscou-se detalhar todo o processo de desenvolvimento dos modelos numéricos, suas particularidades e limitações.

Dadas as inúmeras possibilidades, o nível de detalhamento e sofisticação do modelo escolhido está muito ligado aos objetivos do estudo e aos recursos computacionais de que se dispõe. Se o túnel estudado for de seção circular, considerando-se um maciço homogêneo isotrópico e um campo de tensões geostático, uma solução em axissimetria pode ser bastante adequada, visto que consegue simular as etapas construtivas a um baixo custo computacional. Entretanto, se o estudo realizado não for passível de simplificações, as análises devem ser obrigatoriamente tridimensionais, como é o caso dos túneis gêmeos com galerias transversais que são objetos deste estudo, o que implica diretamente em uma maior complexidade das malhas construídas e, por conseguinte, em maior tempo de processamento e necessidades de mais recursos computacionais.

Como mencionado, um ponto fundamental para a simulação numérica de um túnel é a representação dos processos de escavação da cavidade e de colocação do revestimento. Uma forma de representar esses processos é através do método de ativação e desativação de elementos, isto é, altera-se a rigidez dos elementos de solo na frente de escavação para um valor muito pequeno e na sequência coloca-se as características do revestimento nos elementos apropriados. Essas etapas são denominadas passos de escavação. Sendo a colocação do revestimento feita na sequência do passo de escavação, surge entre a frente de escavação e o último revestimento aplicado uma região onde o túnel já está escavado mas não revestido, denominada distância não suportada (d_0).

Para este estudo, baseou-se o processo de escavação e colocação do revestimento no proposto pelo programa GEOMEQ91, conforme ilustrado na Figura 6.1. Em um primeiro momento, são escavados o equivalente de três passos de escavação (comprimento $3p$). No segundo instante, é escavado então mais um passo (p) e aplicado o primeiro revestimento, surgindo a distância não

suportada (d_0), conforme já mencionado. Nas etapas seguintes, a cada passo escavado um passo é revestido mantendo-se a distância d_0 . Na última etapa, com todas as escavações já realizadas, são colocados por fim os últimos elementos do revestimento, referentes ao último passo escavado, a distância d_0 e à face da escavação.

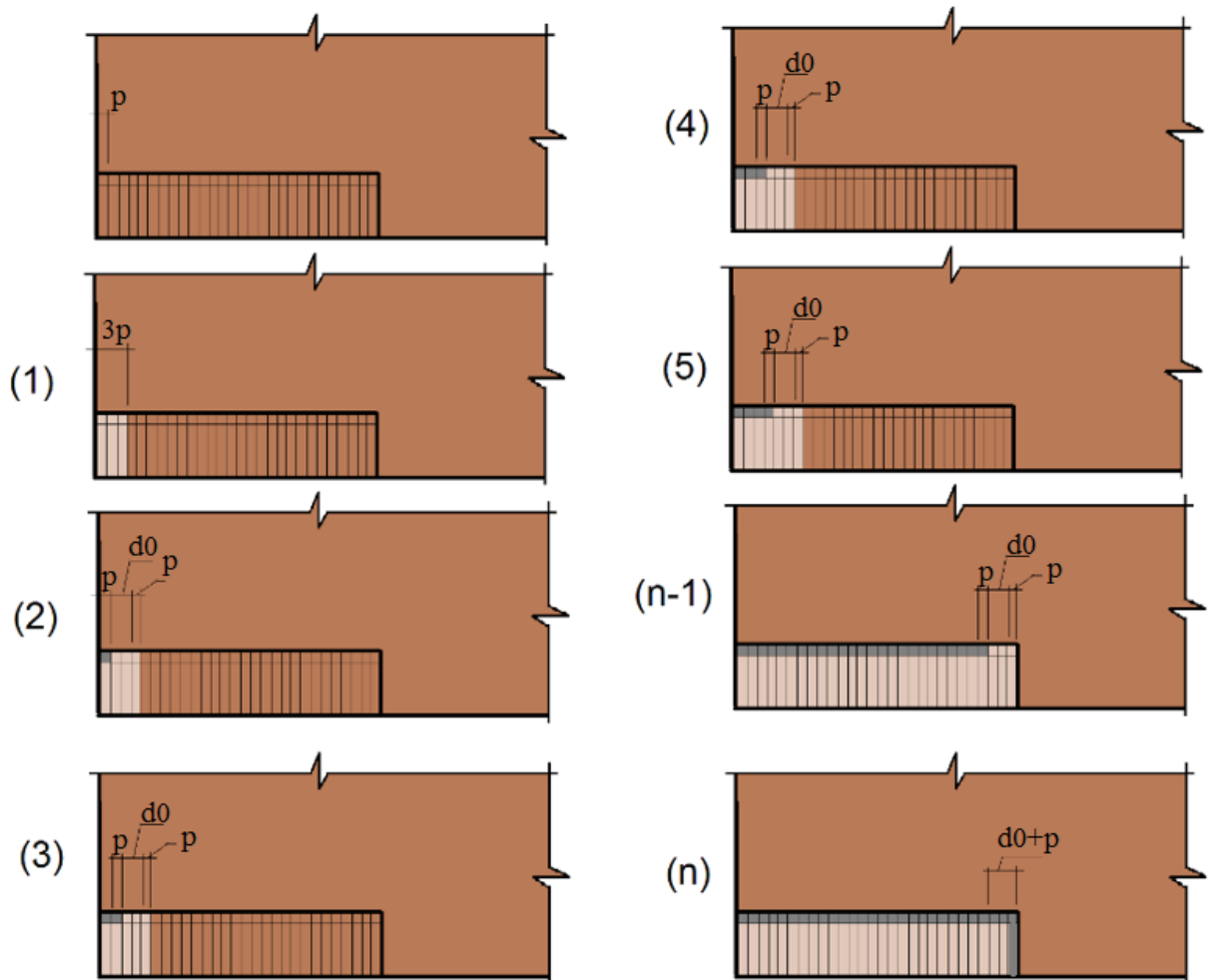


Figura 6.1 - Processo de escavação e colocação de revestimento representado pelo método de ativação e desativação de elementos finitos (QUEVEDO, 2017, p. 62)

Para a construção dos modelos numéricos em elementos finitos deste estudo, utilizou-se o *software* ANSYS, amplamente utilizado no meio acadêmico das Engenharias. O módulo de mecânica estrutural tem como diferencial a linguagem APDL (ANSYS Parametric Design Language), que permite a estruturação de *scripts* para entrada de dados, configuração do modelo, rápida alteração de parâmetros e variáveis, uso de laços de programação (do tipo IF, ELSE, DO, etc), além de uma série de opções de saída de dados, desde uma listagem em arquivo

de textos dos resultados a uma grande variedade de análises no módulo de pós-processamento. Quevedo (2017) destaca também as comunidades de discussão, licença de uso do laboratório e acesso ao suporte do ANSYS como algumas das vantagens do *software*. Outro fator importante a se considerar é a solução de análises não lineares, necessária para a simulação dos passos de escavação conforme mencionado, efetuando diversas iterações sobre o modelo até atingir a solução do sistema.

Outra questão bastante importante foi a escolha dos tipos de elementos utilizados nos modelos. O ANSYS possui uma grande gama de elementos finitos, com muitas opções de configurações destinadas aos mais variados usos. Para os estudos em axissimetria, baseados no GEOMECH91, adotou-se o PLANE182 na forma de quadrilátero, elementos que possuem dois graus de liberdade por nó, isto é translação em duas direções, totalizando oito graus de liberdade por elemento, conforme ilustrado na Figura 6.2.

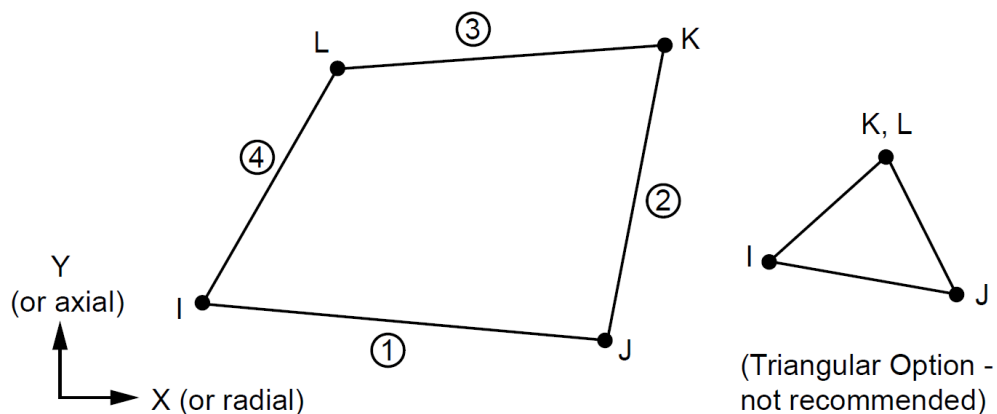


Figura 6.2 - Elemento finito PLANE182 (ANSYS, 2011, p. 845)

Para os modelos tridimensionais, utilizou-se os elementos SOLID185 e SOLID186, ambos com três graus de liberdade por nó, isto é, translações nas três direções. Enquanto o SOLID185 possui oito nós e funções de interpolação lineares, o SOLID186 possui ainda nós intermediários, totalizando 20 nós por elemento, utilizando funções de interpolação quadráticas. Como os modelos tridimensionais envolvem malhas grandes, priorizou-se o uso do SOLID185 visando reduzir o tempo de processamento, utilizando-se o SOLID186 apenas em regiões com maiores variações no campo de deformações. A forma mais utilizada desses elementos foi a

hexaédrica, com exceção de algumas regiões onde foram utilizados elementos tetraédricos. Na Figura 6.3, apresenta-se o elemento SOLID 185 à esquerda e o elemento SOLID186 à direita.

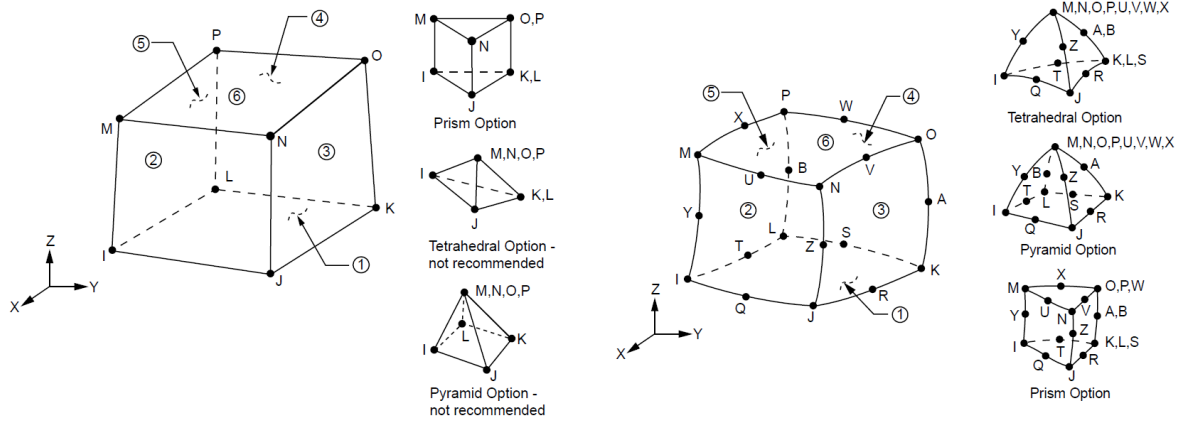


Figura 6.3 - Elementos SOLID185 e SOLID186 (ANSYS, 2011, p. 984 e p.1000)

Para os modelos constitutivos dos materiais, considerou-se o maciço em elasticidade, definido no ANSYS pelo módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, e em plasticidade segundo o critério de Von Mises, adotando-se então a tensão de escoamento como duas vezes a coesão. Para os elementos de revestimento foi considerado apenas o caso em elasticidade.

Como mencionado, os primeiros modelos desenvolvidos em axissimetria foram baseados no programa GEOMECC91, um código numérico em elementos finitos desenvolvido por Bernaud (1991). Com este programa, é possível fazer análises bidimensionais considerando o processo de escavação e colocação do revestimento, considerando modelos de maciço em elasticidade, plasticidade ou viscoplasticidade e revestimento elástico. Por isso, para os modelos em axissimetria este programa foi utilizado para verificar a qualidade dos resultados obtidos com os modelos implementados no ANSYS, extrapolando-se em seguida esta malha para os modelos tridimensionais.

O modelo em axissimetria baseado no modelo do GEOMECC91, resultante de uma série de testes de sensibilidade de malhas, é o ilustrado na Figura 6.4, com um trecho escavado de 39 passos e um trecho não escavado de 51 passos, sendo que foi aproveitada a simetria do problema em relação ao eixo Y. Na ilustração estão indicadas as quantidades de elementos em cada

direção, por trechos, sendo neste caso empregado o elemento PLANE182, conforme já mencionado. Nota-se que o refinamento da malha é maior na região do túnel e vai diminuindo de forma gradual conforme se afasta em direção às bordas do modelo. O comprimento do trecho escavado, adotado igual ao do GEOMECC91 garante que se desenvolva a convergência no equilíbrio sem ser afetado pelos efeitos de bordas (face de escavação e face de início de escavação), conforme apontado por Quevedo (2017).

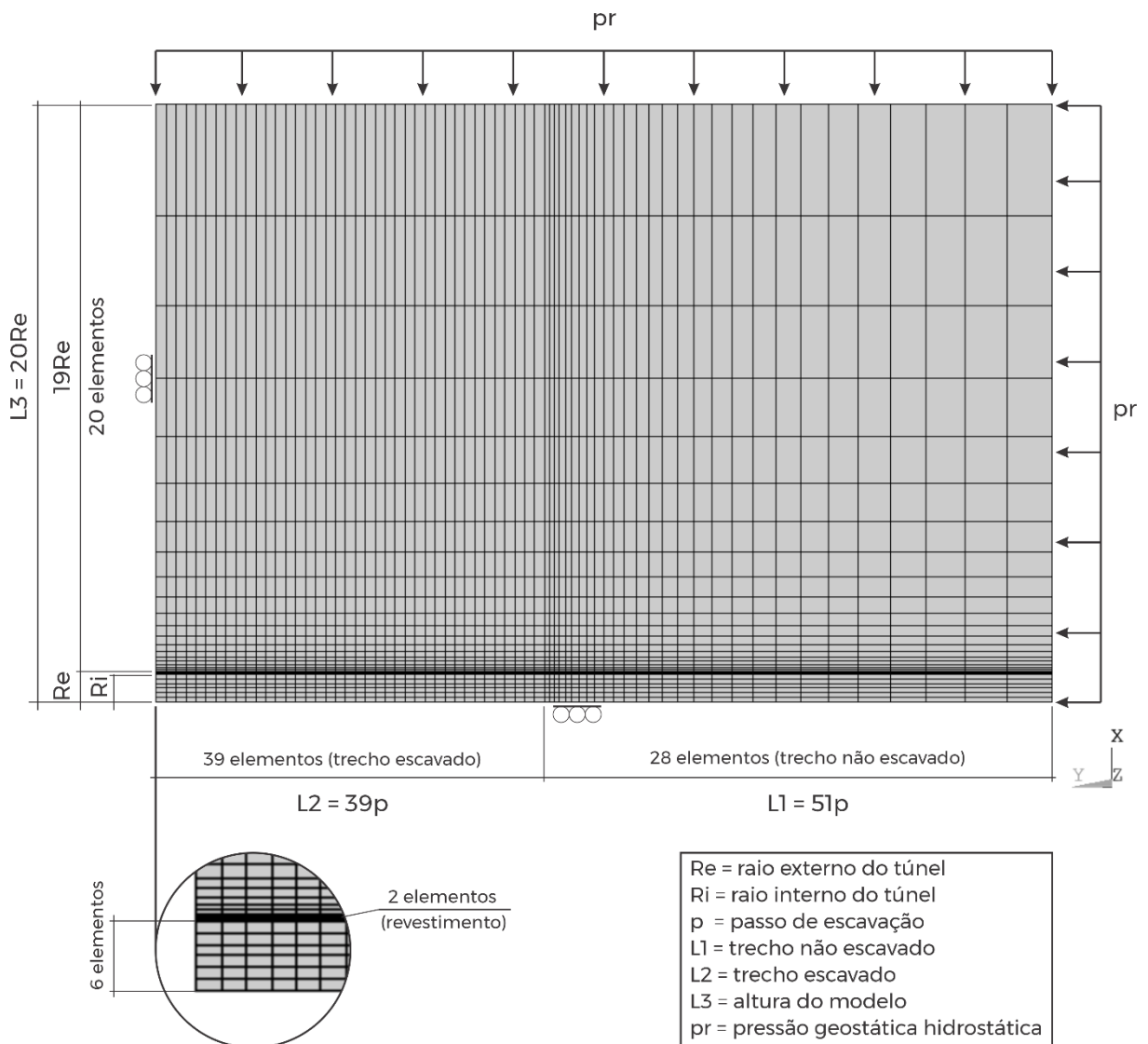


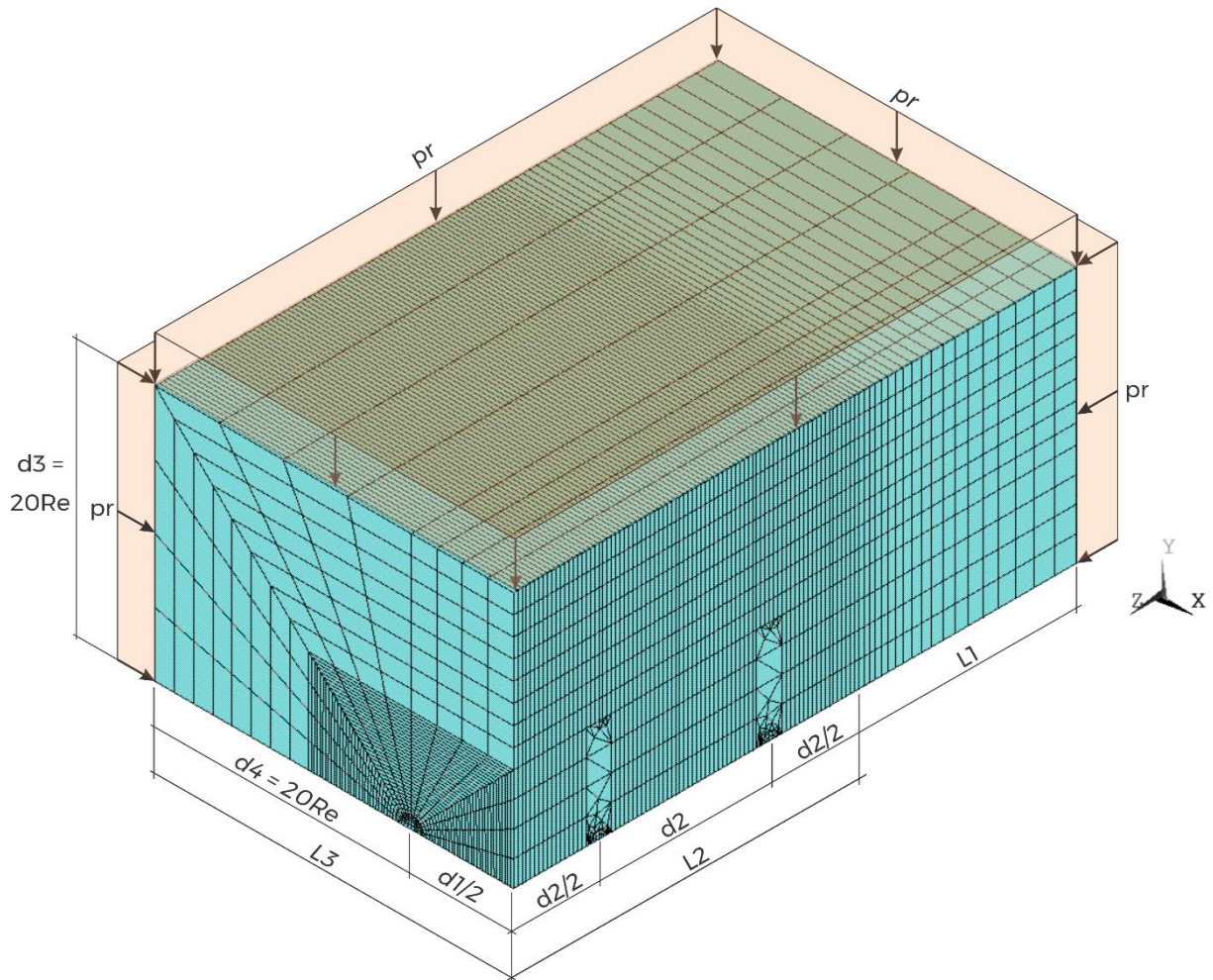
Figura 6.4 - Modelo numérico bidimensional axissimétrico

Os carregamentos aplicados no modelo, representados na Figura 6.4 pela pressão geostática hidrostática (p_r) é aplicada a todos os elementos de solo da malha, como a condição de tensões iniciais $\sigma_0 = -p_r \underline{1}$, representando o estado natural não perturbado do maciço antes do início do processo de escavação e colocação do revestimento, sendo o valor da pressão igual à altura

do maciço sobre o túnel multiplicada pelo peso específico do material que o compõe. Esta condição inicial de tensões também foi aplicada aos modelos tridimensionais.

Para os modelos tridimensionais, também utilizou-se de eixos de simetria para diminuir a quantidade de elementos por análise, melhorando o tempo de processamento. Na Figura 6.5, apresenta-se a malha proposta para o modelo tridimensional. Este modelo foi utilizado para o estudo de túneis gêmeos com galerias transversais e também para o estudo de túneis gêmeos sem ligações internas, para tal foi criado um controle nos dados de entrada do *script*, onde é selecionado o tipo de análise, se serão incluídas as galerias ou não.

Definida a geometria, foi aplicada uma malha com uma determinada quantidade de elementos, e a partir desta malha inicial, foi realizada uma série de testes de sensibilidade de malhas, acrescentando ou diminuindo elementos em cada região e comparando-se os resultados obtidos, até que cada região estivesse com uma quantidade otimizada de elementos. As malhas apresentadas neste capítulo são as versões já otimizadas, com as quantidades de elementos adequadas para cada região do modelo.



Re = raio externo do túnel
 d1 = distância entre eixos dos túneis principais
 d2 = distância entre eixos das galerias
 d3 = distância do eixo do túnel principal à borda superior do modelo
 d4 = distância do eixo do túnel principal à borda lateral do modelo
 L1 = trecho não escavado
 L2 = trecho escavado
 L3 = largura do modelo
 pr = pressão geostática hidrostática

Figura 6.5 - Modelo numérico tridimensional

Para facilitar a visualização das quantidades de elementos neste modelo, organizou-se vistas do mesmo, sendo a vista frontal representada na Figura 6.6, com um detalhe dos elementos na região do túnel principal, do tipo SOLID185, onde é possível ver também os elementos do revestimento. Seguindo a mesma lógica do modelo axissimétrico, o nível de refinamento da malha vai diminuindo à medida que o modelo se afasta da região do túnel. Nesta vista frontal, nota-se que há primeiramente uma região com maior concentração de elementos, isto se deu para que fosse possível compatibilizar os elementos dessa região com o tamanho do passo de escavação das galerias transversais, portanto os elementos nesta região obedecem a esta

proporção. Nas áreas adjacentes, os elementos ficam gradualmente maiores e mais afastados em direção às bordas.

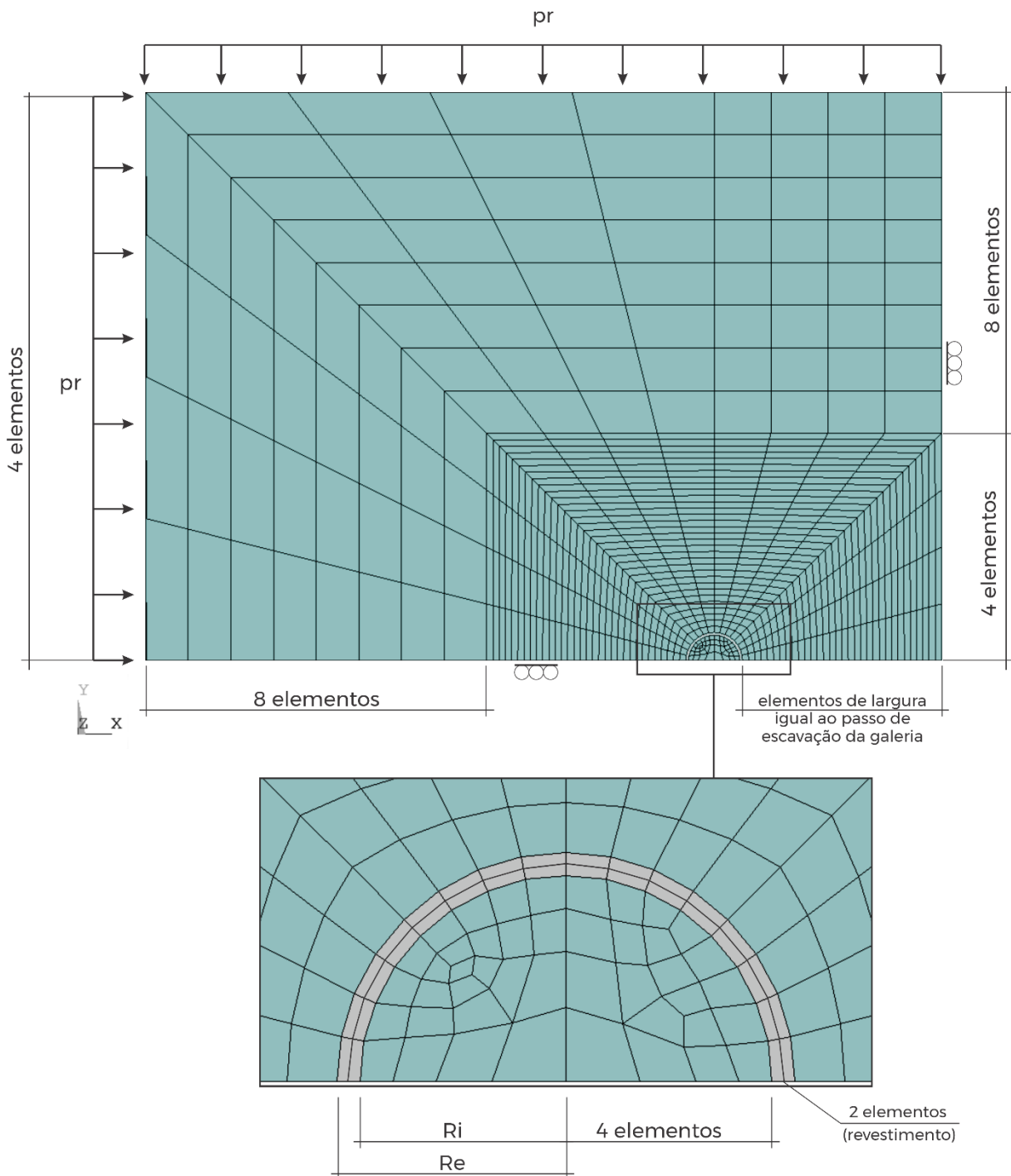


Figura 6.6 - Vista frontal e detalhamento do modelo tridimensional

De maneira semelhante, organizou-se a vista lateral presente na Figura 6.7, onde há também um detalhe de visualização da região das galerias transversais. De modo a compatibilizar os passos de escavação e os elementos dos túneis principais com os das galerias, delimitou-se uma

região de encontro dessas duas malhas no entorno e acima das galerias, como pode-se notar, onde adotou-se uma malha de elementos tetraédricos de elementos SOLID186 para fazer essa ligação.

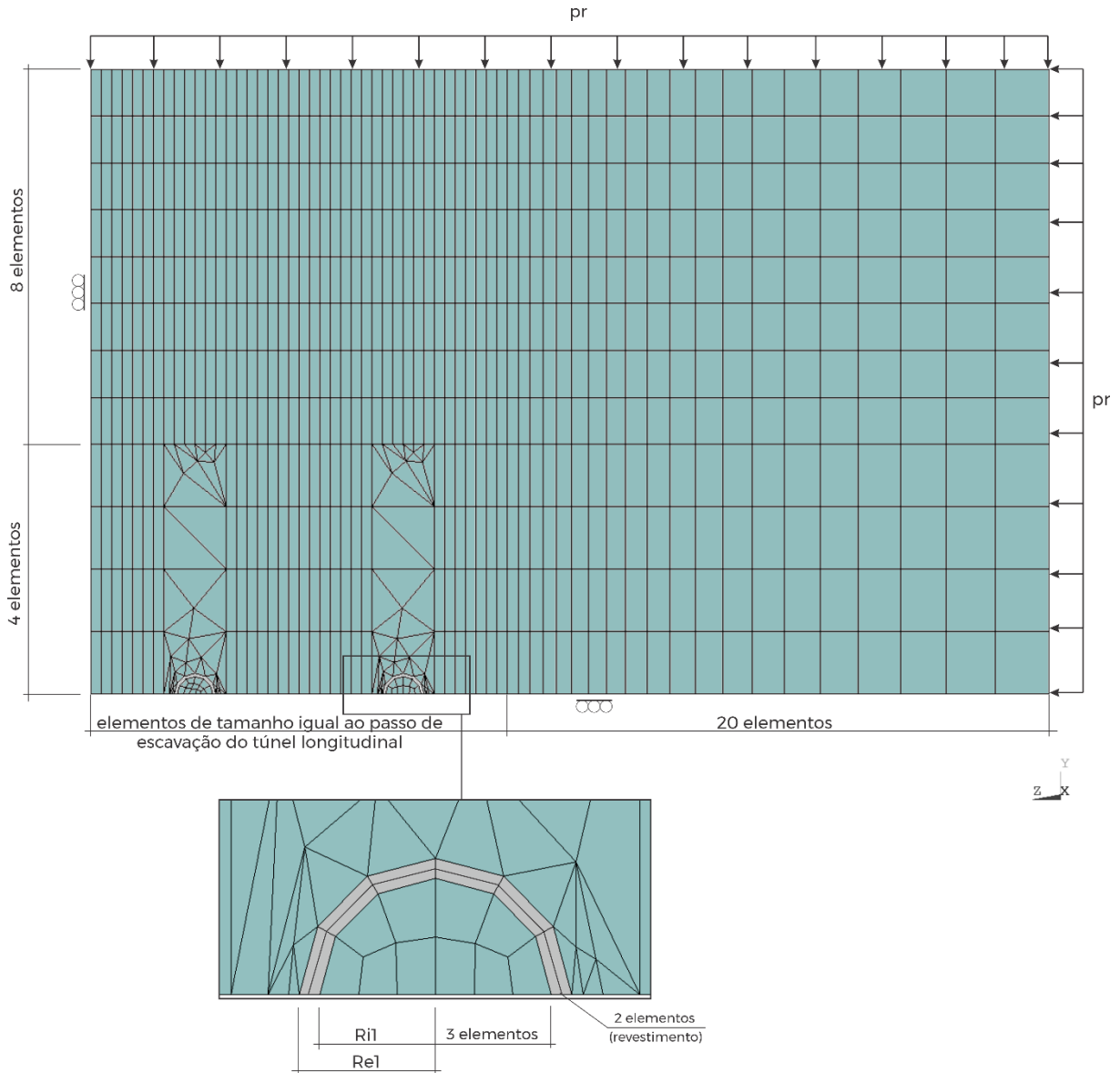


Figura 6.7 - Vista lateral e detalhamento do modelo tridimensional

Cabe destacar também a malha dos elementos de revestimento, apresentada na Figura 6.8. Na direção do túnel longitudinal, os elementos possuem dimensão igual ao passo de escavação do túnel principal, bem como na direção das galerias transversais, os elementos possuem a dimensão dos passos de escavação das galerias. Na região onde ocorre a união dos túneis longitudinais com as galerias transversais, observa-se uma malha de elementos tetraédricos SOLID186, utilizados para a compatibilização das malhas das duas regiões.

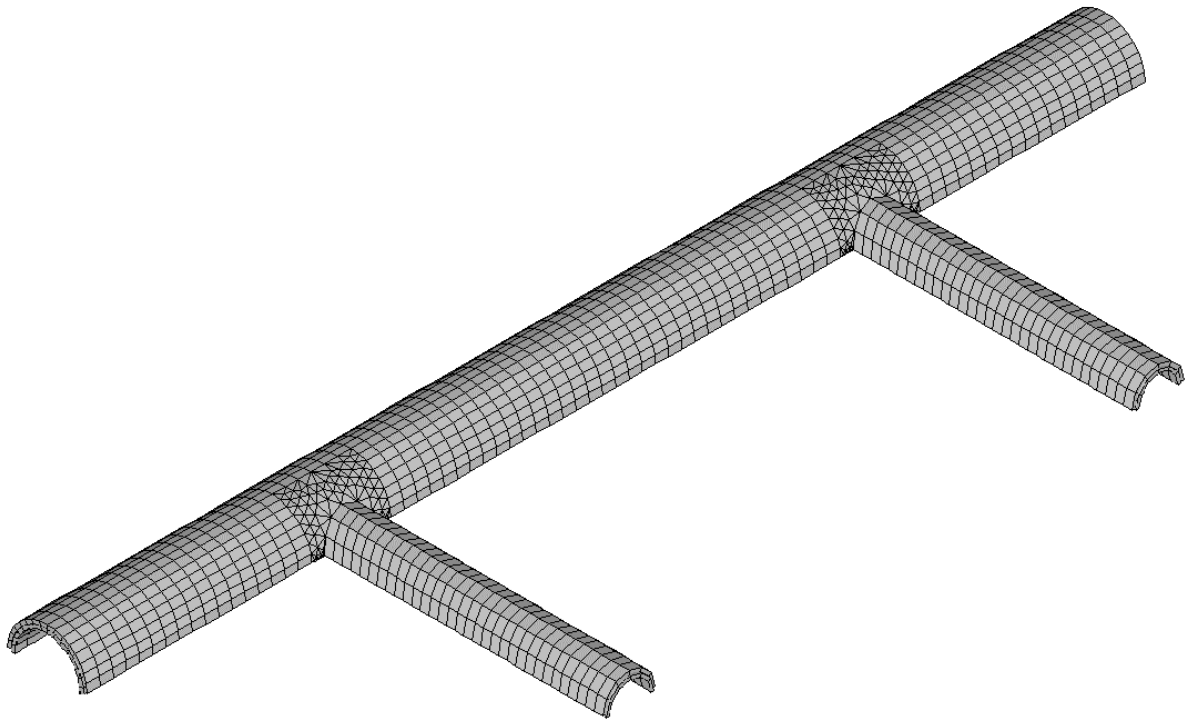


Figura 6.8 - Malha dos elementos de revestimento

Vale destacar que no ANSYS, a ativação e desativação de elementos não ocorre pela substituição de material do elemento, mas sim pela mudança na sua rigidez. Por isso, no início da análise os elementos ficam duplicados na região do túnel, estando os elementos de solo ligados e os elementos de revestimento desligados. Conforme os processos de escavação e revestimento ocorrem, os valores de sua rigidez são alterados. Para a sequência de escavação do modelo completo, adotou-se que o túnel principal é escavado até o fim da região da primeira galeria, então escava-se a primeira galeria. Em seguida, segue a escavação do túnel principal e, da mesma forma, ao ultrapassar a galeria é parada a escavação do túnel principal para a escavação da segunda galeria. Por fim, conclui-se a escavação do túnel principal.

Algumas outras condições foram supostas para a delimitação dos modelos analisados neste trabalho. Foi considerado, por exemplo, uma velocidade constante para o avanço da escavação, algo que na prática, mesmo com o uso de tuneladora, não ocorre se considerar por exemplo um feriado em que os operadores não trabalham ou que se encontre algum obstáculo no maciço em certo ponto da escavação.

Foi adotado um maciço composto inteiramente por um mesmo material, algo que também se dá de forma um pouco diferente na realidade, se formos considerar a estratificação e a heterogeneidade dos maciços.

Concluídas a caracterização das malhas e feitas as considerações sobre os modelos utilizados no estudo, no capítulo seguinte são apresentadas as análises numéricas paramétricas obtidas executando-se estes modelos, variando-se alguns parâmetros e observando a influência dessas alterações sobre respostas da estrutura, bem como seus efeitos sobre a convergência do túnel.

7 ANÁLISES NUMÉRICAS E ESTUDOS PARAMÉTRICOS

As etapas iniciais das análises numéricas foram desenvolvidas de forma a validar os *scripts* construídos para o ANSYS. Em cada etapa de validação, foi sendo acrescentado um detalhe em relação à análise anterior, até chegar nas análises com o modelo completo tridimensional. Essa evolução foi fundamental para garantir o funcionamento dos modelos, visto que se os resultados em axissimetria e elasticidade não estivessem de acordo, por exemplo, os modelos com mais complexidade e que levam maior tempo para rodar também não funcionariam.

O primeiro passo foi a validação dos túneis com o maciço em elasticidade, sem revestimento. Para esta verificação, foram utilizados os parâmetros conforme descrito na Tabela 7.1, efetuando-se os cálculos analíticos com a formulação apresentada e rodando o mesmo túnel no GEOMECC91 e no modelo axissimétrico no ANSYS.

Tabela 7.1 – parâmetros para validação em elasticidade sem revestimento

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	VALORES
TÚNEL			
Raio da seção	Re	cm	100
Passo de escavação	p	adm	1/3Re
MACIÇO			
Pressão geostática hidrostática	pr	MPa	4
Módulo de elasticidade	Es	MPa	1000
Coefficiente de Poisson	vs	adm	0,498

Na Figura 7.1, observa-se o resultado dessas análises, podendo-se comparar os resultados obtidos nos três casos. Nota-se que os resultados são bastante aproximados entre o ANSYS e o GEOMC91, e ambos atingem o mesmo patamar de convergência no equilíbrio calculado pela solução analítica. Sendo os resultados obtidos nesta etapa considerados satisfatórios, executou-se uma nova etapa de verificação.

O raio foi escolhido igual a 1 para tornar o problema adimensional, assim para calcular um deslocamento no túnel real basta multiplicar o valor do deslocamento do túnel de raio igual a 1 pelo raio do túnel real.

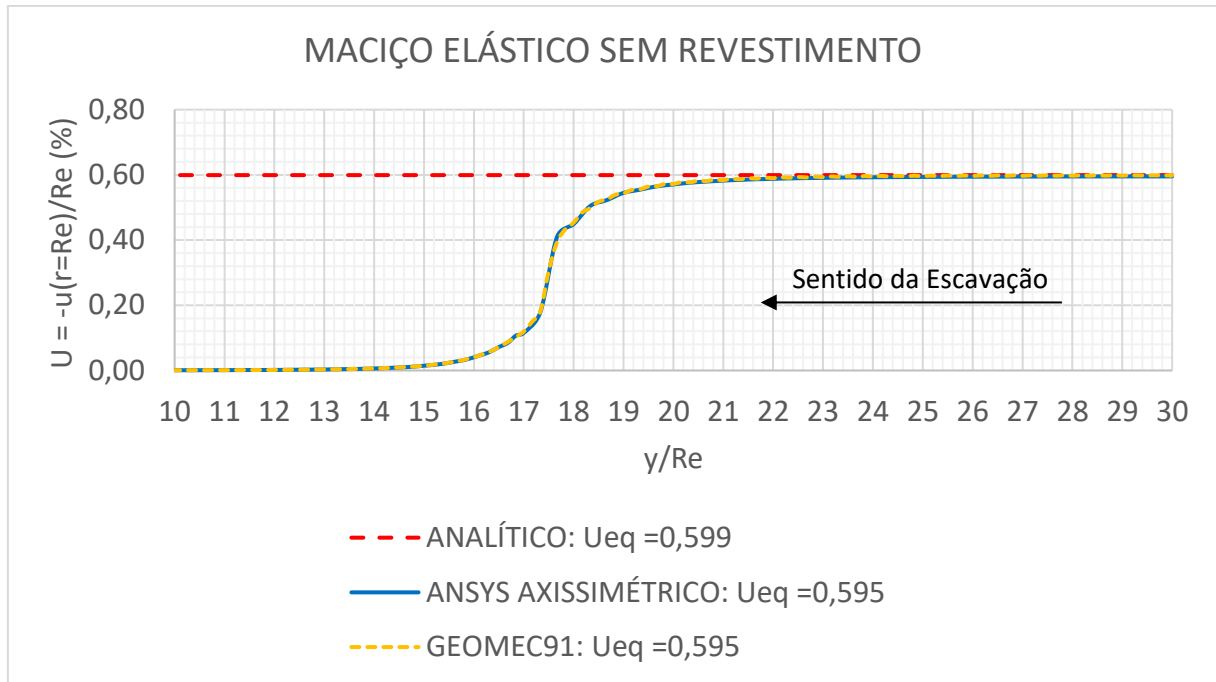


Figura 7.1 - Comparativo Analítico, GEOMECC91 e ANSYS: Maciço elástico sem revestimento

Na segunda verificação, também com o maciço em elasticidade, acrescentou-se então um revestimento, também elástico. Neste caso, a comparação ocorreu apenas entre os resultados do ANSYS e o GEOMECC91, visto que a formulação analítica não contempla os casos de túneis revestidos. Os parâmetros desta análise estão presentes na Tabela 7.2, sendo que foram testados três valores para a distância não revestida.

Tabela 7.2 – parâmetros para validação em elasticidade com revestimento elástico

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	VALORES		
TÚNEL					
Raio externo da seção	Re	cm	100	-	-
Raio interno da seção	Ri	cm	90	-	-
Dimensão não suportada	d0	adm	0	2/3Re	4/3Re
Passo de escavação	p	adm	1/3Re	-	-
MACIÇO					
Pressão geostática hidrostática	pr	MPa	4	-	-
Módulo de elasticidade	Es	MPa	1000	-	-
Coeficiente de Poisson	vs	adm	0,498	-	-
REVESTIMENTO					
Módulo de elasticidade	Er	MPa	3000	-	-
Coeficiente de Poisson	vr	adm	0,3	-	-
Rigidez do Revestimento	Ks	MPa	360	-	-

Os resultados obtidos desta análise estão contemplados nas Figuras 7.2 a 7.4, onde é possível verificar que os resultados entre as duas curvas de convergência são praticamente idênticas.

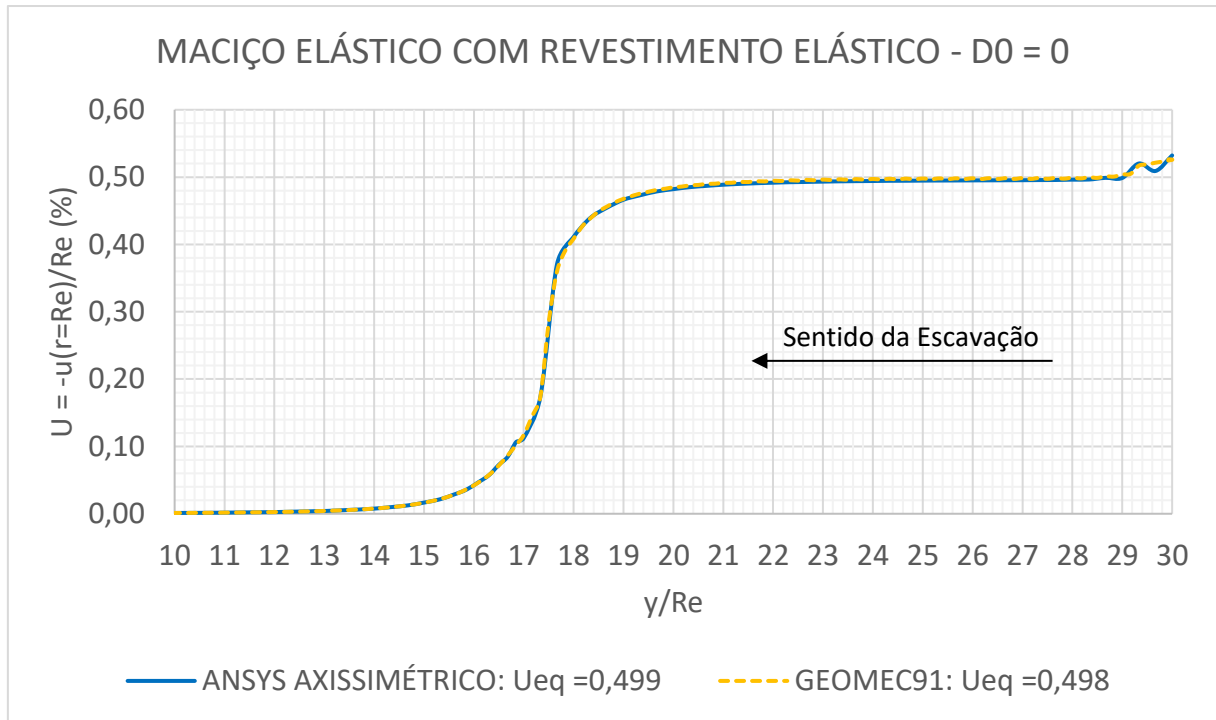


Figura 7.2 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Maciço elástico com revestimento, $d_0 = 0$

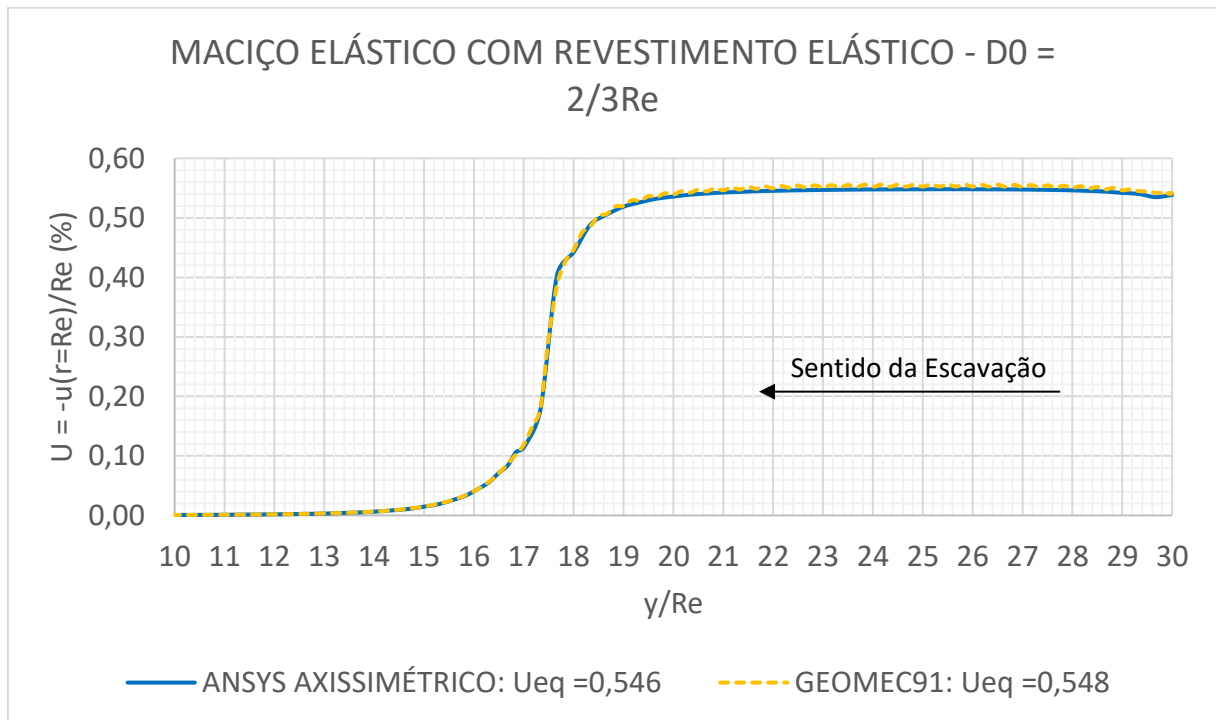


Figura 7.3 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Maciço elástico com revestimento, $d_0 = 2/3Re$

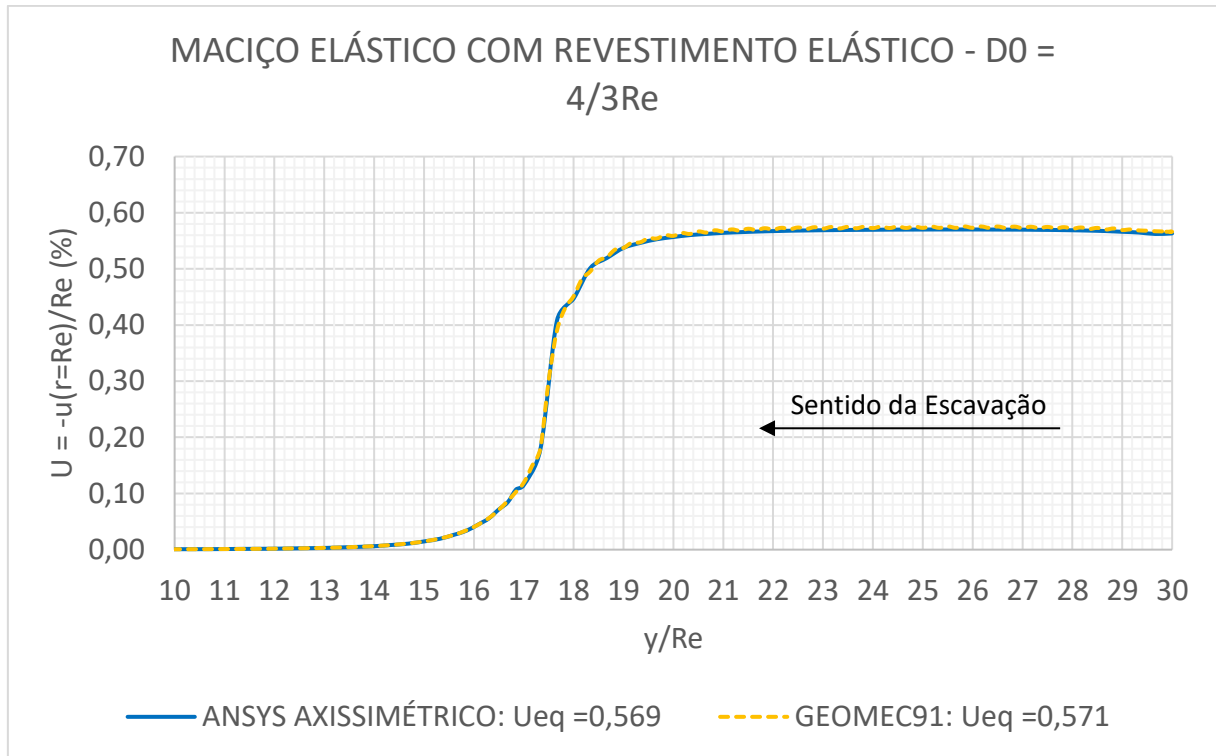


Figura 7.4 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Maciço elástico com revestimento, $d_0 = 4/3Re$

O passo seguinte foi a validação do modelo utilizando o modelo constitutivo em plasticidade para o maciço, em um primeiro momento analisando-se o túnel sem revestimento para novamente se estabelecer a comparação com o cálculo analítico. Os parâmetros adotados para esta análise foram os presentes na Tabela 7.3. Nota-se que foi estabelecida uma relação para a coesão conforme apresentado no Capítulo 5 entre os critérios de plasticidade, visto que no GEOMECC91 utilizou-se o critério de Tresca enquanto no ANSYS adotou-se o critério de Von Mises. A Comparação dos resultados pode ser vista na Figura 7.5.

Tabela 7.3 – parâmetros para validação em plasticidade sem revestimento

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	VALORES
TÚNEL			
Raio da seção	Re	cm	100
Passo de escavação	p	adm	$1/3Re$
MACIÇO			
Pressão geostática hidrostática	pr	MPa	4
Módulo de elasticidade	Es	MPa	1000
Coefficiente de Poisson	vs	adm	0,498
Coesão em plasticidade de Tresca	Ctr	MPa	2,3095
Coesão equivalente de Von Mises	Cvm	MPa	2,0

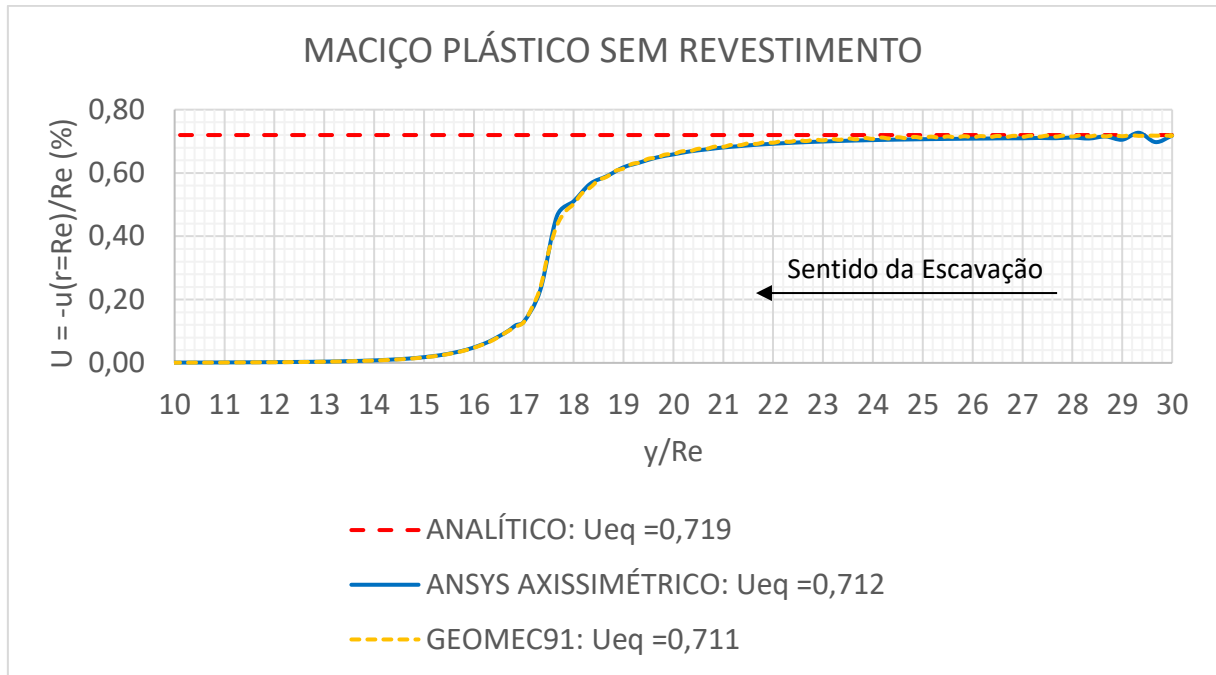


Figura 7.5 - Comparativo Analítico, GEOMECC91 e ANSYS: Maciço plástico sem revestimento

Dada a coerência entre os resultados, acrescentou-se então nas análises seguintes o revestimento elástico, conforme foi realizado anteriormente em elasticidade, variando-se o valor da dimensão não suportada, segundo os parâmetros descritos na Tabela 7.4, sendo os resultados expostos nas Figuras 7.6 a 7.8.

Tabela 7.4 – parâmetros para validação em plasticidade com revestimento elástico

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	VALORES		
TÚNEL					
Raio externo da seção	Re	cm	100	-	-
Raio interno da seção	Ri	cm	90	-	-
Dimensão não suportada	d0	adm	0	2/3Re	4/3Re
Passo de escavação	p	adm	1/3Re	-	-
MACIÇO					
Pressão geostática hidrostática	pr	MPa	4	-	-
Módulo de elasticidade	Es	MPa	1000	-	-
Coefficiente de Poisson	vs	adm	0,498	-	-
Coesão em plasticidade de Tresca	Ctr	MPa	2,3095	-	-
Coesão equivalente de Von Mises	Cvm	MPa	2,0	-	-
REVESTIMENTO					
Módulo de elasticidade	Er	MPa	3000	-	-
Coefficiente de Poisson	vr	adm	0,3	-	-
Rigidez do Revestimento	Ks	MPa	360	-	-

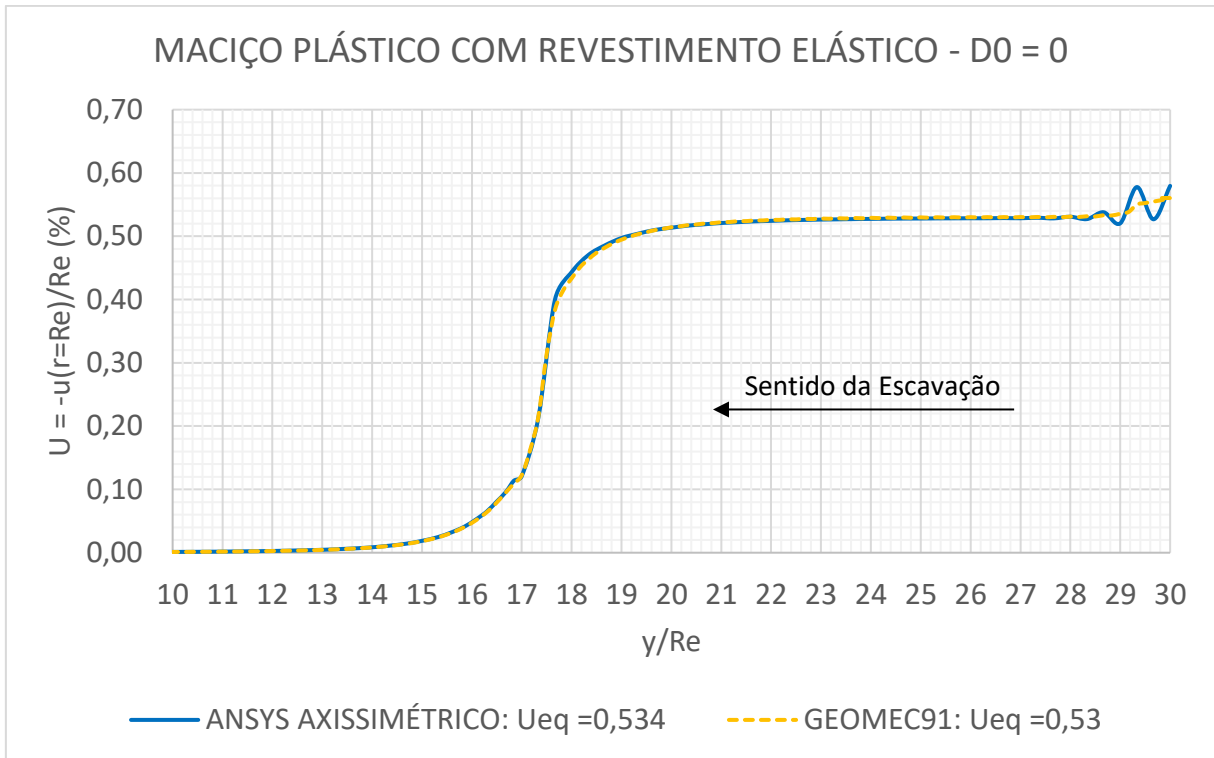


Figura 7.6 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Maciço plástico com revestimento, $d_0 = 0$

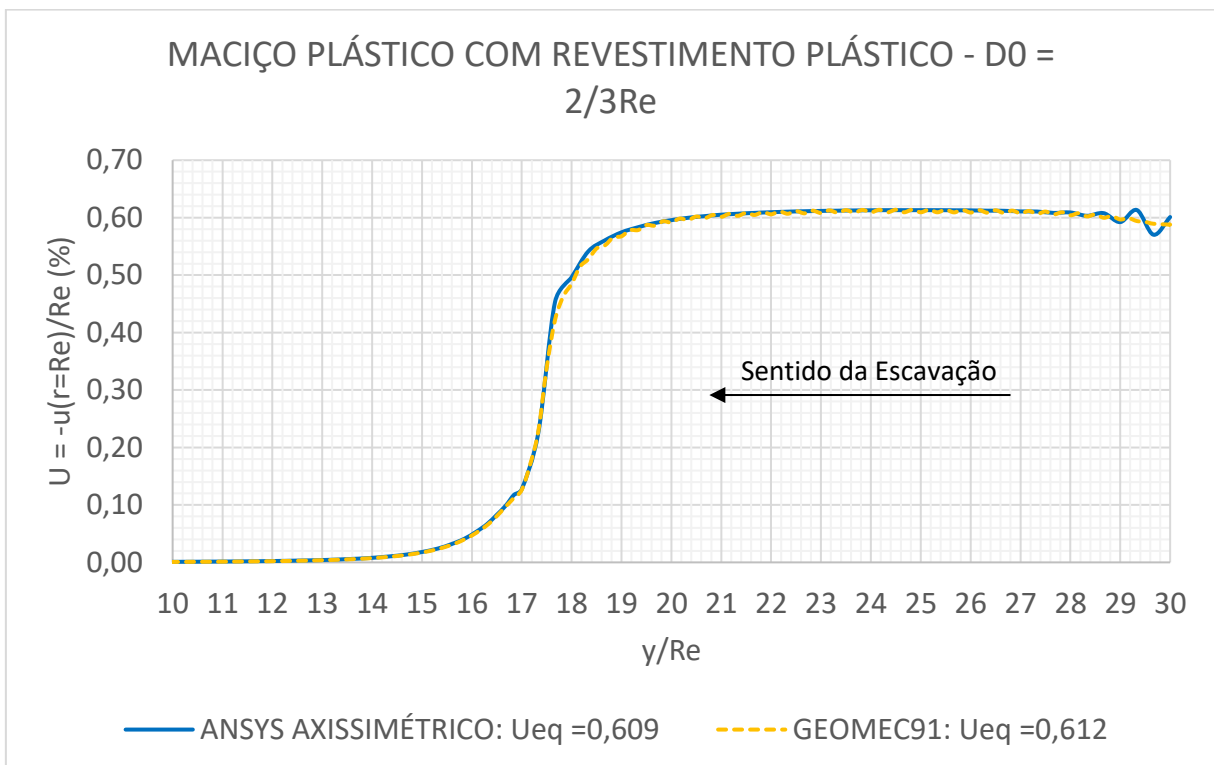


Figura 7.7 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Maciço plástico com revestimento, $d_0 = 2/3Re$

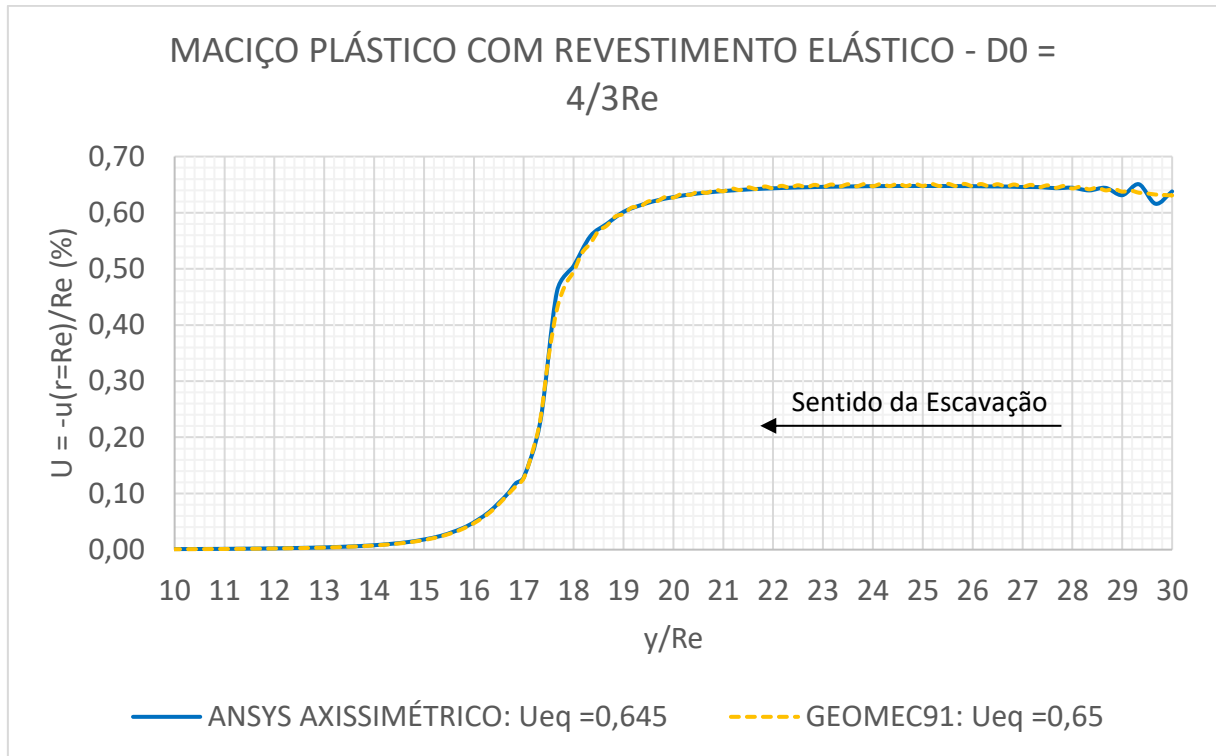


Figura 7.8 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Maciço plástico com revestimento, $d_0 = 4/3Re$

Como é possível notar nas Figuras, em todos os casos testados os resultados obtidos tanto pelo ANSYS quanto pelo GEOMECC91 foram muito próximos, com diferenças muito pequenas em alguns pontos. É possível também notar a presença de efeitos de borda no início das escavações, o que se deve ao fato do passo de escavação inicial ter sido definido como três vezes maior que o passo de escavação do restante do túnel. Validados os modelos bidimensionais em axissimetria, tanto em elasticidade quanto em plasticidade, com ou sem revestimento elástico, iniciou-se os primeiros casos estudados nos modelos tridimensionais.

Iniciando-se os estudos nos modelos tridimensionais, o primeiro passo foi analisar a influência das distâncias entre os túneis gêmeos. Em um primeiro momento, realizou-se testes com o maciço em elasticidade e os túneis sem a aplicação do revestimento, variando-se a distância entre os túneis. Na segunda etapa de análises de túneis gêmeos, manteve-se o maciço em elasticidade e foi ativada a colocação dos revestimentos elásticos. Um resumo dos parâmetros utilizados nas duas etapas de análise está apresentado na Tabela 7.5, estando os respectivos resultados nas Figuras 7.9 e 7.10, onde em cada uma das Figuras é possível comparar o efeito da variação de três valores de afastamento entre os túneis longitudinais paralelos.

Tabela 7.5 - parâmetros para análise em elasticidade do modelo de túneis gêmeos sem revestimento e com revestimento elástico

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	VALORES		
TÚNEIS LONGITUDINAIS					
Raio externo da seção	Re	cm	100	-	-
Raio interno da seção	Ri	cm	90	-	-
Passo de escavação	p	cm	1/3Re	-	-
Distância entre eixos dos túneis	d1	cm	4Re	8Re	16Re
MACIÇO					
Pressão geostática hidrostática	pr	MPa	4	-	-
Módulo de elasticidade	Es	MPa	1000	-	-
Coeficiente de Poisson	vs	adm	0,498	-	-
REVESTIMENTO					
Módulo de elasticidade	Er	MPa	3000	-	-
Coeficiente de Poisson	vr	adm	0,3	-	-
Rigidez do Revestimento	Ks	MPa	360	-	-

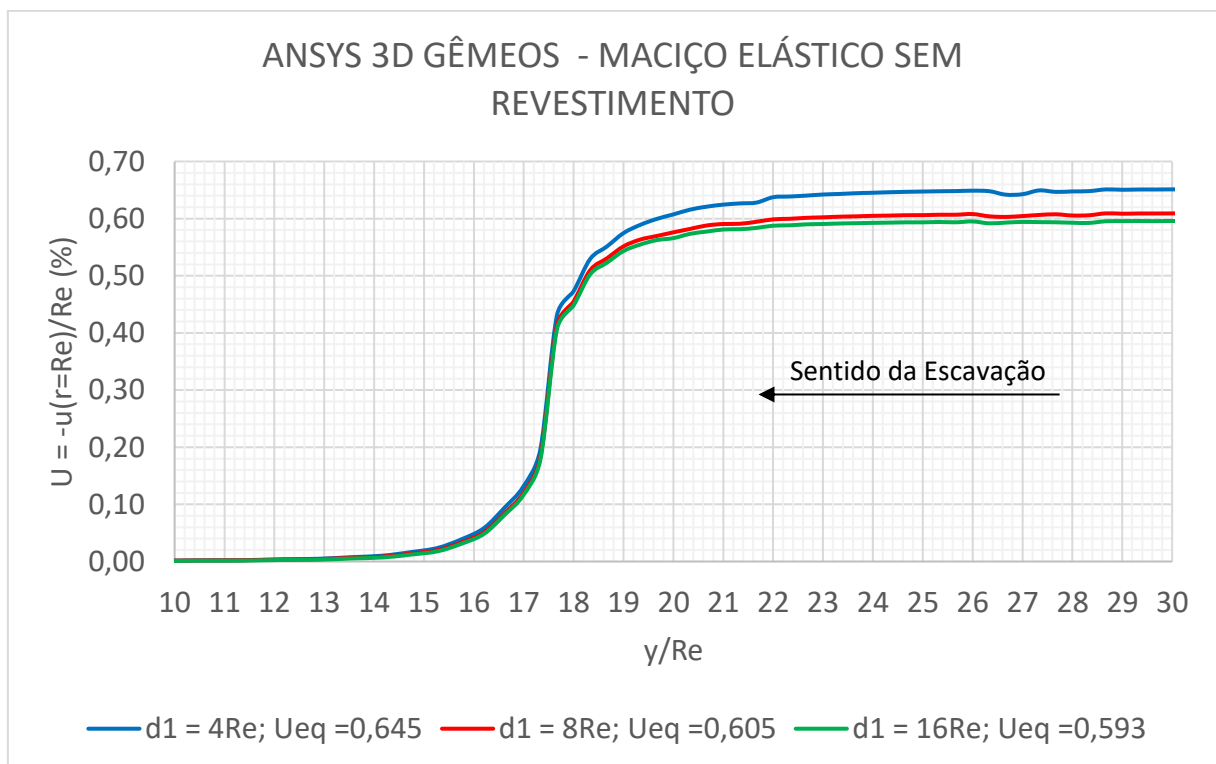


Figura 7.9 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos, maciço elástico sem revestimento

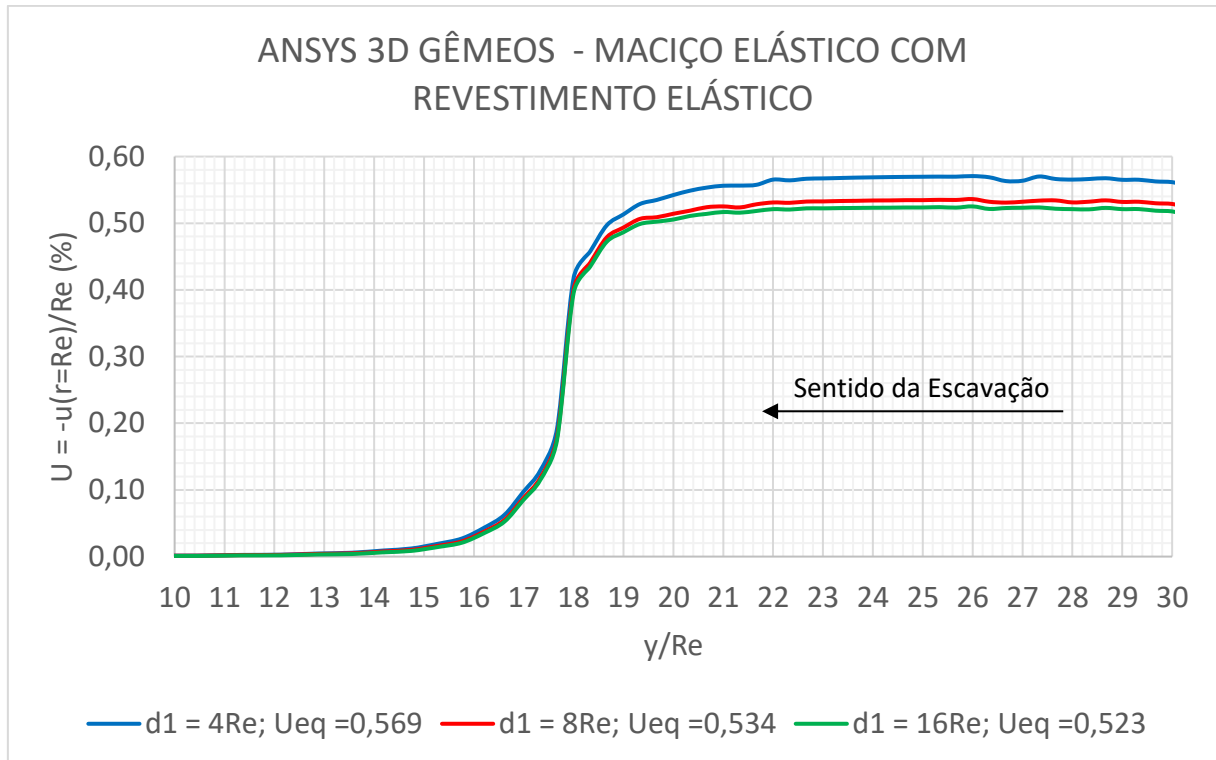


Figura 7.10 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos, maciço elástico com revestimento

Observando-se a Figura 7.9, nota-se claramente os efeitos do afastamento entre os túneis longitudinais sobre a convergência, que diminui conforme maior for a distância entre os túneis. É possível verificar que para o caso de maior afastamento, o valor da convergência no equilíbrio é da mesma ordem do caso axissimétrico, ou seja, o afastamento neste caso está grande o suficiente para que a convergência de um túnel deixe de interferir na convergência do túnel adjacente. Ao aplicar o revestimento, na Figura 7.10, o mesmo ocorre de maneira semelhante, sendo que neste caso ocorre uma diminuição da convergência em função da presença do revestimento, cuja rigidez ajuda a estabilizar a estrutura.

Seguindo a mesma lógica anterior, repetiu-se as análises, porém desta vez com o maciço em plasticidade, primeiramente não revestido e em uma segunda análise ativou-se a colocação do revestimento elástico. Novamente, variou-se as distâncias entre os túneis gêmeos, utilizando-se os parâmetros apresentados na Tabela 7.6, sendo os resultados destas análises contemplados nas Figuras 7.11 e 7.12, para o caso com revestimento.

Tabela 7.6 - parâmetros para análise em plasticidade do modelo de túneis gêmeos sem revestimento e com revestimento elástico

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	VALORES		
TÚNEIS LONGITUDINAIS					
Raio externo da seção	Re	cm	100	-	-
Raio interno da seção	Ri	cm	90	-	-
Passo de escavação	p	cm	1/3Re	-	-
Distância entre eixos dos túneis	d1	cm	4Re	8Re	16Re
MACIÇO					
Pressão geostática hidrostática	pr	MPa	4	-	-
Módulo de elasticidade	Es	MPa	1000	-	-
Coefficiente de Poisson	vs	adm	0,498	-	-
Coesão em plasticidade de Tresca	Ctr	MPa	2,3095	-	-
Coesão equivalente de Von Mises	Cvm	MPa	2,0	-	-
REVESTIMENTO					
Módulo de elasticidade	Er	MPa	3000	-	-
Coefficiente de Poisson	vr	adm	0,3	-	-
Rigidez do Revestimento	Ks	MPa	360	-	-

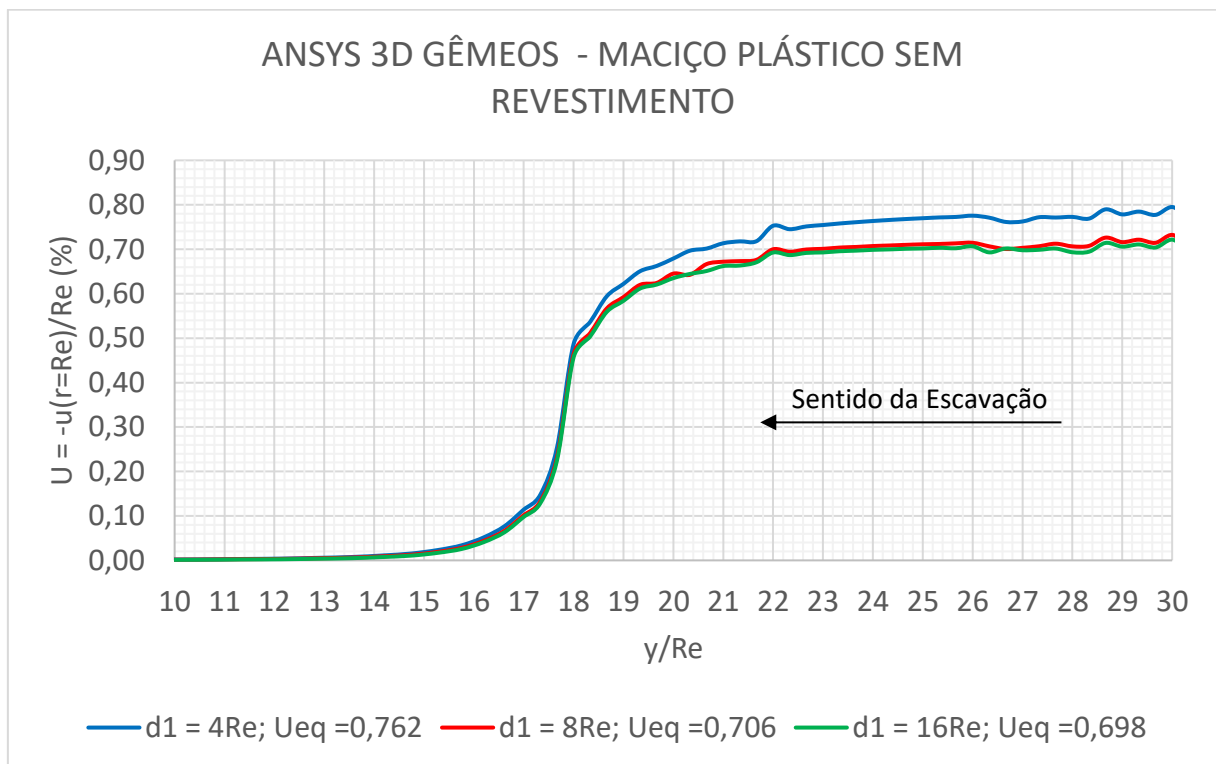


Figura 7.11 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos, maciço plástico sem revestimento

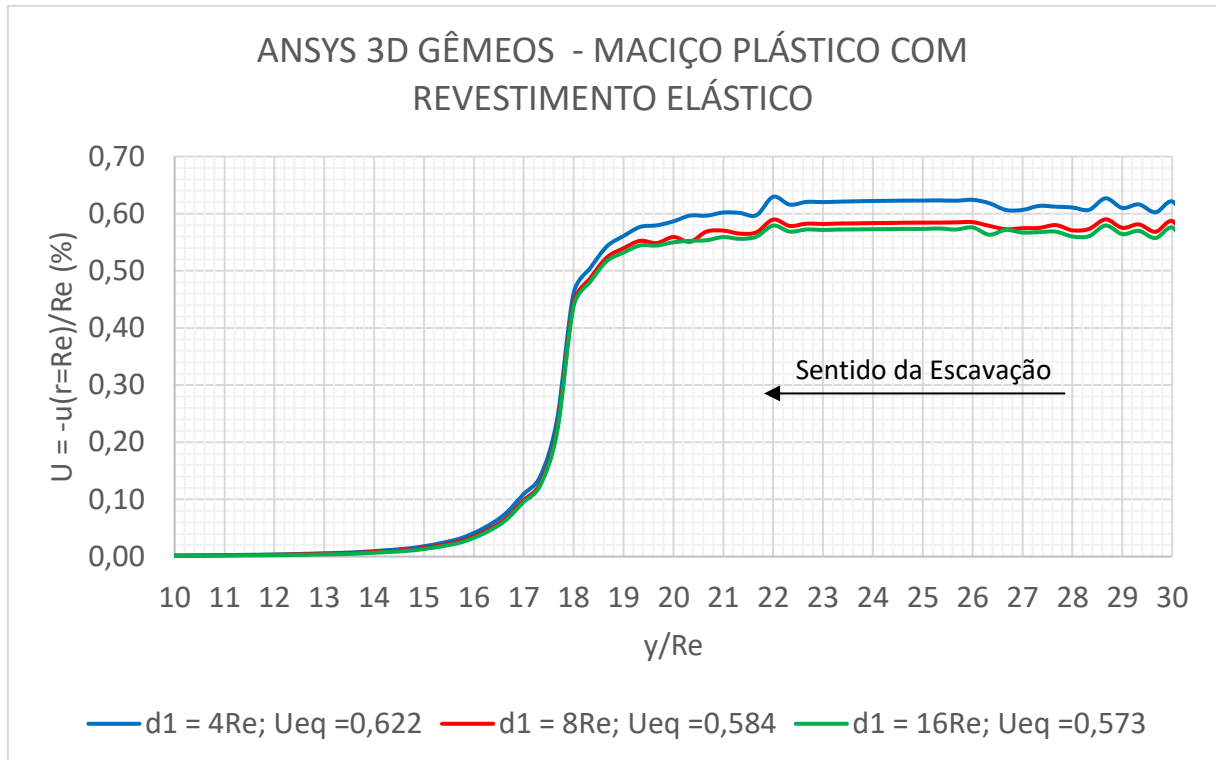


Figura 7.12 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos, maciço plástico com revestimento

Para a inserção das galerias transversais, foi necessário executar também um processo de validação dessas estruturas. Como uma galeria com os mesmos 39 passos utilizados pelo GEOMECC91 deixaria o modelo tridimensional sobrecarregado para o cálculo, traçou-se as galerias com menos passos e comparou-se os valores de convergência da parte estabilizada com os valores de convergência de equilíbrio encontrados com o GEOMECC91 e com o valor analítico para o caso do maciço em elasticidade sem revestimento, conforme representado na Figura 7.13. Em seguida, aplicou-se nas galerias também o revestimento elástico, comparando-se com o valor de referência fornecido pelo GEOMECC91, como é possível visualizar na Figura 7.14. Os parâmetros utilizados nestas análises são apresentados na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 - parâmetros para análise em elasticidade do modelo de galerias transversais sem revestimento e com revestimento elástico

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	VALORES
TÚNEIS LONGITUDINAIS			
Raio externo da seção	Re	cm	100
Raio interno da seção	Ri	cm	90
Passo de escavação	p	cm	1/3Re
Distância entre eixos dos túneis	d1	cm	16Re
GALERIAS TRANSVERSAIS			
Raio externo da seção	Re1	cm	2p
Raio interno da seção	Ri1	cm	2p - 10
Passo de escavação	p1	cm	1/3Re1
Distância entre eixos das galerias	d2	cm	80p
MACIÇO			
Pressão geostática hidrostática	pr	MPa	4
Módulo de elasticidade	Es	MPa	1000
Coefficiente de Poisson	vs	adm	0,498
REVESTIMENTO			
Módulo de elasticidade	Er	MPa	3000
Coefficiente de Poisson	vr	adm	0,3
Rigidez do Revestimento	Ks	MPa	360

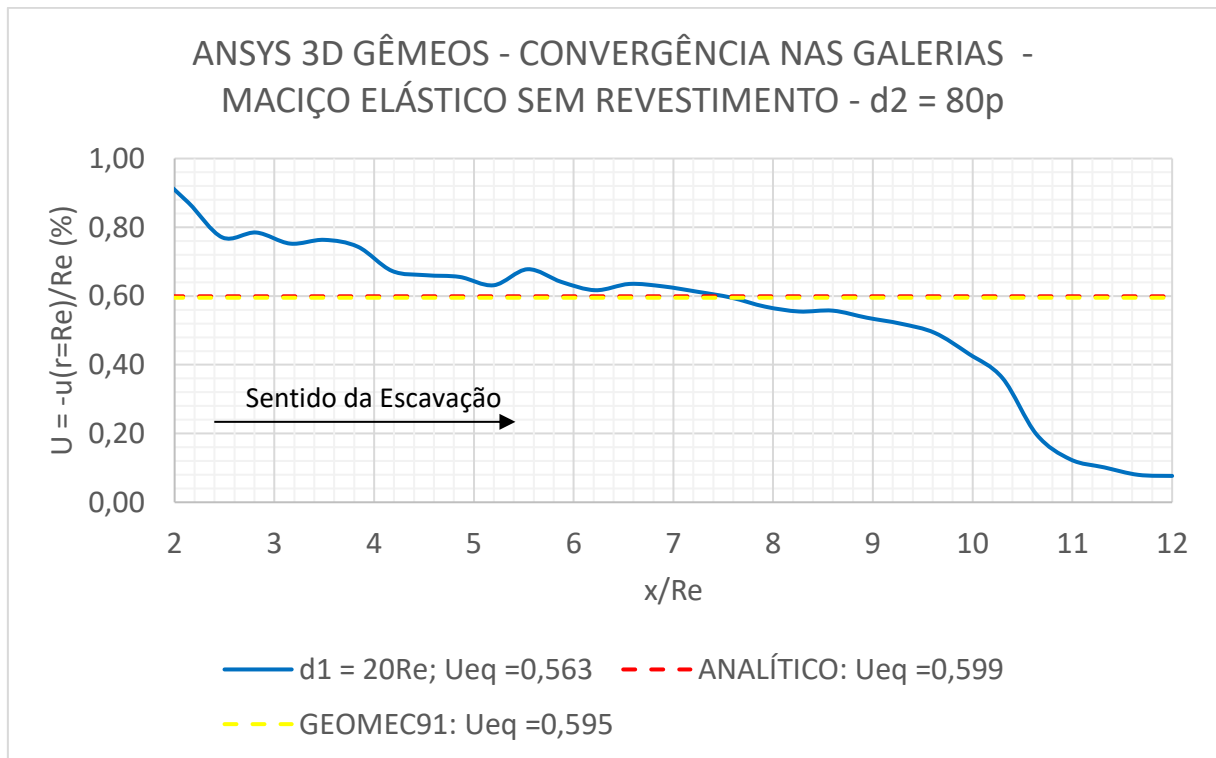


Figura 7.13 - Comparativo Analítico, GEOMECC91 e ANSYS: Galerias transversais, maciço elástico sem revestimento

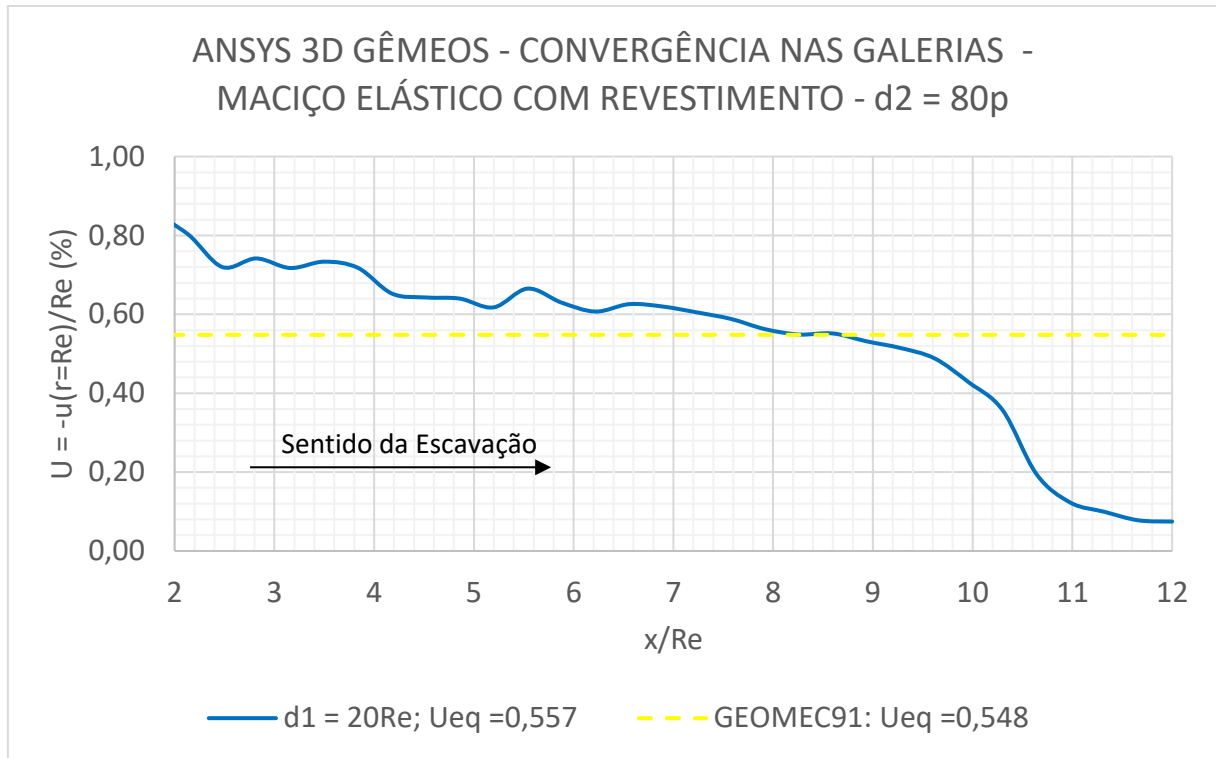


Figura 7.14 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Galerias transversais, maciço elástico com revestimento

Observando-se as Figuras 7.13 e 7.14, nota-se que a curva de convergência das galerias não é tão suave quanto a gerada para os túneis longitudinais. Isso se explica pela presença dos elementos SOLID186 tetraédricos na região das galerias, cujo nó intermediário produz este efeito. Porém, levando isso em consideração, a convergência em média ainda se aproxima de forma bastante satisfatória dos valores de referência para os casos em elasticidade, tanto no caso com revestimento quanto no caso sem. É possível também ver que na extremidade esquerda da curva há um aumento de convergência, isso se dá pelo efeito de borda na região de ligação da galeria com o túnel. Na extremidade direita, por sua vez, ocorre a menor convergência, gerada pela condição de simetria do modelo em relação a essa borda da galeria. Para obter a representação da frente de escavação e da zona não escavada nesta extremidade, para esses casos analisados interrompeu-se a escavação alguns passos antes de atingir o comprimento total da galeria.

Seguindo o mesmo conceito realizado para os túneis longitudinais, efetuou-se novamente as análises de convergência das galerias agora com o maciço em plasticidade, primeiramente sem aplicação do revestimento e depois com o material de revestimento elástico aplicado, comparando-se graficamente então com os valores de referência para a convergência de

equilíbrio dos cálculos analíticos e numéricos produzidos pelo GEOMECC91. Os parâmetros utilizados para esta nova análise estão expostos na Tabela 7.8 e o resultado destas análises pode ser visto nas Figuras 7.15, para a galeria não revestida, e 7.16 para o caso com a aplicação do revestimento na região da galeria.

Tabela 7.8 - parâmetros para análise em plasticidade do modelo de galerias transversais sem revestimento e com revestimento elástico

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	VALORES
TÚNEIS LONGITUDINAIS			
Raio externo da seção	Re	cm	100
Raio interno da seção	Ri	cm	90
Passo de escavação	p	cm	1/3Re
Distância entre eixos dos túneis	d1	cm	16Re
GALERIAS TRANSVERSAIS			
Raio externo da seção	Re1	cm	2p
Raio interno da seção	Ri1	cm	2p - 10
Passo de escavação	p1	cm	1/3Re1
Distância entre eixos das galerias	d2	cm	80p
MACIÇO			
Pressão geostática hidrostática	pr	MPa	4
Módulo de elasticidade	Es	MPa	1000
Coefficiente de Poisson	vs	adm	0,498
Coesão em plasticidade de Tresca	Ctr	MPa	2,3095
Coesão equivalente de Von Mises	Cvm	MPa	2,0
REVESTIMENTO			
Módulo de elasticidade	Er	MPa	3000
Coefficiente de Poisson	vr	adm	0,3
Rigidez do Revestimento	Ks	MPa	360

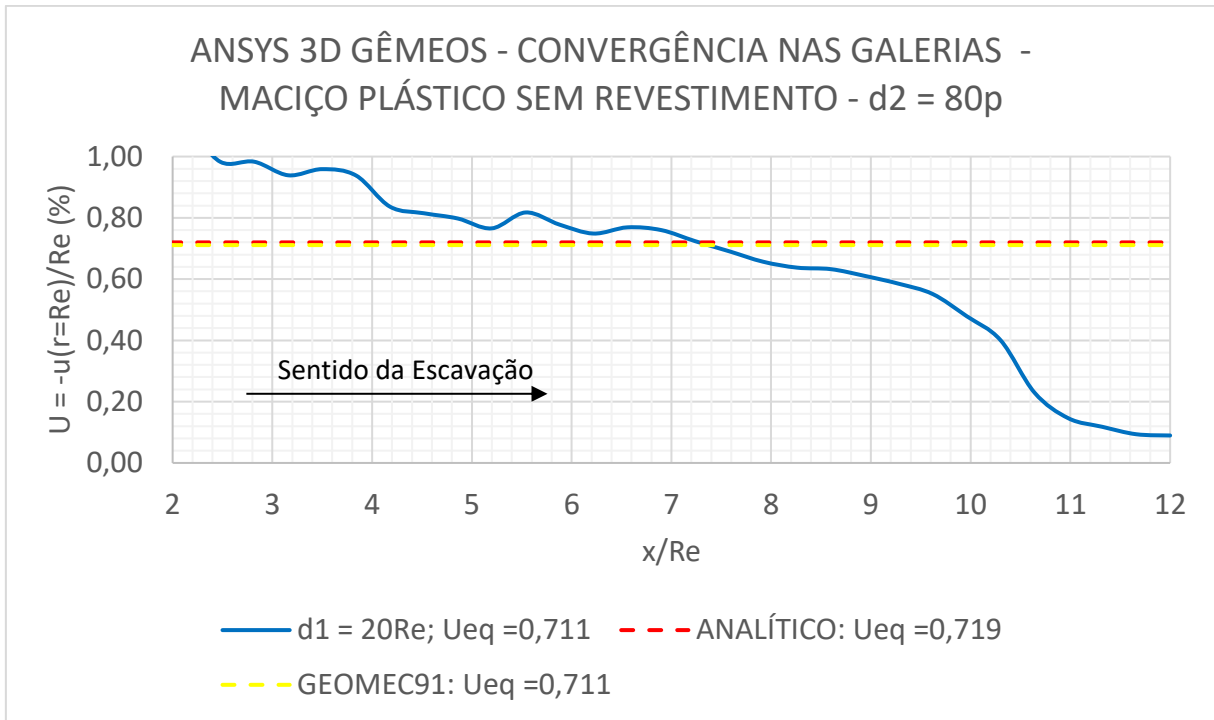


Figura 7.15 - Comparativo Analítico, GEOMECC91 e ANSYS: Galerias transversais, maciço plástico sem revestimento

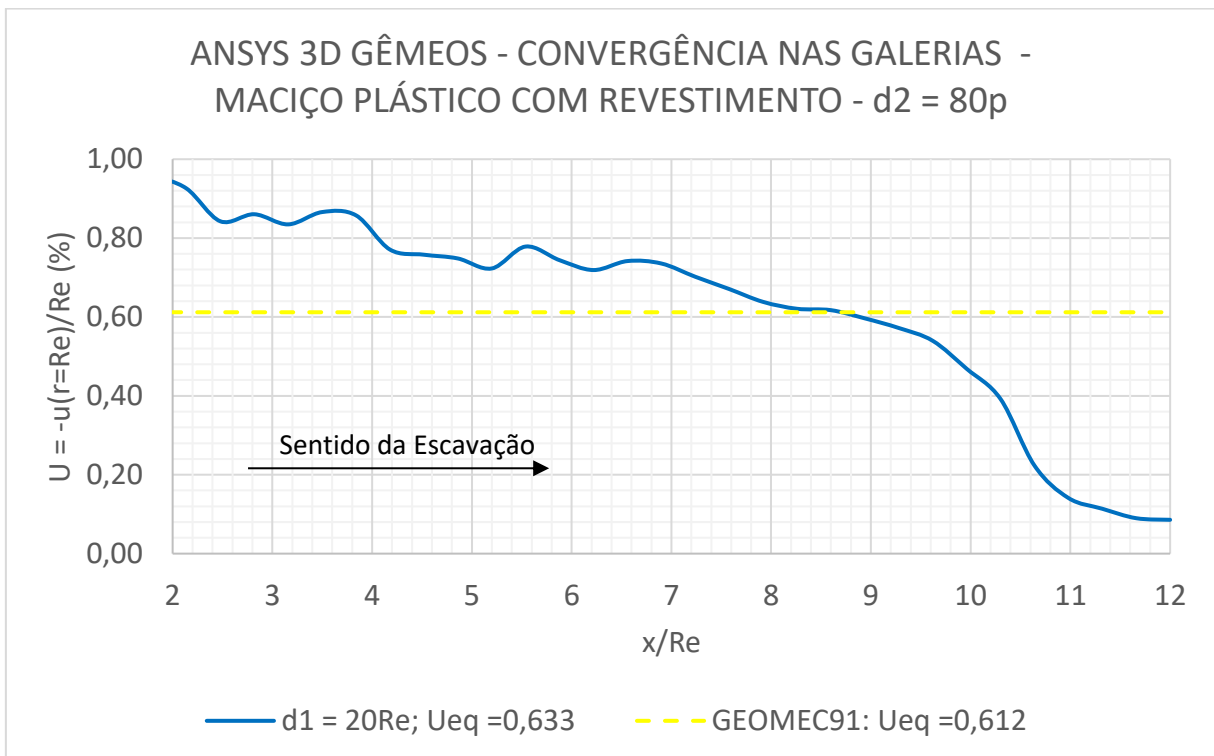


Figura 7.16 - Comparativo GEOMECC91 e ANSYS: Galerias transversais, maciço plástico com revestimento

Comparando os resultados nas Figuras 7.15 e 7.16, nota-se novamente algumas flutuações na região onde os elementos utilizados possuem funções de integração quadráticas, mas da mesma forma como ocorre para o caso do maciço em elasticidade, quando se utiliza a plasticidade os valores médios de convergência ficam bastante próximos, validando os modelos propostos para representação e simulação das galerias transversais.

Com o modelo tridimensional validado, iniciou-se um estudo dos afastamentos entre as galerias de forma semelhante ao realizado para os túneis gêmeos. Entretanto, conforme já mencionado, neste caso o problema é acoplado nas duas direções, se fazendo necessária a avaliação conjunta dos efeitos dos afastamentos dos túneis gêmeos longitudinais e das galerias transversais simultaneamente. Para tal, utilizou-se os parâmetros apresentados na Tabela 7.9, fazendo análises com três afastamentos entre túneis e três afastamentos entre as galerias, explorando todas as combinações possíveis entre esses afastamentos. Os resultados dessas análises com o maciço em elasticidade para túneis não revestidos está presente nas Figuras 7.17 a 7.19. As análises correspondentes em elasticidade, porém com a aplicação do revestimento estão presentes nas Figuras 7.20 a 7.22.

Tabela 7.9 - parâmetros para análise em elasticidade do modelo de túneis gêmeos com galerias transversais sem revestimento e com revestimento elástico

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	VALORES		
TÚNEIS LONGITUDINAIS					
Raio externo da seção	Re	cm	100	-	-
Raio interno da seção	Ri	cm	90	-	-
Passo de escavação	p	cm	1/3Re	-	-
Distância entre eixos dos túneis	d1	cm	4Re	8Re	16Re
GALERIAS TRANSVERSAIS					
Raio externo da seção	Rel	cm	2p	-	-
Raio interno da seção	Ril	cm	2p - 10	-	-
Passo de escavação	p1	cm	1/3Rel	-	-
Distância entre eixos das galerias	d2	cm	20p	40p	80p
MACIÇO					
Pressão geostática hidrostática	pr	MPa	4	-	-
Módulo de elasticidade	Es	MPa	1000	-	-
Coefficiente de Poisson	vs	adm	0,498	-	-
REVESTIMENTO					
Módulo de elasticidade	Er	MPa	3000	-	-
Coefficiente de Poisson	vr	adm	0,3	-	-
Rigidez do Revestimento	Ks	MPa	360	-	-

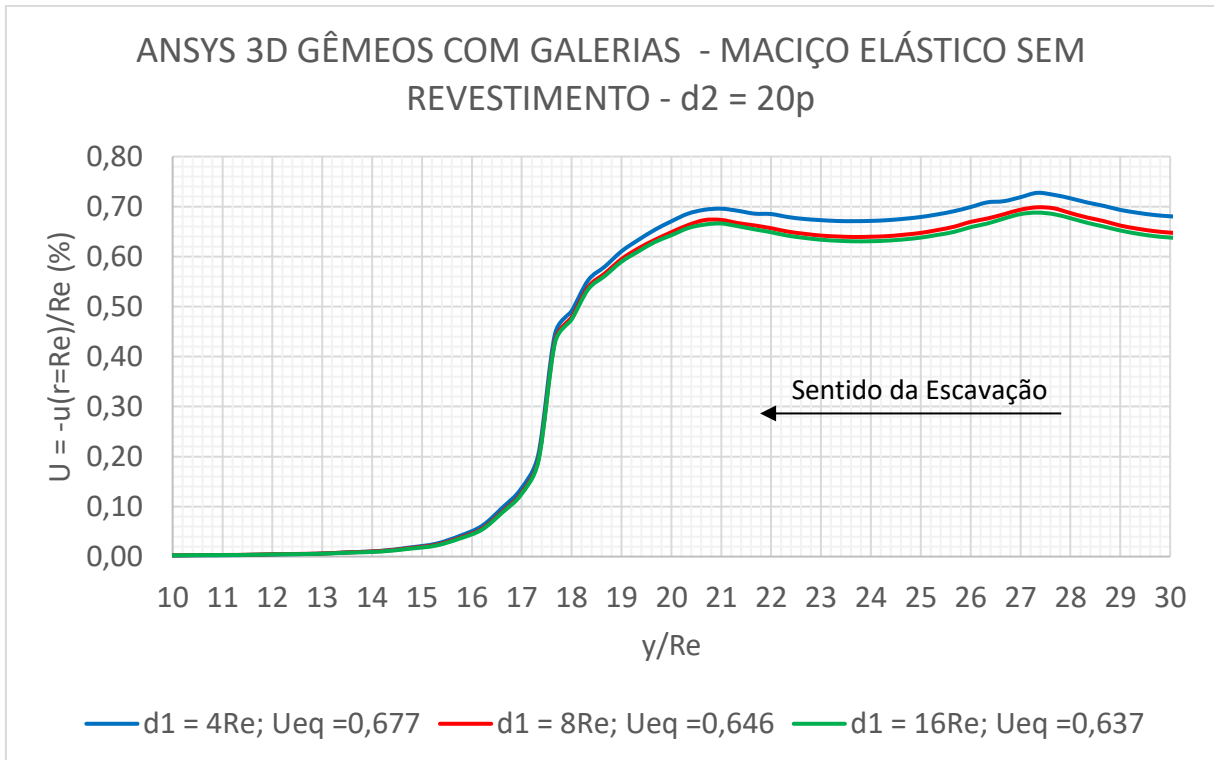


Figura 7.17 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço elástico sem revestimento, $d_2 = 20p$

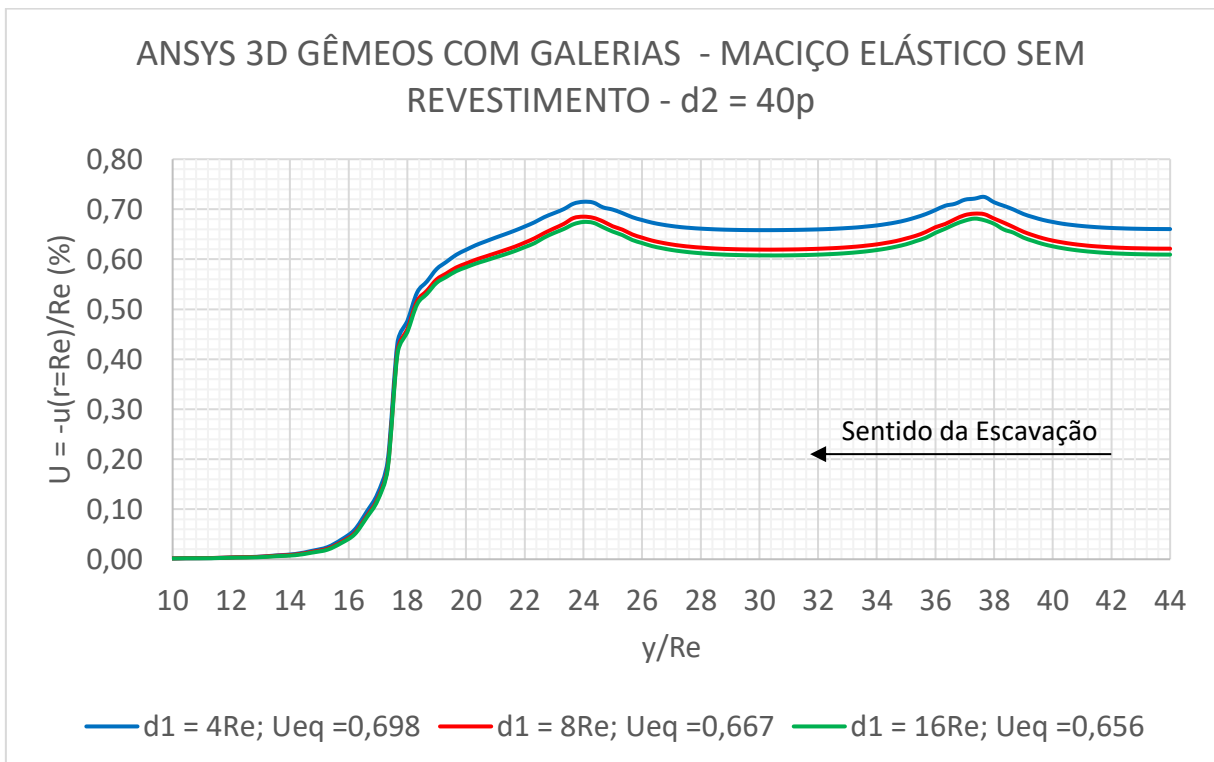


Figura 7.18 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço elástico sem revestimento, $d_2 = 40p$

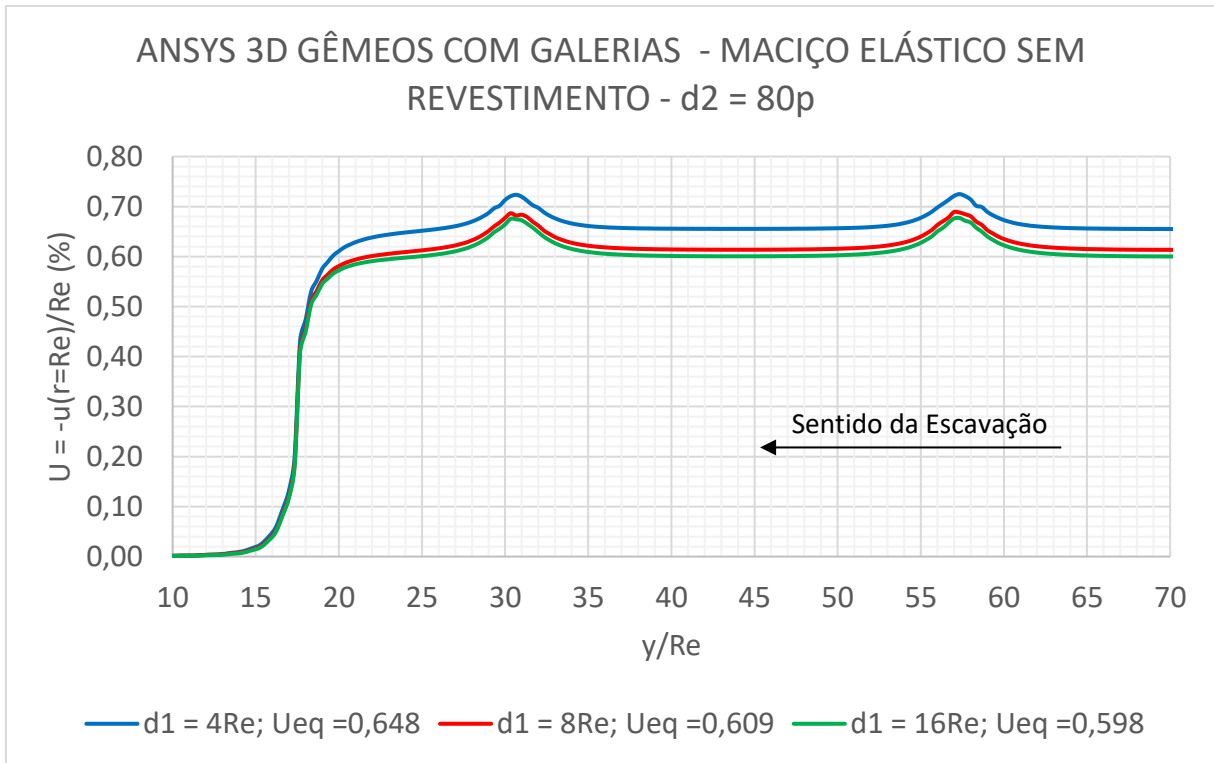


Figura 7.19 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço elástico sem revestimento, $d_2 = 80p$

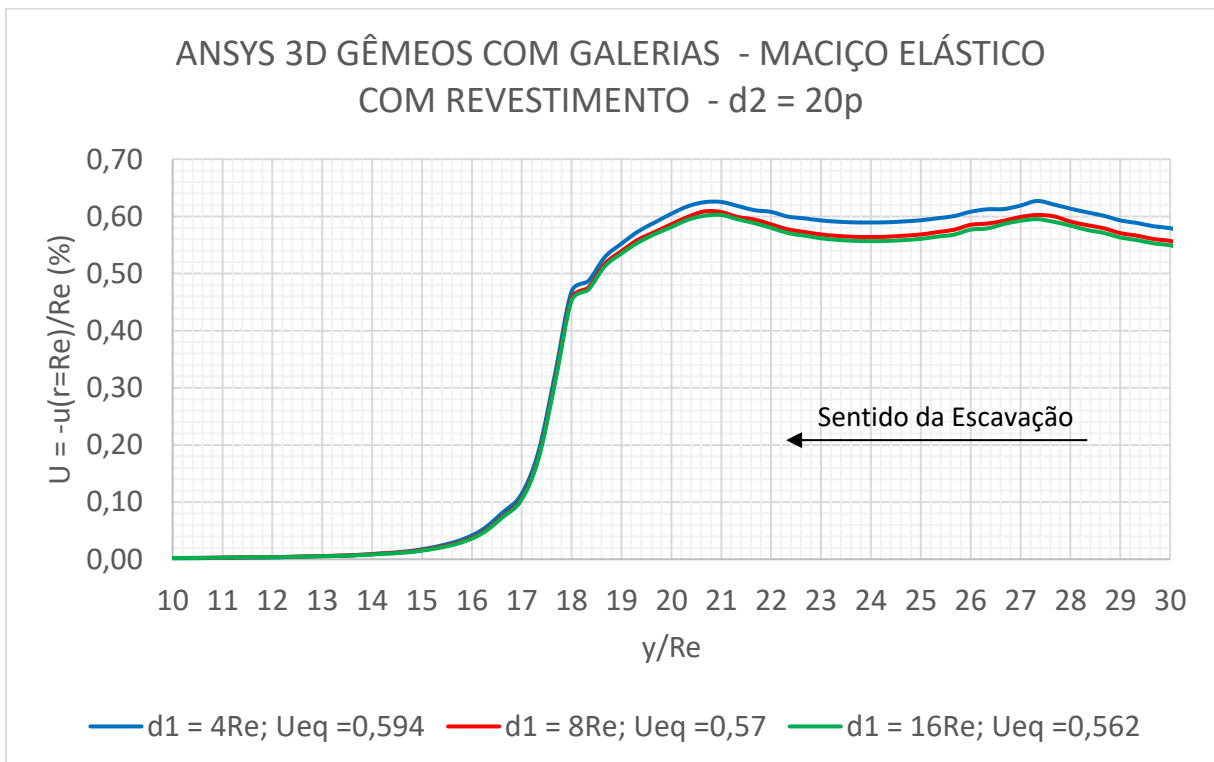


Figura 7.20 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço elástico com revestimento, $d_2 = 20p$

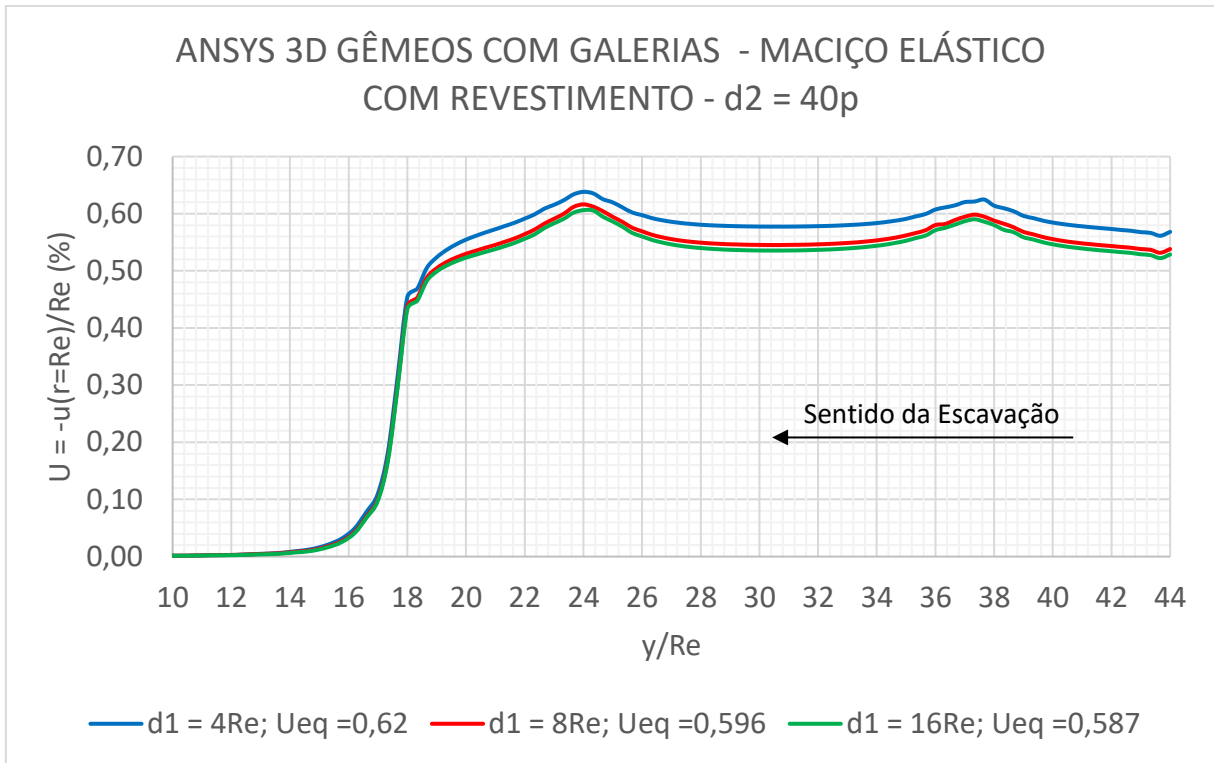


Figura 7.21 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço elástico com revestimento, $d_2 = 40p$

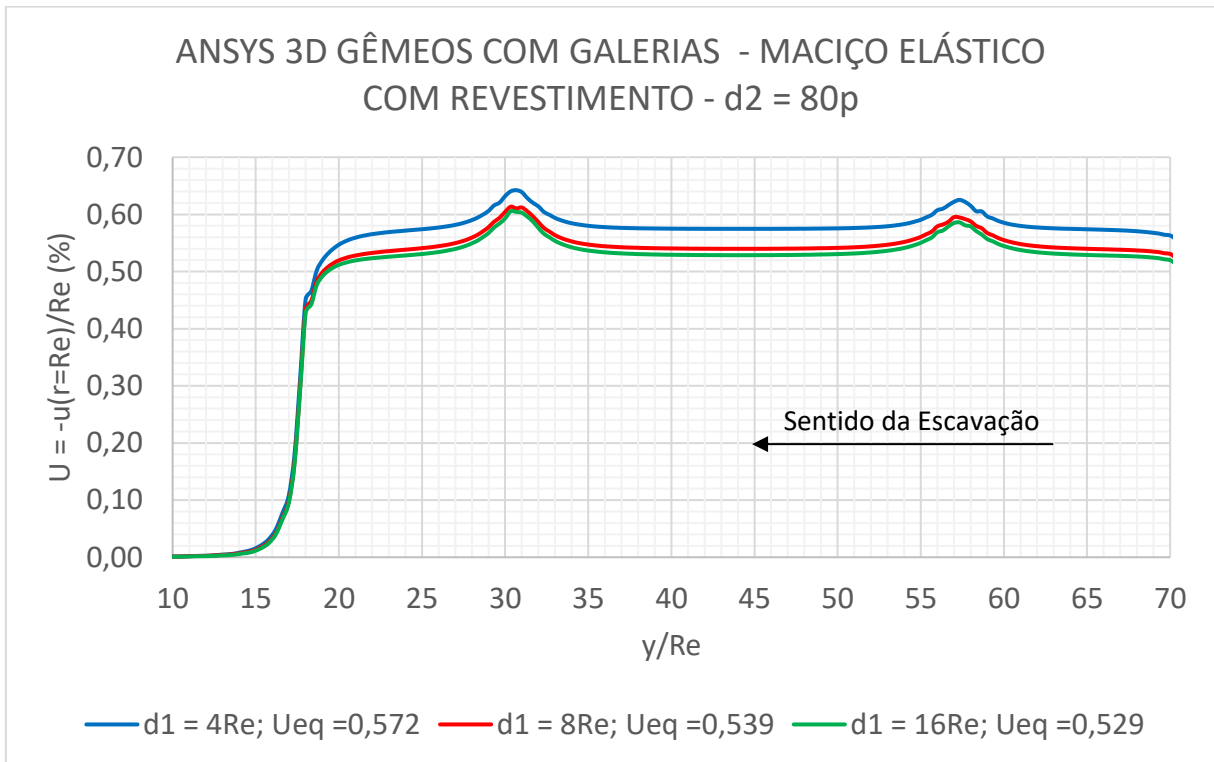


Figura 7.22 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço elástico com revestimento, $d_2 = 80p$

De maneira análoga ao que foi observado para o caso dos túneis gêmeos, nota-se que com um afastamento pequeno entre as galerias, como no primeiro caso em que se considerou um afastamento de 20 passos entre elas, a influência de uma galeria sobre a outra faz com que suas curvas de convergência se sobreponham em alguns pontos, elevando a convergência de equilíbrio geral do modelo. À medida que o afastamento aumenta, é possível ver que o pico de convergência referente à galeria fica mais bem delimitado, como nos casos em que se considerou a distância de 80 passos entre as galerias transversais, nota-se claramente o valor da convergência de equilíbrio do túnel longitudinal e os dois picos de convergência referentes às galerias bem destacados. No caso com as distâncias pequenas entre as galerias também ocorrem efeitos de borda nas duas extremidades, visto que a influência da galeria se estende até as extremidades do túnel longitudinal, sendo que essa zona de influência para as laterais em relação ao eixo das galerias é função do raio da galeria transversal, como apontado por Quevedo (2017), que estimou que essa zona de influência se estende por cerca de 10 vezes o tamanho do raio da galeria para cada lado.

Por fim, para concluir os estudos de afastamentos entre os túneis longitudinais e as galerias transversais, replicou-se os estudos no modelo tridimensional, considerando-se então o maciço como um material com deformações plásticas, considerando inicialmente os túneis não revestidos e em seguida aplicando-se o revestimento em material elástico. Os parâmetros utilizados nessas análises estão na Tabela 7.10. Os resultados das análises para os túneis sem revestimento estão presentes nas Figuras 7.23 a 7.25. Para o caso de túneis com aplicação do revestimento elástico, os resultados são apresentados nas Figuras 7.26 a 7.28.

Tabela 7.10 - parâmetros para análise em plasticidade do modelo de túneis gêmeos com galerias transversais sem revestimento e com revestimento elástico

PARÂMETROS	SÍMBOLO	UNIDADE	VALORES		
TÚNEIS LONGITUDINAIS					
Raio externo da seção	Re	cm	100	-	-
Raio interno da seção	Ri	cm	90	-	-
Passo de escavação	p	cm	1/3Re	-	-
Distância entre eixos dos túneis	d1	cm	4Re	8Re	16Re
GALERIAS TRANSVERSAIS					
Raio externo da seção	Re1	cm	2p	-	-
Raio interno da seção	Ri1	cm	2p - 10	-	-
Passo de escavação	p1	cm	1/3Re1	-	-
Distância entre eixos das galerias	d2	cm	20p	40p	80p
MACIÇO					
Pressão geostática hidrostática	pr	MPa	4	-	-
Módulo de elasticidade	Es	MPa	1000	-	-
Coeficiente de Poisson	vs	adm	0,498	-	-
Coesão em plasticidade de Tresca	Ctr	MPa	2,3095	-	-
Coesão equivalente de Von Mises	Cvm	MPa	2,0	-	-
REVESTIMENTO					
Módulo de elasticidade	Er	MPa	3000	-	-
Coeficiente de Poisson	vr	adm	0,3	-	-
Rigidez do Revestimento	Ks	MPa	360	-	-

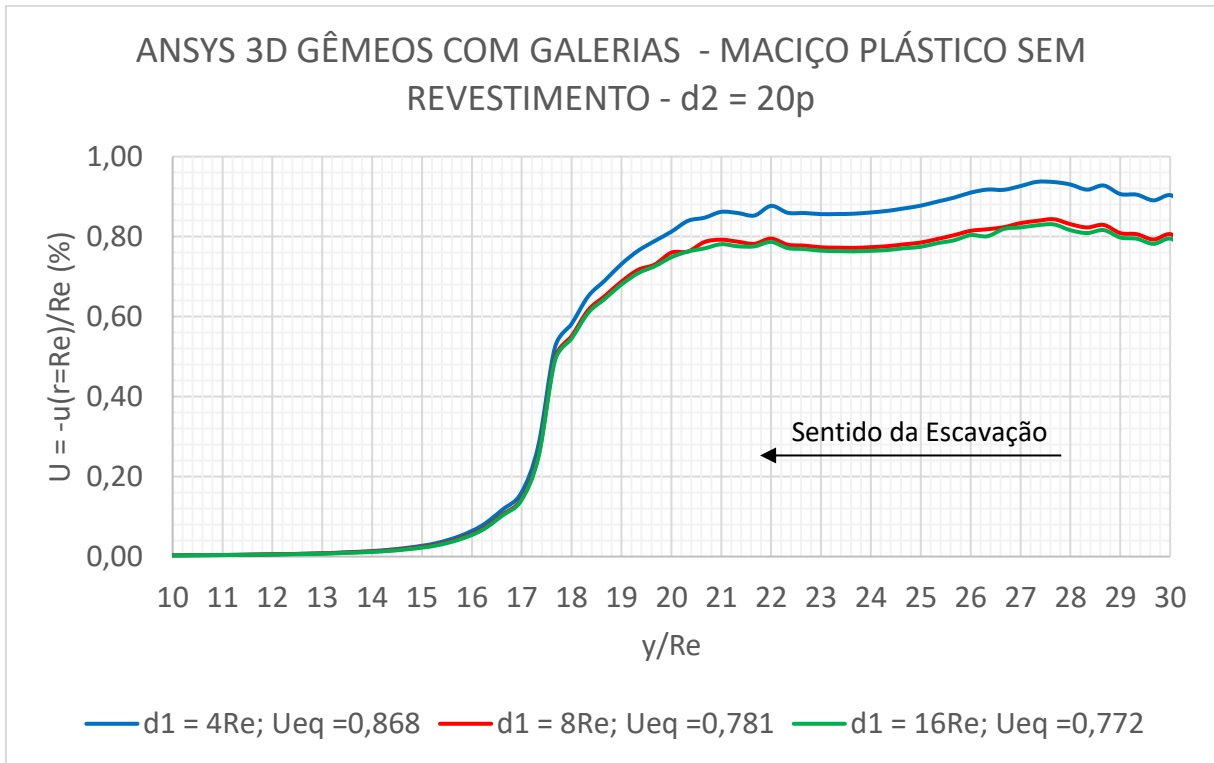


Figura 7.23 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico sem revestimento, $d_2 = 20p$

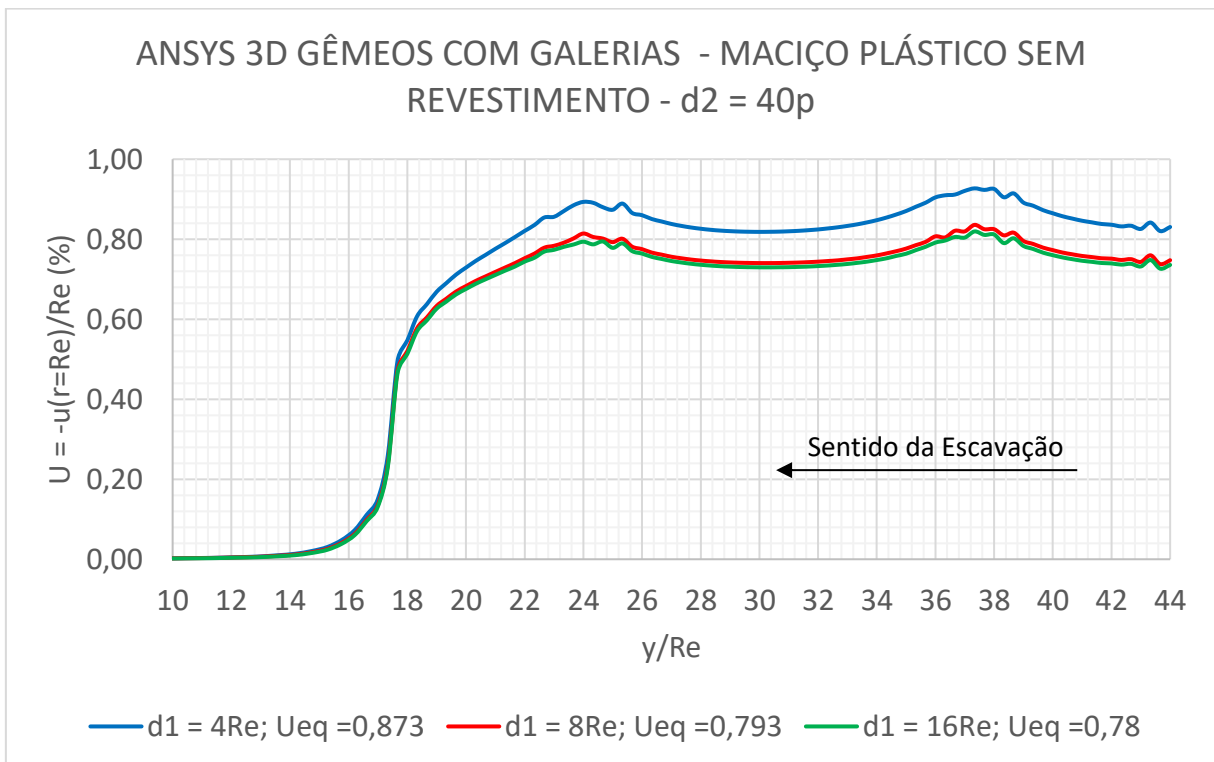


Figura 7.24 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico sem revestimento, $d_2 = 40p$

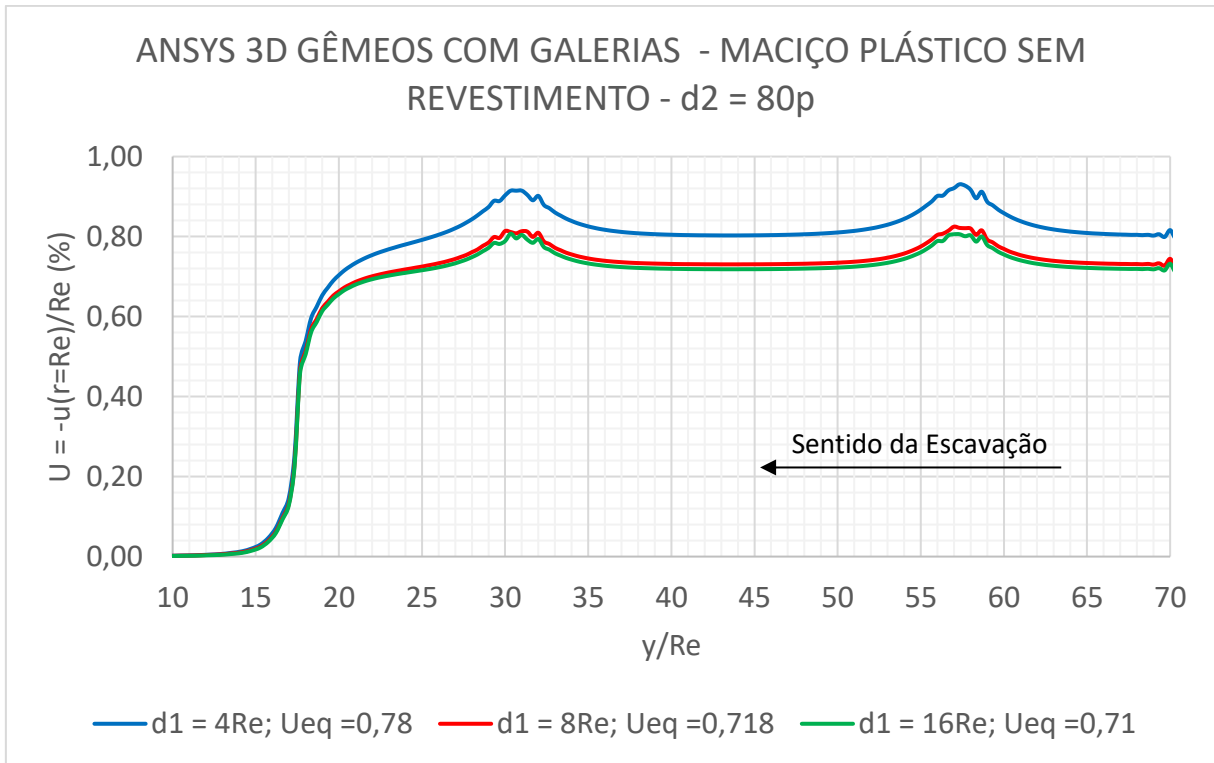


Figura 7.25 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico sem revestimento, $d_2 = 80p$

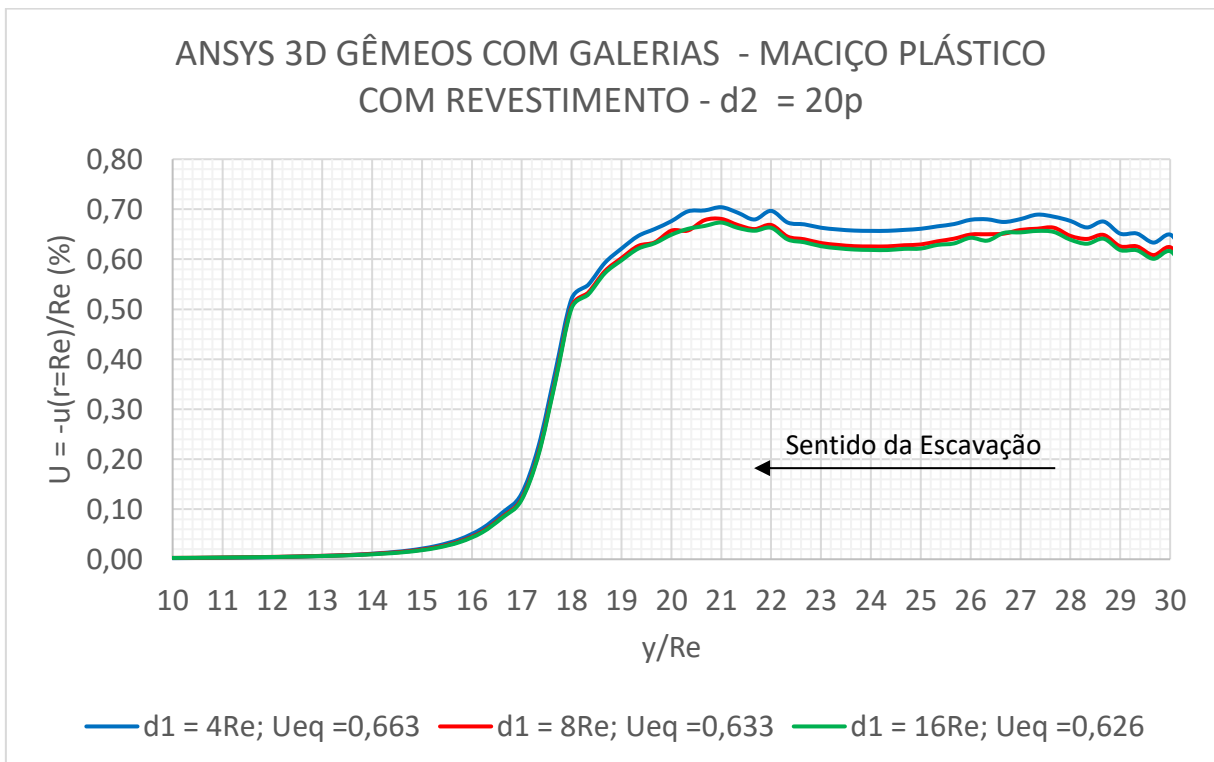


Figura 7.26 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, $d_2 = 20p$

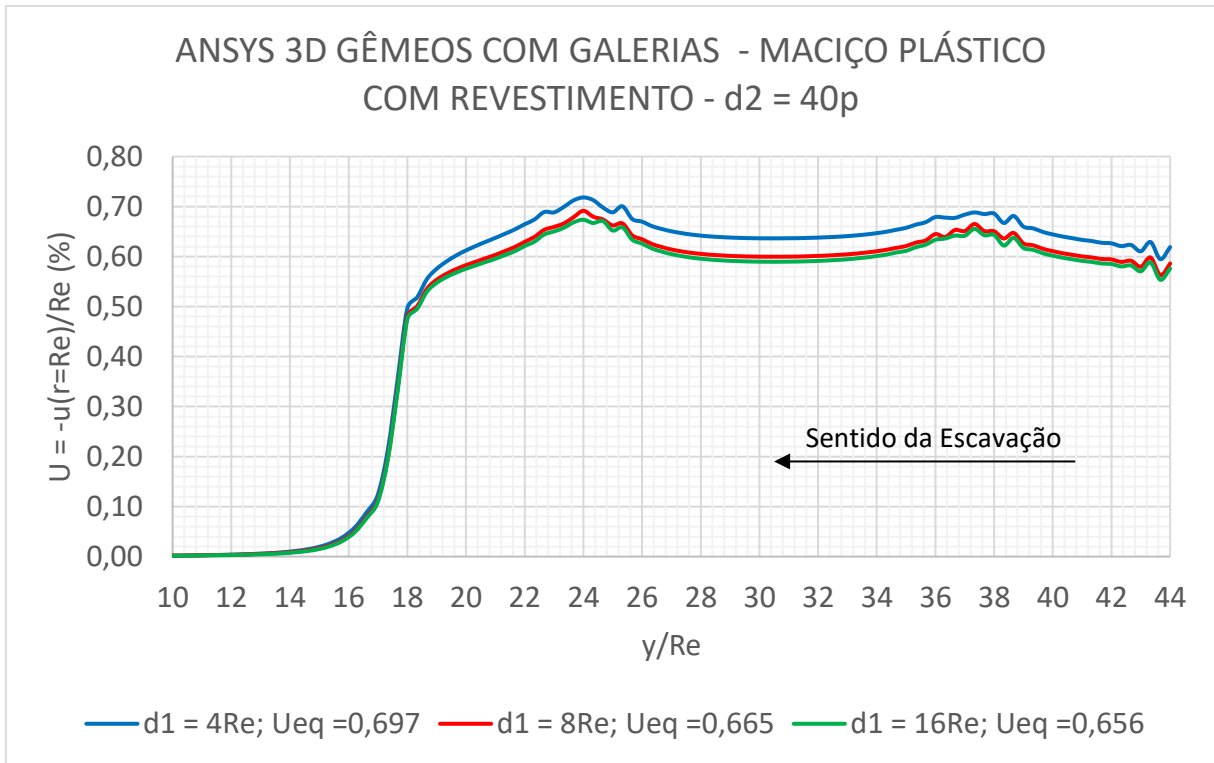


Figura 7.27 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, $d_2 = 40p$

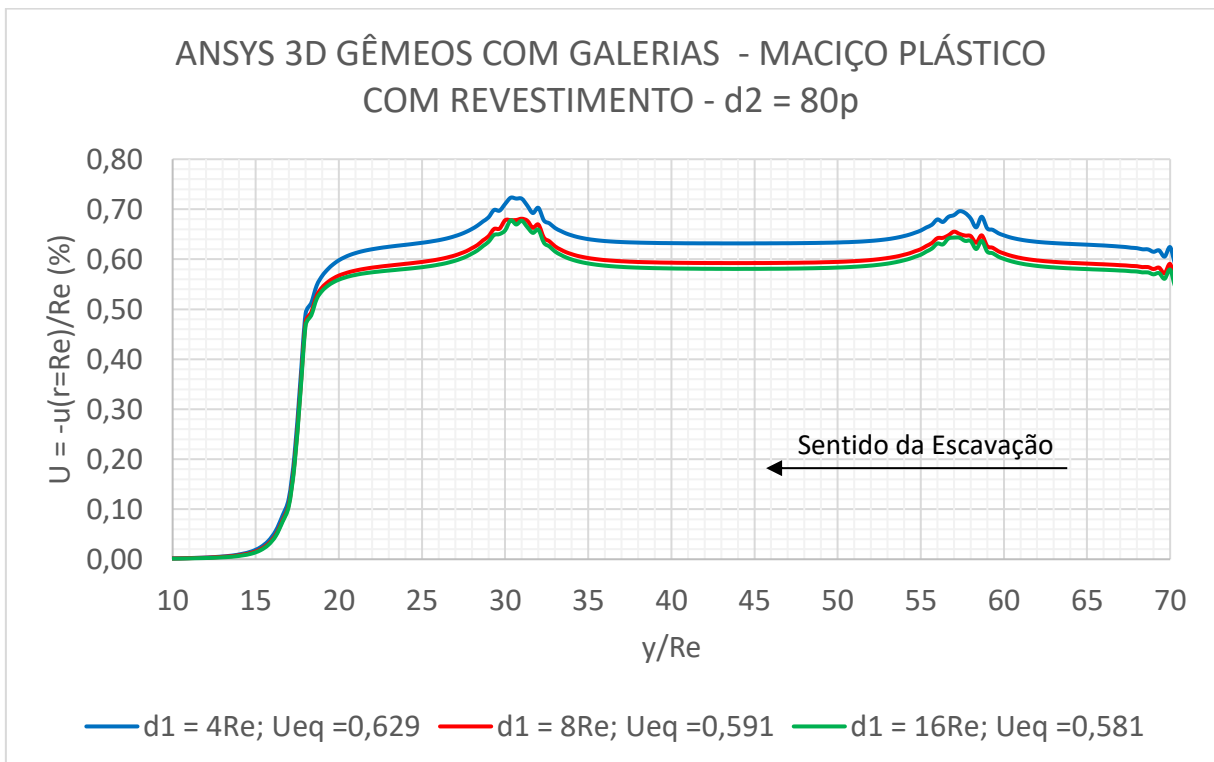


Figura 7.28 - Comparativo ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, $d_2 = 80p$

Analisando-se os resultados obtidos nesta última etapa de cálculos, é possível claramente identificar os efeitos da alteração de cada um dos afastamentos tanto entre os túneis gêmeos longitudinais quanto entre as galerias transversais, bem como das combinações de afastamentos entre eles sobre as curvas de convergência. Comparando-se, por exemplo, o caso com 20 passos de afastamento entre as galerias e com distância de 16 raios externos entre os túneis possui uma convergência tão alta quanto o túnel com afastamento de 80 passos entre as galerias e apenas 4 raios externos de distância entre os túneis longitudinais. Isso salienta a importância da avaliação conjunta desses afastamentos e demonstra como um problema dessa natureza não poderia ser resolvido se não com uma modelagem tridimensional para captar todos esses efeitos sobre as curvas de convergência de equilíbrio.

No *script* desenvolvido para geração desses modelos analisados, também foi incluído um módulo de pós-processamento a fim de gerar visualizações de alguns resultados importantes sobre os túneis estudados. Dentre eles, destacou-se alguns casos de deslocamentos e tensões para serem apresentados para um melhor entendimento do comportamento global da estrutura. Todas as imagens apresentadas são sobre o último caso analisado, com o maciço em plasticidade, o revestimento em elasticidade, com afastamento de 80 passos entre as galerias e de 16 raios externos entre os túneis longitudinais, ou seja, o modelo com mais detalhes dentre os apresentados.

Primeiramente, plotou-se as resultantes de deslocamentos do modelo, conforme visto na Figura 7.29 e sua respectiva vista inferior na figura 7.30. Nota-se pelo campo de deslocamentos que o estudo da malha adotada está bem coerente, sendo mais refinado nas regiões de maiores deslocamentos e menos detalhada nas regiões adjacentes.

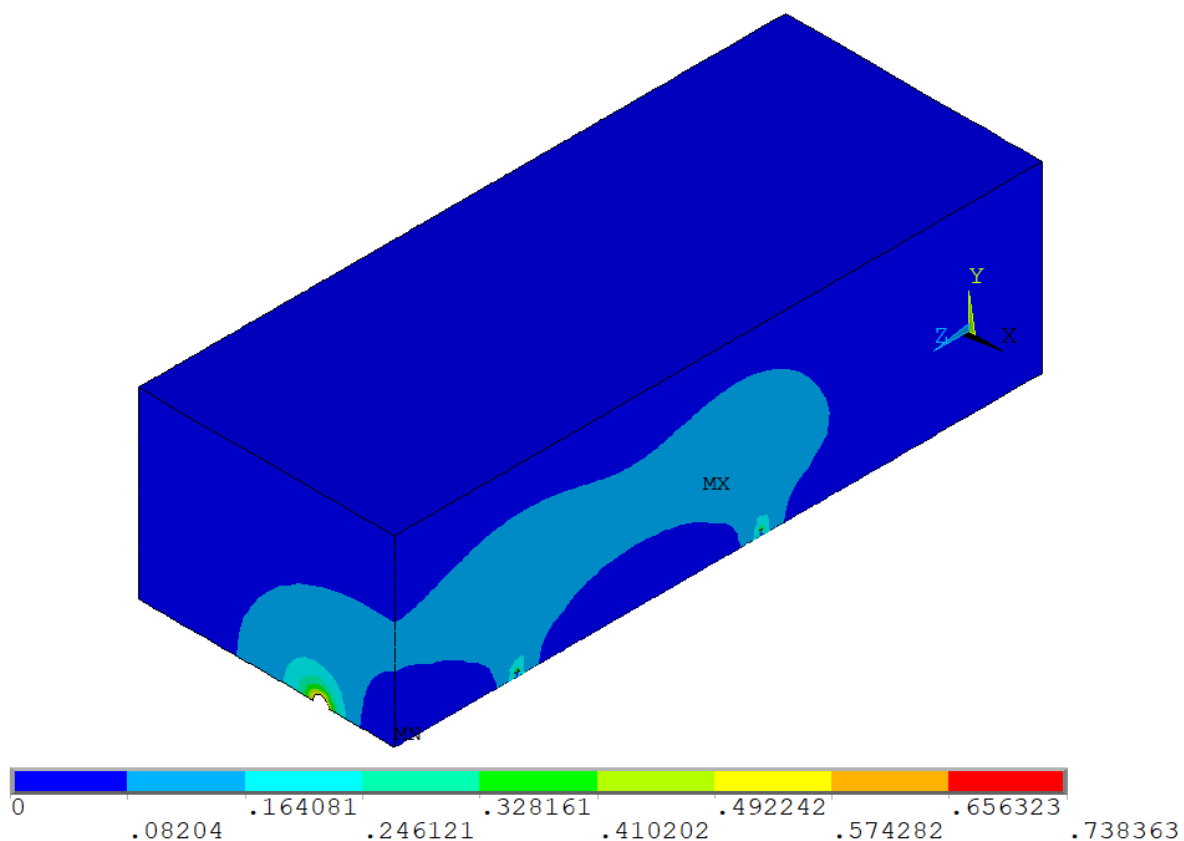


Figura 7.29 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, campos de deslocamentos

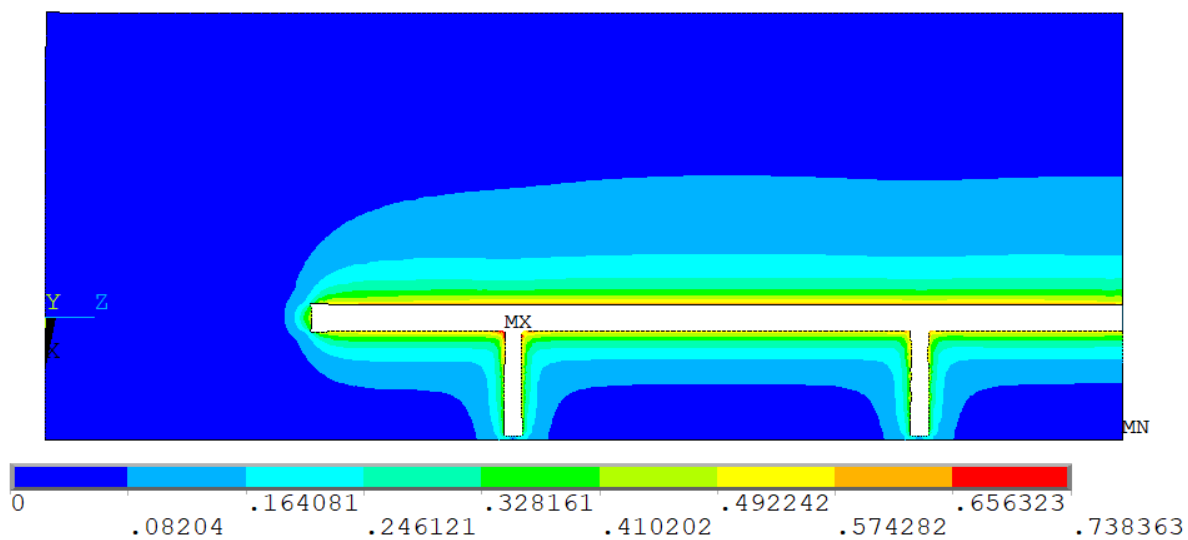


Figura 7.30 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, campos de deslocamentos, vista inferior

Para uma melhor visualização e compreensão dos deslocamentos, plotou-se também os deslocamentos na direção do eixo X, conforme a Figura 7.31 e sua respectiva vista inferior na Figura 7.32, além dos deslocamentos na direção do eixo Y, conforme apresentado na Figura 7.33. Na direção do eixo X, é possível verificar com clareza nas Figuras 7.31 e 7.32, como a presença do túnel gêmeo provoca um deslocamento na parede do túnel oposto.

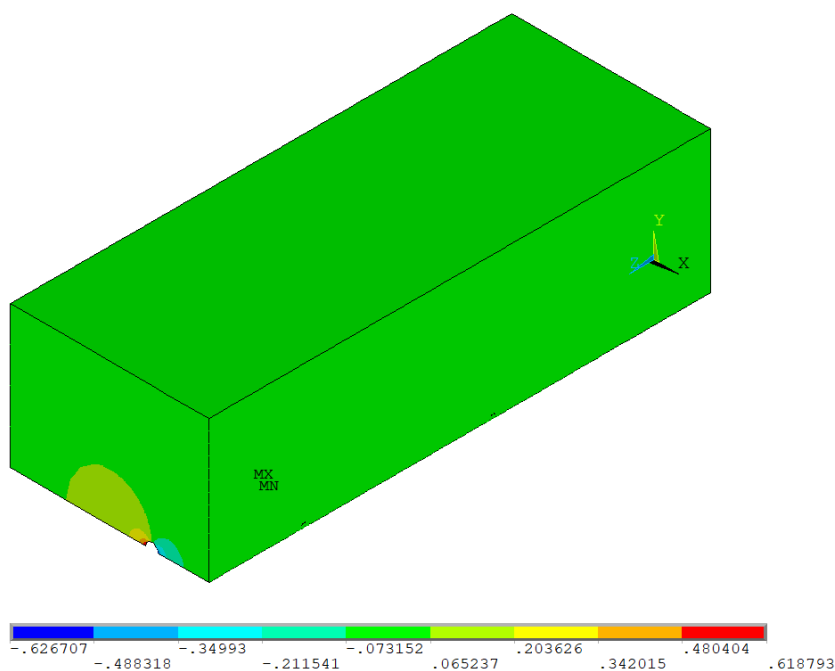


Figura 7.31 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, campos de deslocamentos na direção x

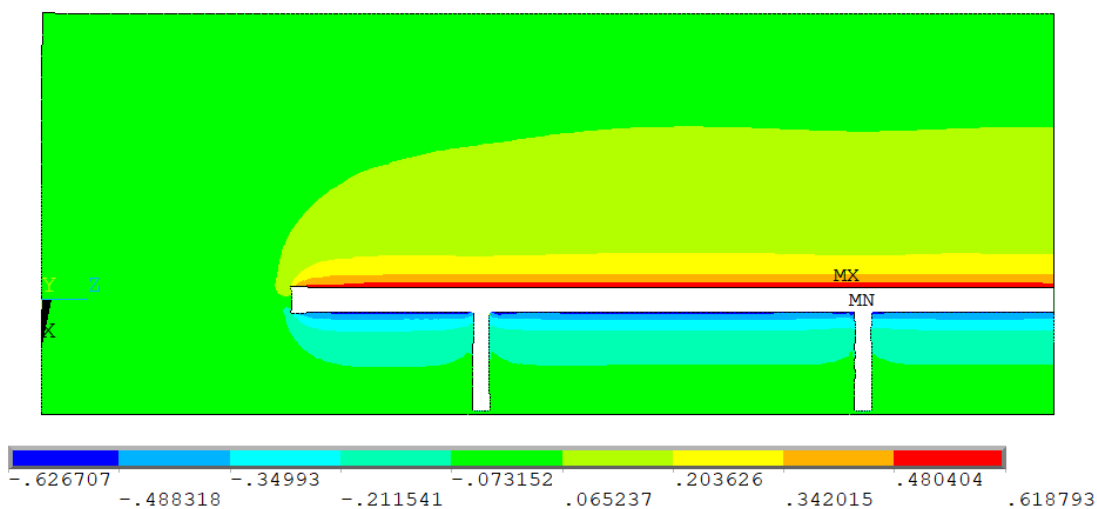


Figura 7.32 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, campos de deslocamentos na direção x, vista inferior

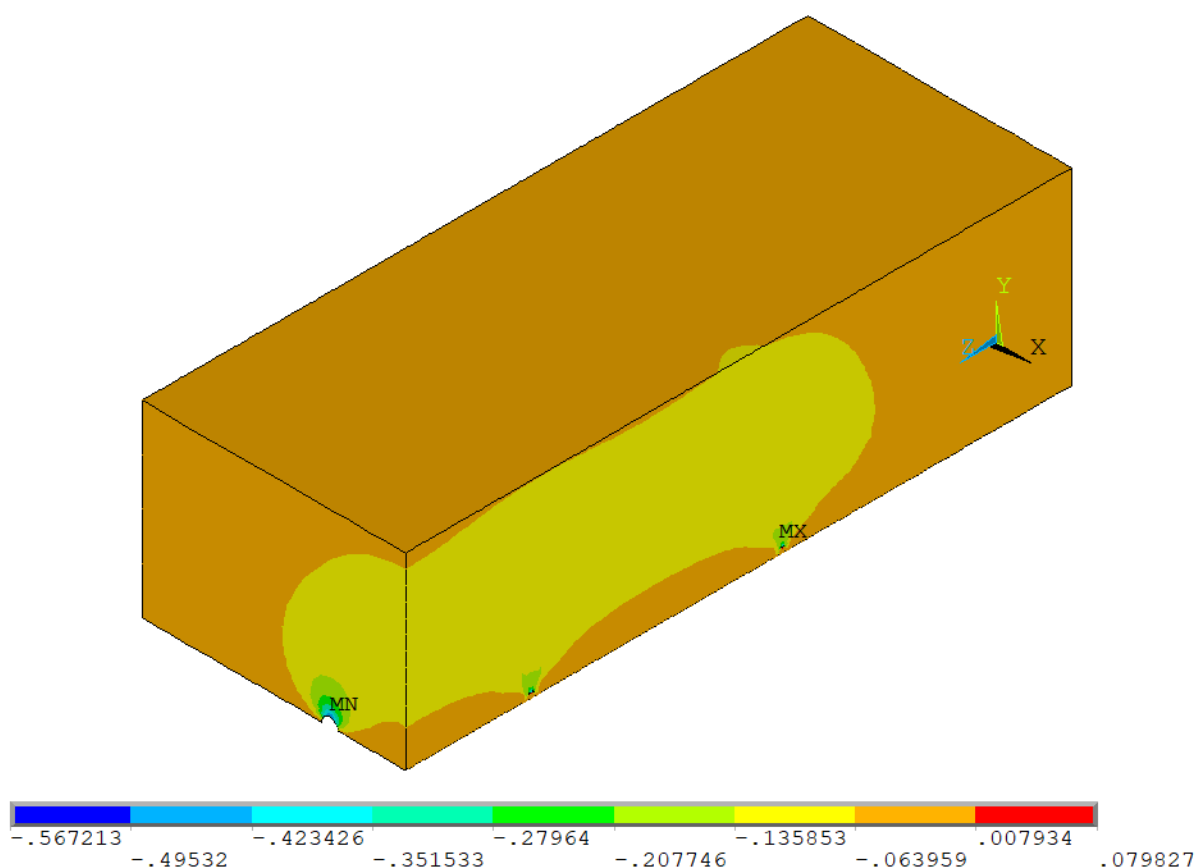


Figura 7.33 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, campos de deslocamentos na direção y

Outro ponto de interesse entre os resultados é o comportamento das tensões no modelo. Para isso, realizou-se a plotagem da intensidade de tensões no modelo, apresentada na Figura 7.34, com sua respectiva vista inferior na Figura 7.35. Na vista principal, nota-se como as tensões se distribuem de forma radial no entorno dos túneis, enquanto na vista inferior é possível visualizar o quanto elas são mais acentuadas próximo das paredes dos túneis e vão se atenuando conforme se percorre o maciço. Na vista inferior, também é possível visualizar os acúmulos de tensões nas regiões de encontro entre os túneis gêmeos e as galerias, sendo uma das regiões mais críticas do modelo, o que está de acordo com o que já havia sido visualizado também nos perfis de convergência nos estudos de distanciamentos.

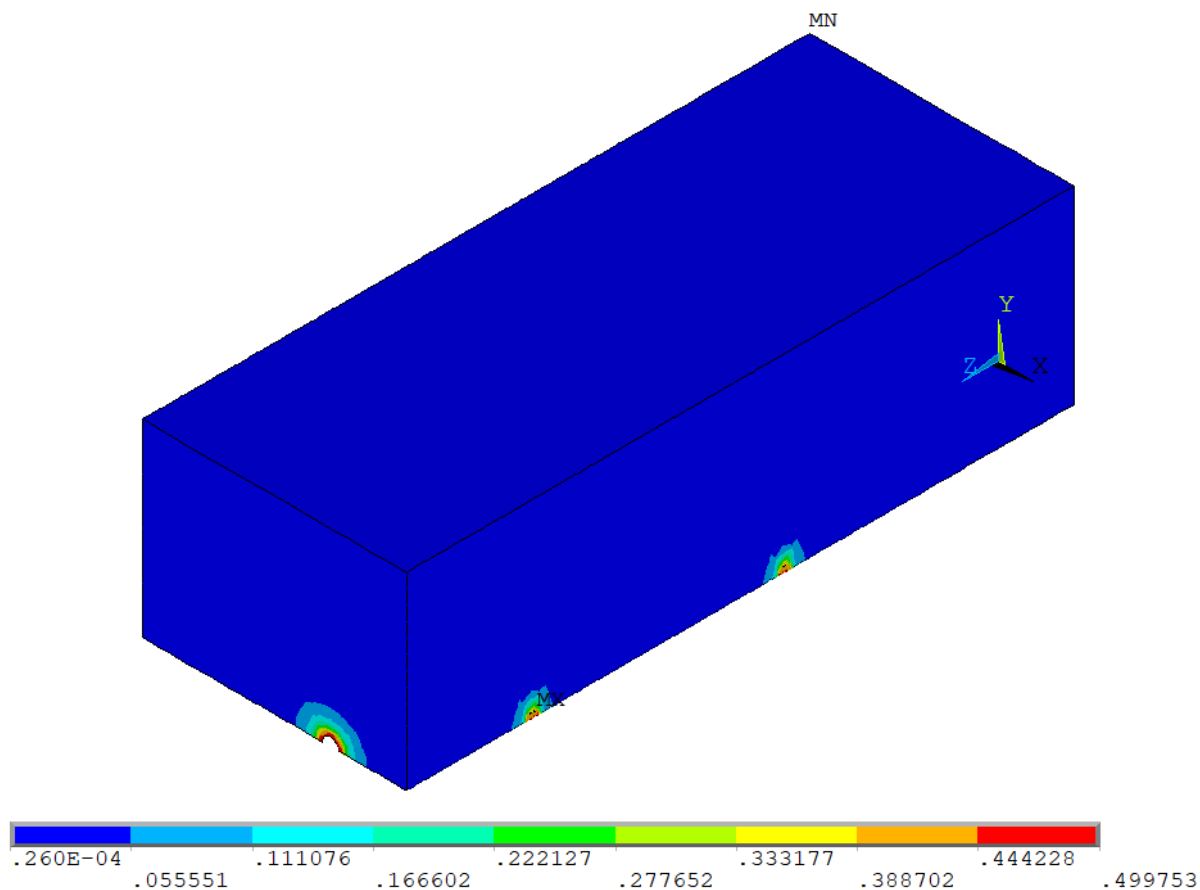


Figura 7.34 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, intensidade de tensões

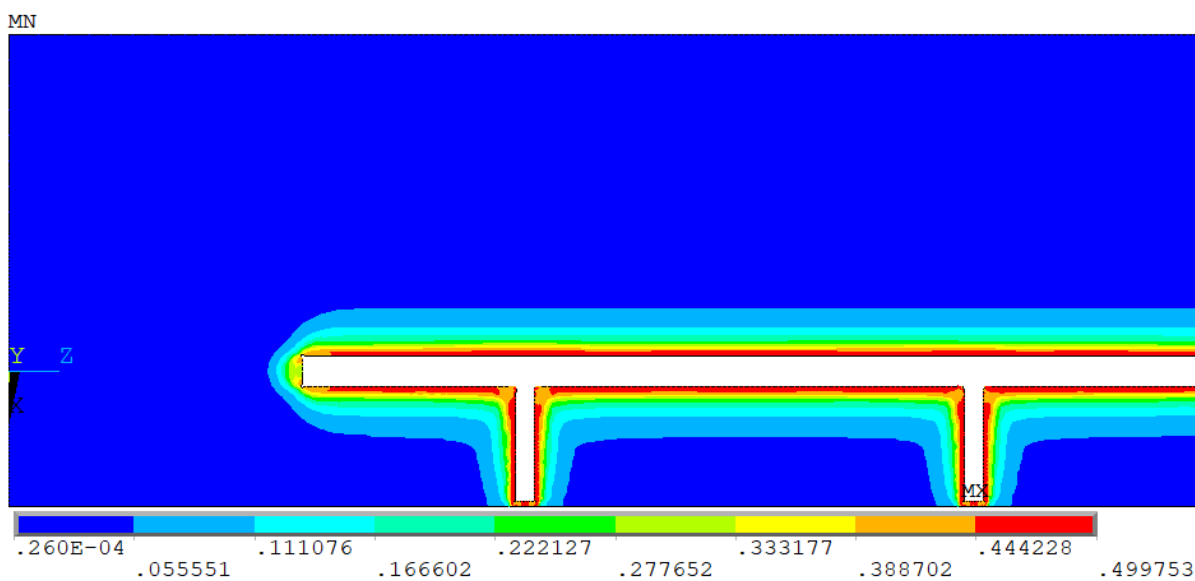


Figura 7.35 - ANSYS: Túneis gêmeos com galerias transversais, maciço plástico com revestimento, intensidade de tensões, vista inferior

Para fins de avaliação de custo computacional estimou-se a média dos tempos de processamento fornecidos pelo ANSYS. Os modelos bidimensionais em axissimetria utilizando elementos PLANE182, com 2430 elementos, 2040 nós, o que resulta em um sistema de 4080 graus de liberdade, que o programa resolveu em um tempo médio de 21 segundos. Já os modelos tridimensionais, com elementos SOLID185 e SOLID186, compostos por cerca de 134576 elementos, com 146241 nós, gerou um sistema com 438723 graus de liberdade resolvido em um tempo aproximado de 25000 segundos, cerca de 7 horas. Este tempo, porém, variou conforme o caso analisado, se em elasticidade ou plasticidade, se revestido ou não, entre outras variações. A quantidade de passos de escavação e colocação de revestimento também influi no tempo de processamento, pois numericamente representa a quantidade de iterações que será feita sobre o equilíbrio do sistema.

É bastante complexo estabelecer um comparativo entre esses tempos de processamento visto que são modelos com fins muito distintos, porém a qualidade dos resultados em axissimetria em um curto tempo tornam o modelo bastante adequado para gerar valores de referência para estudos mais complexos ou até para gerar estudos preliminares de um túnel. Um exemplo de *script* completo em APDL para um modelo tridimensional utilizado nas análises está presente no Anexo A deste trabalho.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve por objetivos principais a realização de um estudo paramétrico sobre túneis gêmeos com galerias transversais, utilizando-se uma modelagem numérica tridimensional, verificando os efeitos da alteração de alguns parâmetros sobre a convergência dos túneis. Também se tinha por objetivo o desenvolvimento de um *script* em linguagem APDL para o *software* ANSYS para a análise desses túneis, considerando-se alguns comportamentos para maciços e revestimentos. Durante a execução do trabalho, foram feitas diversas verificações e validações dos modelos construídos, comparando-os com resultados provenientes de soluções analíticas e produzidas com o *software* GEOMECC91. Considerou-se o maciço em elasticidade e plasticidade com e sem a colocação de revestimento elástico. Por fim, foram feitas diversas análises sobre as influências da alteração de alguns parâmetros, como as distâncias entre os túneis gêmeos e entre as galerias transversais.

Através dos resultados obtidos nas análises, comparando-se com os valores de referência para validação, é possível afirmar que o *software* ANSYS é adequado para esse tipo de análise de túneis. Adotando-se a plasticidade de Tresca no GEOMECC91, utilizou-se então no ANSYS a plasticidade de Von Mises, sendo apresentada uma relação de aproximação da coesão entre as duas superfícies, tendo os resultados demonstrado uma ótima concordância.

Nos estudos feitos com modelos bidimensionais em axissimetria, fez-se a validação com as soluções analíticas para os casos sem revestimento e também foi feita a comparação com os valores produzidos pelo GEOMECC91 para alguns casos com aplicação de revestimento elástico. Para todos estes casos, os resultados foram muito próximos, com diferenças da ordem de 1%. Embora bastante simplificado em relação à situação real de um túnel, as análises realizadas com esse modelo podem ser levadas em conta para estudos preliminares ou mesmo de pré-dimensionamento de uma estrutura real.

Concluídos os estudos de validação com modelos bidimensionais em axissimetria, iniciou-se o estudo com modelos tridimensionais, partindo de um modelo com túneis gêmeos paralelos longitudinalmente. Para este conjunto de análises, novamente foi tomada uma série de variações de modelos constitutivos, túneis com ou sem revestimentos, levando os resultados obtidos dos modelos bidimensionais como valores de referência para a ordem de grandeza dos valores de convergência de equilíbrio. Com os resultados, foi possível identificar uma clara relação entre o afastamento entre os túneis e a convergência de equilíbrio, sendo que quanto mais afastados

os túneis, menor a convergência se tornava, até que a um afastamento grande o suficiente a convergência retorna ao valor aproximado ao de um único túnel, ou seja, um túnel para de ter influência sobre a convergência do outro.

Por fim, acrescentou-se ainda aos modelos tridimensionais as galerias transversais fazendo ligações entre os túneis longitudinais. Validou-se a convergência das galerias também com os valores de referência das soluções analíticas e do GEOMEQ91, encontrando também resultados bastante aproximados para este caso. Nesta validação, foi possível notar a diferença sobre as curvas de convergência da região onde os elementos tetraédricos utilizados possuem funções de interpolação do tipo quadrático, visto que isso gerou alguns ruídos nas curvas. Porém isso não foi um problema, já que para a convergência adota-se valores médios da região em que a curva atinge um patamar.

Concluído o modelo completo, foi realizado um estudo dos afastamentos entre os túneis longitudinais e as galerias transversais, mostrando a influência desses afastamentos sobre as curvas de convergência. As análises foram feitas variando-se os afastamentos nos dois sentidos, formando diversas combinações entre eles, visto que o problema é de natureza tridimensional, sendo as soluções acopladas nas duas direções, por isso sendo necessária uma avaliação conjunta dos resultados, especialmente na região do encontro dos túneis com as galerias transversais. Foi verificada também que há influência do tamanho do raio da galeria sobre a convergência desta região, bem como uma influência da convergência das galerias na convergência dos túneis longitudinais, sendo que no caso de um afastamento pequeno entre as galerias, a curva de uma galeria passa a interferir na da galeria adjacente e também pode ocorrer a interferência de efeitos de borda, caso a galeria esteja a poucos passos de escavação das extremidades do túnel longitudinal. Para o caso do túnel gêmeo com afastamento considerável tanto entre os túneis quanto entre as galerias, constatou-se que a curva de convergências possui um claro patamar de equilíbrio, mesmo no caso do maciço em plasticidade, destacando-se apenas dois picos bem definidos nas posições correspondentes às galerias transversais, acentuando-se essas curvas nos casos em que não foi aplicado o revestimento, cuja rigidez diminui a convergência.

Para o modelo tridimensional com todas as informações destacou-se ainda algumas das funções desenvolvidas no *script* para visualização de resultados, como campos de deslocamentos e tensões. Para o caso apresentado ficou visível que tanto os deslocamentos quanto as tensões sofreram maiores variações nas regiões imediatamente ao redor do túnel, com menores

variações próximas às bordas do modelo, diminuindo de forma radial gradualmente entre essas duas regiões. É possível tanto nos campos de tensões quanto nos de deslocamentos verificar que a união dos túneis com as galerias é um ponto crítico, onde ocorrem as maiores variações. Levando isso em consideração, é possível dizer que a malha está bastante otimizada, refinada exatamente nas regiões em que se tem as maiores variações de tensões e deslocamentos. Foi possível identificar também para tensões e deslocamentos, a influência de um túnel longitudinal sobre o outro, gerando variações na parede oposta ao túnel gêmeo, de maneira similar isso ocorre entre as galerias.

Visando otimizar o modelo e reduzir o custo computacional, os modelos foram desenvolvidos seguindo uma sequência lógica, acrescentando-se detalhes ou recursos somente no caso de o modelo imediatamente anterior apresentar resultados satisfatórios, tendo em vista evitar que fossem necessárias correções e reexecução dos modelos mais complexos que levavam horas para rodar. Os tempos variaram bastante conforme a complexidade do modelo, chegando a tempos de processamento totais superiores a 7 horas, um tempo ainda assim bastante razoável levando em consideração o tamanho dos sistemas a serem resolvidos e a qualidade dos resultados apresentados.

Como algumas sugestões para trabalhos futuros e linhas de pesquisa similares à desenvolvida nesta dissertação pode-se listar:

- a) análise de efeitos diferidos no tempo, considerando-se por exemplo um modelo constitutivo em viscoplasticidade para o maciço, além de considerar outros modelos constitutivos, como o de Mohr-Coulomb, por exemplo;
- b) aplicação de revestimentos viscoelásticos, como um modelo em concreto personalizado;
- c) considerar a estratificação do maciço, com heterogeneidade entre os solos de cada camada e composições rochosas;
- d) aplicação de outros tipos de carregamentos, como cargas dinâmicas e de sismos;
- e) considerar outros formatos de seção transversal e incluir nos *scripts* opções de escavações parciais da seção;
- f) fazer um estudo paramétrico variando a rigidez do revestimento e a distância não suportada d_0 ;
- g) implementar um algoritmo com o uso de *machine learning* para otimizar a determinação dos afastamentos ideais entre túneis gêmeos;

- h) considerar outras sequências de escavação, como por exemplo um modelo simulando as escavações dos túneis paralelos em tempos diferentes;
- i) comparar os resultados obtidos através de análises numéricas com critérios estabelecidos por normas.

REFERÊNCIAS

ALSHKANE, Y.M.; RASHED, K.A.; DAOUD, H.S. **Unconfined Compressive Strength (UCS) and Compressibility Indices Predictions from Dynamic Cone Penetrometer Index (DCP) for Cohesive Soil in Kurdistan Region/Iraq**. *Geotech Geol Eng* 38, 3683–3695, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01245-1>

ANSYS, Inc. **Element Reference**. Release 14.0, 2011.

ARAÚJO SILVA, P. F. **Concreto Projetado para Túneis**. PINI, Ed., 1ª Edição, São Paulo, 1997.

BERGMEISTER, Konrad. Brenner Basistunnel im Bau. **Tunnel**, p. 18–30, 2012. Disponível em: https://www.tunnel-online.info/en/artikel/tunnel_2012-01_Brenner_Base_Tunnel_under_Construction_1370791.html.

BENAMAR, I.; BERNAUD, D.; ROUSSET, G. La « nouvelle méthode implicite » pour le calcul des tunnels dans les milieux élastoplastiques et viscoplastiques. **Revue Française de Géotechnique**, n. 68, 3o trimestre, p. 3-19, 1994.

BERNAUD, D.; ROUSSET, G. La « nouvelle méthode implicite » pour l'étude du dimensionnement des tunnels. **Revue Française de Géotechnique**, p. 5–26, jul. 1992.

BERNAUD, D. **Tunnels profonds dans les milieux viscoplastiques**: approches expérimentale et numérique. 1991. 387 f. Tese (Doutorado) – École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris. 1991.

CANCELA, T. J. A. **Movimentos Associados à Construção de Dois Túneis Gémeos**. 2015. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Portugal, 2015.

CORBETTA, F. **Nouvelles méthodes d'étude des tunnels profonds: calculs analytiques et numériques**. 1990. 188 f. Tese (Doutorado) – École Nationale Supérieure des mines, Paris. 1990.

EUROPEAN COMISSION. **Assessment of unit costs (standard prices) of rail projects (Capital Expenditure)**. Annex 13 – Case study on tunnels. 2018. Disponível em: https://ec.europa.eu/regional_policy/en/information/publications/reports/2018/assessment-of-unit-costs-standard-prices-of-rail-projects-capital-expenditure.

FRANÇA, P. T. **Estudo Do Comportamento De Túneis - Análise Numérica Tridimensional com Modelos Elasto-Plásticos**, 2006. 206 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

FU, Jinyang et al. An analytical solution for deforming twin-parallel tunnels in an elastic half

plane. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 39, n. 5, p. 524–538, 2015. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/nag.2322>>.

HANANE, Djemai. **Consequences of tunneling by the New Austrian Tunneling Method (NATM) in urban areas on ground surface**. 2018. Project Theme. Universidade de Ciência e Tecnologia Houari-Boumediene, Bab Ezzouar, Argélia.

IMGUR. **Banco de imagens**, 2019. Disponível em: <<http://i.imgur.com/0qyhCkf.jpg>>. Acesso em: 8 de jun. de 2019.

ITA WORKING GROUP ON GENERAL APPROACHES TO THE DESIGN OF TUNNELS. **Guidelines for the design of tunnels**. Tunnelling and Underground Space Technology, v. 3, n. 3, p. 247-149, 1988.

JENSEN, Betina Mariano. **Modelagem tridimensional em elementos finitos de túneis superficiais revestidos em concreto armado**. 2019. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

KARAKUS, M.; FOWELL, R. J. An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM), **The 7th Regional Rock Mechanics Symposium**, Sivas, Volume: Sivas, Turquia, 2004.

MAFFEI, Carlos Eduardo Moreira. Análise dos Modelos para Cálculo de Suportes e Revestimentos. ANAIS DO SIMPÓSIO SOBRE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS - VOL I 1982, Rio de Janeiro. **Proceedings...**, v.1, p. 157-184, 1982.

MARQUES, E. O. R. **Simulação Numérica da construção de Túneis: Análises Bidimensionais versus Análises Tridimensionais**. 2014. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Portugal, 2014.

MOHAMMED, J.; HRUBESOVA, E. Numerical Modelling for Twin Horizontal Circle Tunnels Under Static and Dynamic Loads. **GCEC 2017, Lecture Notes in Civil Engineering**, vol. 9., p. 111-124, Pradhan B, Springer, Singapore, maio de 2018.

MOREIRA, C. M. DA C. Túneis, uma herança ancestral rumo ao futuro. **A obra nasce: revista de Arquitetura da Universidade Fernando Pessoa**, p. 92–115, Jan. 2006.

MOURATIDIS, A. The “cut-and-cover” and “cover-and-cut” techniques in highway engineering. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)**, n. 13, Bundle F, p. 1–15, 2008.

NADER, J. J. **Breve curso de modelos elastoplásticos**. Clube de Autores, São Paulo, 2015. 120p

NAMLI, Mucahit. Effect of Changing the Tunneling Methodology From Natm To Tbm on the Cost and the Duration in Uskudar – Umraniye- Cekmekoy Metro Project. 2nd International Conference on Tunnel Boring Machines in Difficult Grounds (TBM DIGs Istanbul), **Proceedings**, p. 16–18, Istanbul, novembro de 2016.

QUEVEDO, F. P. da M. **Comportamento a Longo Prazo de Túneis Profundos Revestidos com Concreto: Modelo em Elementos Finitos**. 2017. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ROCKEY, K.C.; EVANS, H.R.; GRIFFITHS, D.W.; NETHERCOT, D.A. **The finite element method**. 2nd.ed. London: Collins Professional and Technical Books, 1983. 239p

SIAHMANSOURI, Asghar; GHOLAMNEJAD, Javad; MARJI, Mohammad Fatehi. A hybridized numerical and regression method for estimating the minimum rock pillar width of twin circular tunnels. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7, n. 3, p. 1059–1066, 2014. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12517-012-0751-y>

SILVA, M. A. A. P. da. **Simulações Numéricas para Escavações Subterrâneas**. São José dos Campos, 2008. Tese de Mestrado - Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

SONG, Haiqing; CAI, Haibing; YAO, Zhishu; RONG, Chuanxin; WANG, Xiaojian. Finite Element Analysis on 3D Freezing Temperature Field in Metro Cross Passage Construction. **Procedia Engineering**, v. 165, p. 528–539, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816340905>>. Acesso em: 23 jul. 2019.

TATIYA, Ratan. **Civil excavations and tunnelling - a practical guide**. Thomas Telford, 2005. Disponível em: <<https://books.google.ru/books?id=BJl6x4FANi0C>>

TÚNEL NATM. **Portal Metálica**: construção civil, 2019. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/tunel-natm>>. Acesso em: 20 de jun. de 2019.

UK GOVERNMENT. **High Speed Two Fase 2a Information Paper**. 2019. Disponível em: <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/779305/F2_Phase_2a_Tunnels_v1.1.pdf>.

VETSCH, Hans-Peter; ZBINDEN, Peter; MÄRKI, Ernst; EHRBAR, Heinz. Gotthard Base Tunnel - Choice of the tunnel system from today's point of view / Gotthard-Basistunnel - Wahl des Tunnelsystems aus heutiger Sicht. **Geomechanics and Tunnelling**, v. 9, n. 2, p. 79–93, 2016. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/geot.201600006>>.

VOJKOVSKÝ, Aleš. **Analysis of the Surface Settlement According the Specific Factors of the Driving Based on the EPB Shield**. 2013. Diploma Thesis. Universidade Técnica de Ostrava, República Tcheca.

WANG, H. N.; ZENG, G. S.; UTILI, S., JIANG, M. J.; WU, L. Analytical solutions of stresses and displacements for deeply buried twin tunnels in viscoelastic rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 93, p. 13–29, 2017.

WANG, Ya-qiong; XU, Shuoshuo; ZHANG, Shuangzhuo; REN, Zhaodan. Application of the twin-tube complementary ventilation system in large-slopping road tunnels in China. **International Journal of Ventilation**, p. 1–20, 2019. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14733315.2018.1549305>>

ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. **The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics**. 6^a ed., Elsevier, 2005.

ZHANG, Jinghua; YUAN, Yong; BAO, Zhen; YU, Haitao; BILOTTA, Emilio. Shaking table tests on the intersection of cross passage and twin tunnels. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 124, p. 136–150, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726119301356?via%3Dihub>>. Acesso em: 23 jul. 2019.

ZHOU, Hui; GAO, Yang; ZHANG, Chuanqing; YANG, Fanjie; HU, Mingming; LIU, Haitao; JIANG, Yue. A 3D model of coupled hydro-mechanical simulation of double shield TBM excavation. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 71, p. 1–14, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0886779816306885>>.

APÊNDICE A – SCRIPT APDL TÚNEIS GÊMEOS COM GALERIAS

```

!*****!
!** PROGRAMA ANÁLISE TUNEL DUPLO (MODELO 3D) **!
!** Versão: 3.00 **!
!** **!
!** Objetivo: faz análise da convergência de túneis **!
!**          profundos com seção circular dupla **!
!**          com galerias transversais **!
!**          considerando um modelo 3D **!
!** **!
!** Programador: Tiago Wagner Dada **!
!** Situação : OK (06/09/2020) **!
!** Unidades : kN,cm,s **!
!** **!
!*****!
!
!*****!
! 1. Inicializando o Ansys !
!*****!
FINISH
/CLEAR,NOSTART
!
!*****!
! 1.1 Pasta que guardará os arquivos da análise !
!*****!
diretorio = 'C:\dissertacao\plast1680'
!
! Obs: nessa pasta será salvo os arquivos file.* e *.jpeg
! criados durante a análise. Tem que ser uma pasta existente
! no PC. Caso o programa não encontre a pasta os arquivos serão
! salvos na pasta padrão.
!
!*****!
! 1.2 Nome dos arquivos de saída !
!*****!
arqconv = 'D116'
!
! Obs: nome do arquivo de texto com os dados da convergência
! no final da construção e no final da análise.
!
!*****!
! 2. Dados de entrada do problema !
!*****!
!
! nessa seção define-se todos os dados de entrada necessarios
! para as análises
!
!*****!
! 2.1 Dados de entrada geométricos !
!*****!
! referente aos tuneis longitudinais
re = 100 ! [cm] raio da face externa do revestimento dos tuneis longitudinais
ri = 90 ! [cm] raio da face interna do revestimento dos tuneis longitudinais
p = 1/3*re ! [cm] passo de escavação dos tuneis longitudinais
d0 = 2*p ! [cm] dimensão não suportada dos tuneis longitudinais (deve ser necessariamente
multiplo do passo p)
escini = 3 ! [un] numero de passos escavados na primeira escavação dos tuneis longitudinais
v = 10 ! [m/dia] velocidade de escavação dos tuneis longitudinais. Obs: a velocidade de
escavação é considerada constante.
!
! referente as galeiras transversais
re1 = 2*p ! [cm] raio da face externa do revestimento das galerias transversais (deve ser
multiplo do passo p)
ri1 = re1-10 ! [cm] raio da face interna do revestimento das galerias transversais
p1 = 1/3*re1 ! [cm] passo de escavação das galerias transversais (tem que ser multiplo de
(d1/2+re))
d01 = 2*p1 ! [cm] dimensão não suportada das galerias transversais (deve ser multiplo do
passo p1)
escini1 = 3 ! [un] numero de passos escavados na primeira escavação das galerias
v1 = 10 ! [m/dia] velocidade de escavação das galerias

```

```

!
! referente ao tunel longitudinal e transversal
d1 = 16*re ! [cm] distância entre eixos dos túneis longitudinais (tem que ser multiplo de (d1/2-re)/p1)
d2 = 80*p ! [cm] distância entre eixos de galerias transversais (tem de ser multiplo do passo p)
d3 = 20*re ! [cm] distância da borda superior do modelo até o eixo do tunel longitudinal, ou seja,
altura do modelo
d4 = 20*re ! [cm] distância das bordas laterais do modelo até o eixo do tunel longitudinal, ou seja,
base do modelo
l1 = 52*p ! [cm] comprimento do trecho não escavado (deve ser suficiente para captar os efeitos na
frente de escavação)
!
!*****!
! 2.2 Dados de entrada referente ao Solo !
!*****!
! Tipo de material
!      1 - Ansys_Elastico
!      2 - Ansys_Plastico_Von-Mises
!
!
!*****!
! 2.3 Dados de entrada referente ao Revestimento !
!*****!
! Tipo de material
!      0 - Sem revestimento
!      1 - Ansys_Elastico
!
!
!*****!
! 2.4 Dados referente a análise !
!*****!
pr = 0.4 ! [kN/cm²] tensões iniciais (Cxx,Cyy,Czz) e pressão
geostáticas hidrostáticas aplicadas na frente do modelo
v = 1 ! [m/dia] velocidade da escavação. Obs: a velocidade de
escavação é considerada constante.
tintervalo = 20 ! [dias] numero de dias por intervalo no final da construção
nintervalo = 1 ! [un] numero de intervalos de dias no final da construção
dt = 20 ! [dias] incremento de tempo durante o cálculo
dtmax = dt ! [dias] incremento de tempo máximo durante o cálculo
revestirultimod = 0 ! 0 - não reveste ultimo d0+p, 1 - reveste ultimo d0+p
revesteface = 0 ! 0 - não reveste a face, 1 - reveste a face
escavagaleria = 1 ! escavação das galerias: 0 - não escava, 1 - escava
revestegaleria = 0 ! revestimento da galeria: 0 - não reveste, 1 - reveste
pig1 = d2/(2*p)+5 ! [un] numero de passos de escavação do tunel longitudinal a
partir do qual iniciará a escavação da galeria 1
pig2 = d2/(2*p)+5 ! [un] numero de passos de escavação do tunel longitudinal a
partir do qual iniciará a escavação da galeria 2
!
!*****!
! 2.5 Dados referente ao elemento finito !
!*****!
modelelem = 1 ! modelo do elemento: 1 - SOLID185, 2 - SOLID186
!
!*****!
! 2.6 Dados referente a divisão da malha !
!*****!
m1 = p ! [cm] tamanho do elemento ao longo do eixo do tunel longitudinal no trecho
escavado
m2 = 8 ! [un] numero de elementos na interface entre solo e revestimento do tunel
longitudinal (deve ser par)
m3a = m2/2 ! [un] numero de elementos na horizontal e vertical da região de solo
escavado no tunel longitudinal
m3b = 0 ! [adm] taxa de crescimento
m4a = ((d1/2)-re)/p1 ! [un] numero de elementos na horizontal e vertical contigua ao tunel
longitudinal
m4b = 0 ! [adm] taxa de crescimento

```

```

m5a = 8          ! [un] numero de elementos na horizontal e vertical contigua a região próxima do
tunel longitudinal
m5b = 0          ! [adm] taxa de crescimento
m6 = m2/2       ! [un] numero de elementos na horizontal e vertical oposta ao tunel
longitudinal
m7 = 6          ! 10 [un] numero de elementos na casca da galeria transversal
m8 = 2          ! [un] numero de elementos na espessura do revestimento do tunel longitudinal
m9 = p          ! [cm] tamanho dos elementos na região do tunel oposta a galeria
m10a = 20       ! [un] numero de elementos ao longo do eixo do tunel longitudinal no trecho não
escavado
m10b = 5        ! [adm] taxa de crescimento
m11 = 2         ! [un] numero de elementos na espessura do revestimento da galeria

!
!*****!
! 2.7 Saida de dados          !
!*****!
escala                = 20          ! fator de escala da deformada
isosup                = 0          ! 0 - normal, 1 - isosuperficie
iso                   = 0          ! 0 - contorno padrão, 1 - isolinhas (apenas 0 se isosup=1)
flag1                 = 1          ! 1 - saida jpg de campos de deslocamentos em X
flag2                 = 1          ! 1 - saida jpg de campos de deslocamentos em Y
flag3                 = 1          ! 1 - saida jpg de campos de deslocamentos resultantes
flag4                 = 1          ! 1 - saida jpg de campos de tensões em X
flag5                 = 1          ! 1 - saida jpg de campos de tensões em Y
flag6                 = 1          ! 1 - saida jpg de campos de tensões em XY
flag7                 = 1          ! 1 - saida jpg de campos de tensões em XZ
flag8                 = 1          ! 1 - saida jpg de campos de tensões em YZ
flag9                 = 1          ! 1 - saida jpg de campos de tensões principais 1
flag10                = 1         ! 1 - saida jpg de campos de tensões principais 2
flag11                = 1         ! 1 - saida jpg de campos de tensões principais 3
flag12                = 1         ! 1 - saida jpg de campos de tensões resultantes
flag13                = 1         ! 1 - saida jpg de campos de tensões equivalentes de Von-
Mises
flag14                = 1         ! 1 - saida jpg de campos de tensões pressão hidrostática
flag15                = 1         ! 1 - saida jpg do gráfico de convergência em arquivo
flag16                = 1         ! 1 - saida txt do arquivo de resultados do gráfico de
convergência
flag17                = 1         ! 1 - saida do gráfico de convergência na tela do Ansys
!
! Obs: os arquivos de imagem jpg saem com o nome jobname###.jpg
! onde ### é um inteiro que vai incrementando a partir da última
! numeração do último arquivo plotado.
! Os campos de resultados serão referentes ao final da análise.
!
!*****!
! 2.8 Titulo e nome dos arquivos (jobname)          !
!*****!
! defini titulo na tela do Ansys
/TITLE, Re=%Re% mods=%modsolo% Es=%Esolo% pr=%pr% modrev=%modrev% Er=%Erev% v=%v%
!
! define nome file.* para os arquivos da analise
/FILNAME,file,0
!
!-----FIM ENTRADA DE DADOS-----!
!
!*****!
! 3. Pré-Processamento          !
!*****!
/PREP7                          ! inicia módulo de pré-processamento
!
!*****!
! 3.1 Calculos iniciais          !
!*****!
l2 = 2*d2                        ! [cm] comprimento escavado
lt = l1+l2                       ! [cm] comprimento total do modelo ao longo do eixo longitudinal
l3 = (d1/2+d4)*2                 ! [cm] dimensão transversal do modelo
npassos = l2/p                   ! [un] numero total passos escavados nos tuneis
longitudinais
nesc = npassos-escini+1          ! [un] total de escavações ao longo do eixo do tunel longitudinal
npassos1 = (d1/2-re)/p1          ! [un] total de passos escavados nas galerias transversais
nesc1 = npassos1-escini1+1       ! [un] total de escavações ao longo do eixo das galerias
transversais

```

```

Ysolo      = 2*C                ! [kN/cm2] limite de elasticidade para o modelo bilinear
(Ysolo=2*C) (valido para modsolo=1,2,3)
t          = p/(v*100)         ! [dias] tempo para fazer um passo de escavação nos tuneis
longitudinais
t1         = p1/(v1*100)       ! [dias] tempo para fazer um passo de escavação nas galerias
transversais
tfinal     = tintervalo*nintervalo ! [dias] tempo máximo para a estabilização após construção
sigmaesc   = 2*c               ! [kN/cm2] tensão de escoamento do modelo (2 vezes a coesão)
!
! calculo do qual imprimirá os resultados (não há a atualização da malha)
*IF,escavagaleria,EQ,1,THEN
    calcresul = nesc+2*nesc1
*ELSE
    calcresul = nesc
*ENDIF
!
!*****!
! 3.2 Configurando Elemento finito !
!*****!
*IF,modelelem,EQ,2,THEN
    ET,1,SOLID186
*ELSE
    ET,1,SOLID185
*ENDIF
!
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,6,0
!
!*****!
! 3.3 Material solo !
!*****!
*IF,modsolo,EQ,1,THEN
    MPTEMP,1,0
    MPDATA,EX,1,,Esolo
    MPDATA,PRXY,1,,nusolo
*ELSEIF,modsolo,EQ,2,THEN
    MPTEMP,1,0
    MPDATA,EX,1,,Esolo
    MPDATA,PRXY,1,,nusolo
    TB,BISO,1,1,2,
    TBTEMP,0
    TBDATA,,sigmaesc,Tgsolo,,
*ENDIF
!
!*****!
! 3.4 Material do revestimento !
!*****!
*IF,modrev,EQ,1,THEN
    *DO,i,2,nesc,1
        MPTEMP,1,0
        MPDATA,EX,i,,Erev
        MPDATA,PRXY,i,,nurev
    *ENDDO
*ENDIF
!
!*****!
! 3.5 Modelando o sólido !
!*****!
!
! Definindo a vista
/VIEW,1,1,1,1
/ANG,1
!
! criando bloco e casca cilindrica do trecho escavado
BLC4,-d4,0,l3/2,d3,l1
CYL4,0,0,ri,0,re,180,l1
!
! criando bloco e casca cilindrica do trecho que não será escavado
WPOFFS,0,0,l1
BLC4,-d4,0,l3/2,d3,l2
CYL4,0,0,ri,0,re,180,l2
!
! excluindo volumes em comum

```

```

VPTN,ALL
!
! tolerancia para operações booleanas
BTOL,1E-4
!
! dividindo os volumes no plano vertical do eixo do tunel principal
WPOFFS,0,0,0
WPRO,,90.000000
VSBW,ALL
!
! dividindo o volume entre tuneis na altura
VSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,0,d1/2
WPOFFS,0,d1/2,0
WPRO,,90,
VSBW,ALL
!
! criando o mesmo volume no lado oposto do plano vertical do eixo do tunel
VSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,0,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d1/2
VSEL,U,LOC,X,0,re
VSYMM,X,ALL,,0,1,0
!
! criando primeiro tunel transversal
WPAVE,0,0,0
WPCSYS,-1,0
WPOFFS,0,0,lt-d2/2
WPRO,,90
CYL4,0,0,ri1,0,re1,180,d1/2
!
! criando o segundo tunel transversal
WPOFFS,d2,0,0
CYL4,0,0,ri1,0,re1,180,d1/2
!
! criando plano de corte da galeria transversal
VSEL,ALL
VSEL,S,LOC,Z,l1,lt
VSEL,R,LOC,X,ri/2,re
ASEL,S,EXT
CSYS,1
ASEL,R,LOC,X,re,re
CM,A0,AREA
!
! cortando a galeria transversal
CSYS,0
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,Z,l1,lt
VSEL,R,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,re
VSBA,ALL,A0
!
! deletando trecho da galeria transversal dentro do tunel longitudinal
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,Z,lt-d2/2,lt-d2/2
VSEL,R,LOC,X,0,re
VSEL,R,LOC,Y,0,re1
VDELE,ALL,,1
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,Z,lt-d2/2-d2,lt-d2/2-d2
VSEL,R,LOC,X,0,re
VSEL,R,LOC,Y,0,re1
VDELE,ALL,,1
!
! cortando trecho do tunel principal
VSEL,ALL
WPAVE,0,0,0
WPRO,,-90
WPOFFS,0,0,(lt-d2/2)+re1+p
VSBW,ALL
WPOFFS,0,0,-2*re1-2*p
VSBW,ALL
WPAVE,0,0,0

```

```

WPOFFS,0,0,(lt-d2/2)-d2+re1+p
VSBW,ALL
WPOFFS,0,0,-2*re1-2*p
VSBW,ALL
!
! particionando outros volumes
VSEL,ALL
VPTN,ALL
!
! juntando pontos duplicados
NUMMRG,KP, , , ,LOW
!
! renumerando a geometria
NUMCMP,KP
NUMCMP,LINE
NUMCMP,AREA
NUMCMP,VOLU
!
!*****!
! 3.6 Definindo divisões para a malha nas linhas !
!*****!
!
! tamanho do elemento ao longo do eixo do tunel longitudinal no trecho escavado
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,lt-1,lt-d2/2+re1+p+1
LSEL,R,LOC,X,-d1/2,d1/2
LSEL,R,LOC,Y,0,d1/2
LESIZE,ALL,m1, , , , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,lt-d2/2-re1-p-1,lt-d2/2-d2+re1+p+1
LSEL,R,LOC,X,-d1/2,d1/2
LSEL,R,LOC,Y,0,d1/2
LESIZE,ALL,m1, , , , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,lt-d2/2-d2-re1-p-1,lt-2*d2+1
LSEL,R,LOC,X,-d1/2,d1/2
LSEL,R,LOC,Y,0,d1/2
LESIZE,ALL,m1, , , , , ,1
!
! interface entre solo e revestimento do tunel longitudinal
CSYS,1
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,1,re
LSEL,R,LOC,Y,1,180-1
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LSEL,U,LOC,Y,89,91
LSEL,U,LOC,Z,lt-d2/2+re1-1,lt-d2/2-re1+1
LSEL,U,LOC,Z,lt-d2/2-d2+re1-1,lt-d2/2-d2-re1+1
LESIZE,ALL, , ,m2, , , , ,1
!
! horizontal e vertical contigua ao tunel longitudinal
CSYS,1
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,ri-1
LSEL,R,LOC,Y,0,180
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LSEL,U,LOC,Z,lt-1,lt-d2/2+re1+1
LSEL,U,LOC,Z,lt-d2/2-re1-1,lt-d2/2-d2+re1+1
LSEL,U,LOC,Z,lt-d2/2-d2-re1-1,lt-d2/2-d2-d2/2+1
LSEL,U,LOC,Z,l1-1,1
LSEL,U,LOC,Z,lt-d2/2+1,lt-d2/2-1
LSEL,U,LOC,Z,lt-d2/2-d2+1,lt-d2/2-d2-1
LESIZE,ALL, , ,m3a,m3b, , , , ,1
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,ri-1
LSEL,R,LOC,Y,0,180
LSEL,R,LOC,Z,0,1
LREVERSE,ALL
LSEL,ALL

```



```

LSEL,S,LOC,X,1,ri-1
LSEL,R,LOC,Y,0,1
LSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2+re1+1,lt-d2/2-d2-re1-1
LREVERSE,ALL
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,ri-1
LSEL,R,LOC,Y,0,180
LSEL,R,LOC,Z,lt,lt-1
LSEL,U,LOC,Y,89,91
LREVERSE,ALL
!
! horizontal e vertical contigua ao tunel longitudinal
CSYS,1
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,re+1,d1/2-1
LSEL,R,LOC,Y,0,180
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LESIZE,ALL, , ,m4a, , , ,1
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,re+1,d1/2-1
LSEL,R,LOC,Y,0,1
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LREVERSE,ALL
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,re+1,d1/2-1
LSEL,R,LOC,Y,89,91
LSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2+re1+1,lt-d2/2-d2-re1-1
LREVERSE,ALL
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,re+1,d1/2-1
LSEL,R,LOC,Y,180,180-1
LSEL,R,LOC,Z,0,l1+1
LREVERSE,ALL
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,-ri-1,ri-1
LSEL,R,LOC,Y,0,180
LSEL,R,LOC,Z,0,0
LSEL,U,LOC,Y,89,91
LREVERSE,ALL
!
! horizontal e vertical contigua a região do tunel longitudinal
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,-d1/2-1,-d4+1
LSEL,R,LOC,Y,0,1
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LESIZE,ALL, , ,m5a,m5b, , , ,1
LREVERSE,ALL
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,-d1/2-1,-d4+1
LSEL,R,LOC,Y,0,1
LSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2+re1+1,lt-d2/2-d2-re1-1
LREVERSE,ALL
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,d1/2
LSEL,R,LOC,Y,d1/2+1,d3-1
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LREVERSE,ALL
LESIZE,ALL, , ,m5a,m5b, , , ,1
!
! horizontal e vertical oposta ao tunel longitudinal
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,-d1/2+1,-d1/2-1
LSEL,R,LOC,Y,1,d1/2-1
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LESIZE,ALL, , ,m6, , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,d1/2+1,d1/2-1
LSEL,R,LOC,Y,1,d1/2-1

```

```

LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LESIZE,ALL, , ,m6, , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,1,d1/2-1
LSEL,R,LOC,Y,d1/2-1,d1/2+1
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LESIZE,ALL, , ,m6, , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,-1,-d1/2+1
LSEL,R,LOC,Y,d1/2-1,d1/2+1
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LESIZE,ALL, , ,m6, , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,-1,-d4+1
LSEL,R,LOC,Y,d3-1,d3+1
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LESIZE,ALL, , ,m6, , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,-d4-1,-d4+1
LSEL,R,LOC,Y,1,d3-1
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LESIZE,ALL, , ,m6, , , ,1
!
! tamanho dos elementos na casca da galeria transversal
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,lt-d2/2+ri1-1,lt-d2/2-ri1+1
LSEL,R,LOC,X,1,d1/2
LSEL,R,LOC,Y,0,re1+1
LESIZE,ALL, , ,m7, , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,lt-d2/2-d2+ri1-1,lt-d2/2-d2-ri1+1
LSEL,R,LOC,X,1,d1/2
LSEL,R,LOC,Y,0,re1+1
LESIZE,ALL, , ,m7, , , ,1
!
! espessura do revestimento do tunel longitudinal
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,ri+1,ri-1
LSEL,R,LOC,Y,0,1
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LESIZE,ALL, , ,m8, , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,-ri-1,-re+1
LSEL,R,LOC,Y,0,1
LSEL,R,LOC,Z,0,lt
LESIZE,ALL, , ,m8, , , ,1
!
! tamanho dos elementos na região do tunel oposta a galeria
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,-d4
LSEL,R,LOC,Y,0,d3
LSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2+re1-1,lt-d2/2-re1+1
LESIZE,ALL,m9, , , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,-d4
LSEL,R,LOC,Y,0,d3
LSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2+re1-1,lt-d2/2-d2-re1+1

```

```

LESIZE,ALL,m9, , , , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,ri
LSEL,R,LOC,Y,0,1
LSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2+re1-1,lt-d2/2-re1+1
LESIZE,ALL,m9, , , , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,X,0,ri
LSEL,R,LOC,Y,0,1
LSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2+re1-1,lt-d2/2-d2-re1+1
LESIZE,ALL,m9, , , , , ,1
!
! elementos ao longo do eixo do tunel longitudinal no trecho não escavado
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,1,lt-2*d2-1
LSEL,R,LOC,X,-d4+1,d1/2
LSEL,R,LOC,Y,0,d3
LREVERSE,ALL
LESIZE,ALL, , ,m10a,m10b, , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,1,lt-2*d2-1
LSEL,R,LOC,X,-d4,-d4+1
LSEL,R,LOC,Y,0,d3
LREVERSE,ALL
LESIZE,ALL, , ,m10a,1/m10b, , , ,1
!
! espessura do revestimento do tunel longitudinal

CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,lt-d2/2+re1-1,lt-d2/2+ri1+1
LSEL,R,LOC,X,d1/2-1,d1/2
LSEL,R,LOC,Y,0,1
LESIZE,ALL, , ,m11, , , , ,1
!
CSYS,0
LSEL,ALL
LSEL,S,LOC,Z,lt-d2/2-d2+re1-1,lt-d2/2-d2+ri1+1
LSEL,R,LOC,X,d1/2-1,d1/2
LSEL,R,LOC,Y,0,1
LESIZE,ALL, , ,m11, , , , ,1
!
!*****!
! 3.7 Concatenando áreas para fazer malha mapeada !
!*****!
!
! primeiro trecho
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt,lt-d2/2+re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,d1/2
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt,lt-d2/2+re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d1/2
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2

```

```

VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt,lt-d2/2+re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,-d1/2
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt,lt-d2/2+re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d1/2
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt,lt-d2/2+re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,-d4
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt,lt-d2/2+re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d3
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
! segundo trecho
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-re1,lt-d2/2-d2+re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,d1/2
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-re1,lt-d2/2-d2+re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d1/2
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-re1,lt-d2/2-d2+re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,-d1/2
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-re1,lt-d2/2-d2+re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d1/2
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2

```

```

VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-re1,lt-d2/2-d2+re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,-d4
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-re1,lt-d2/2-d2+re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d3
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
! terceiro trecho
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2-re1,l1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,d1/2
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2-re1,l1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d1/2
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2-re1,l1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,-d1/2
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2-re1,l1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d1/2
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2-re1,l1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,-d4
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2-re1,l1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d3
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
! quarto trecho
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2

```

```

VSEL,R,LOC,Z,0,11
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,d1/2
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,0,11
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d1/2
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,0,11
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,-d1/2
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,0,11
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d1/2
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,0,11
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,-d4
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,0,11
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d3
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
! entre o primeiro e segundo trecho
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2+re1,lt-d2/2-re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,-d1/2
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2+re1,lt-d2/2-re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d1/2
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2+re1,lt-d2/2-re1

```

```

ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,-d4
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2+re1,lt-d2/2-re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d3
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
! entre segundo e terceiro trecho
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2+re1,lt-d2/2-d2-re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,-d1/2
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2+re1,lt-d2/2-d2-re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d1/2
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2+re1,lt-d2/2-d2-re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,X,-d4
CM,A1,AREA
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2+re1,lt-d2/2-d2-re1
ASEL,S,EXT
ASEL,R,LOC,Y,d3
CM,A2,AREA
CMSEL,S,A1,AREA
CMSEL,A,A2,AREA
ACCAT,ALL
!
!*****!
! 3.8 Criando grupos de volumes para fazer as malhas !
!*****!
!
! volumes com malha mapeada
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt,lt-d2/2+re1+p
CM,VM1,VOLUME
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt,lt-d2/2+re1+p
CM,VM2,VOLUME
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt,lt-d2/2+re1+p
CM,VM3,VOLUME
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2

```

```

VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2+re1+p,lt-d2/2-re1-p
CM,VM4,VOLUME
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2+re1+p,lt-d2/2-re1-p
CM,VM5,VOLUME
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-re1-p,lt-d2/2-d2+re1+p
CM,VM6,VOLUME
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-re1-p,lt-d2/2-d2+re1+p
CM,VM7,VOLUME
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-re1-p,lt-d2/2-d2+re1+p
CM,VM8,VOLUME
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2+re1+p,lt-d2/2-d2-re1-p
CM,VM9,VOLUME
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2+re1+p,lt-d2/2-d2-re1-p
CM,VM10,VOLUME
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2-re1-p,l1
CM,VM11,VOLUME
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2-re1-p,l1
CM,VM12,VOLUME
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2-re1-p,l1
CM,VM13,VOLUME
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,0,l1
CM,VM14,VOLUME
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-re,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,0,l1
CM,VM15,VOLUME
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,-d4,-d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,d3/2
VSEL,R,LOC,Z,0,l1
CM,VM16,VOLUME
!
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,0,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,d1/2+1,d3
VSEL,R,LOC,Z,0,lt
CM,VM17,VOLUME
!

```



```

! volume com malha sweep
CSYS,1
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,0,re
VSEL,R,LOC,Y,0,180
VSEL,R,LOC,Z,11+d2+d2/2+re1,1t
CM,VS1,VOLUME
!
CSYS,1
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,0,re
VSEL,R,LOC,Y,90,180
VSEL,R,LOC,Z,11+d2+d2/2,1t-d2/2
CM,VS2,VOLUME
!
CSYS,1
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,0,re/2
VSEL,R,LOC,Y,0,90
VSEL,R,LOC,Z,11+d2+d2/2,1t-d2/2
CM,VS3,VOLUME
!
CSYS,1
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,0,re
VSEL,R,LOC,Y,0,180
VSEL,R,LOC,Z,11+d2/2+re1,1t-d2/2-re1
CM,VS4,VOLUME
!
CSYS,1
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,0,re
VSEL,R,LOC,Y,90,180
VSEL,R,LOC,Z,11+d2/2-re1,11+d2/2+re1
CM,VS5,VOLUME
!
CSYS,1
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,0,re/2
VSEL,R,LOC,Y,0,90
VSEL,R,LOC,Z,11+d2/2-re1,11+d2/2+re1
CM,VS6,VOLUME
!
CSYS,1
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,0,re
VSEL,R,LOC,Y,0,180
VSEL,R,LOC,Z,11,11+d2/2-re1
CM,VS7,VOLUME
!
CSYS,1
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,0,ri
VSEL,R,LOC,Y,0,180
VSEL,R,LOC,Z,0,11
VSEL,U,LOC,Z,1t-d2/2+re1,1t-d2/2-re1
VSEL,U,LOC,Z,1t-d2/2-d2+re1,1t-d2/2-d2-re1
CM,VS8,VOLUME
!
CSYS,0
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,re1
VSEL,R,LOC,Z,1t-d2/2+re1,1t-d2/2-re1
CM,VS9,VOLUME
!
CSYS,0
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,0,re1
VSEL,R,LOC,Z,1t-d2/2-d2+re1,1t-d2/2-d2-re1
CM,VS10,VOLUME
!
! criando grupo de volumes de malha livre

```

```

CSYS,1
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,Z,lt-d2/2+re1+p,lt-d2/2-re1-p
VSEL,R,LOC,Y,0,90
VSEL,R,LOC,X,0,re
CM,VL1,VOLUME
!
CSYS,1
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,Z,lt-d2/2-d2+re1+p,lt-d2/2-d2-re1-p
VSEL,R,LOC,Y,0,90
VSEL,R,LOC,X,0,re
CM,VL2,VOLUME
!
!
CSYS,0
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re1,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2+re1+p,lt-d2/2-re1-p
CM,VL3,VOLUME
!
CSYS,0
ALLSEL,ALL
VSEL,S,LOC,X,re,d1/2
VSEL,R,LOC,Y,re1,d1/2
VSEL,R,LOC,Z,lt-d2/2-d2+re1+p,lt-d2/2-d2-re1-p
CM,VL4,VOLUME
!
!
!*****!
! 3.9 Criando malhas !
!*****!
!
! malha sweep
MSHAPE,0,3d
MSHKEY,1

ALLSEL,ALL
CMSEL,S,VS1,VOLUME
VSWEEP,ALL

ALLSEL,ALL
CMSEL,S,VS2,VOLUME
VSWEEP,ALL

ALLSEL,ALL
CMSEL,S,VS3,VOLUME
VSWEEP,ALL

ALLSEL,ALL
CMSEL,S,VS4,VOLUME
VSWEEP,ALL

ALLSEL,ALL
CMSEL,S,VS5,VOLUME
VSWEEP,ALL

ALLSEL,ALL
CMSEL,S,VS6,VOLUME
VSWEEP,ALL

ALLSEL,ALL
CMSEL,S,VS7,VOLUME
VSWEEP,ALL

ALLSEL,ALL
CMSEL,S,VS8,VOLUME
VSWEEP,ALL

ALLSEL,ALL
CMSEL,S,VS9,VOLUME
VSWEEP,ALL

```

```

ALLSEL,ALL
CMSEL,S,VS10,VOLUME
VSWEEP,ALL

! malha mapeada
MSHAPE,0,3d          ! 0 - hexaedro, 1 - tetraedro
MSHKEY,1            ! tipo de malha: 0 - livre; 1 - mapeada
ALLSEL,ALL
CMSEL,S,VM1,VOLUME
CMSEL,A,VM2,VOLUME
CMSEL,A,VM3,VOLUME
CMSEL,A,VM4,VOLUME
CMSEL,A,VM5,VOLUME
CMSEL,A,VM6,VOLUME
CMSEL,A,VM7,VOLUME
CMSEL,A,VM8,VOLUME
CMSEL,A,VM9,VOLUME
CMSEL,A,VM10,VOLUME
CMSEL,A,VM11,VOLUME
CMSEL,A,VM12,VOLUME
CMSEL,A,VM13,VOLUME
CMSEL,A,VM14,VOLUME
CMSEL,A,VM15,VOLUME
CMSEL,A,VM16,VOLUME
CMSEL,A,VM17,VOLUME
VMESH,ALL
!
! malha livre
MSHAPE,1,3d
MSHKEY,0
ET,2,SOLID186
TYPE, 2
ALLSEL,ALL
CMSEL,S,VL1,VOLUME
CMSEL,A,VL2,VOLUME
CMSEL,A,VL3,VOLUME
CMSEL,A,VL4,VOLUME
VMESH,ALL
!
! junta nós repetidos e mantém a numeração mais baixa
NUMMRG,node, , ,LOW
!
!*****!
! 3.10 Gerando grupos de elementos da casca do revestimento !
!*****!
!
! gerando grupo de elementos com o revestimento do tunel longitudinal
ALLSEL,ALL
LOCAL,11,1,0,0,0
ESEL,ALL
ESEL,S,CENT,Z,lt,11
ESEL,R,CENT,X,ri,re
ESEL,R,CENT,Y,0,180
CM,Casca1,ELEM
!
! gerando grupo de elementos com o revestimento das galerias transversais
LOCAL,12,1,re,0,lt-d2/2,0,0,90
VSEL,ALL
VSEL,S,LOC,Z,0,d1/2
VSEL,R,LOC,X,0,re1
VSEL,R,LOC,Y,0,90
CM,VG1,VOLUME
ESLV,S
ESEL,R,CENT,Z,-re,d1/2-re
ESEL,R,CENT,X,ri1,re1-1
ESEL,R,CENT,Y,0,180
CM,Casca2,ELEM
!
LOCAL,13,1,re,0,lt-d2/2-d2,0,0,90
VSEL,ALL
VSEL,S,LOC,Z,0,d1/2
VSEL,R,LOC,X,0,re1
VSEL,R,LOC,Y,0,90
CM,VG2,VOLUME

```

```

ESLV,S
ESEL,R,CENT,Z,-re,d1/2-re
ESEL,R,CENT,X,ri1,re1-1
ESEL,R,CENT,Y,0,180
CM,Casca3,ELEM
!
!*****!
! 3.11 Criando elementos do revestimento !
!*****!
! Obs: esses elementos ficam sobrepostos ao do solo. Durante
! a análise, conforme vai desligando os elementos do
! solo vai-se ligando os do revestimento, se houver.
!
*IF,modrev,NE,0,THEN
    CMSEL,S,Casca1,ELEM
    CMSEL,A,Casca2,ELEM
    CMSEL,A,Casca3,ELEM
    EGEN,2,0,ALL,ALL,1,1,,,0,0,0
    ESEL,ALL
    CSYS,0
    NUMMRG,NODE,, , ,LOW
    ESEL,MAT,2
    CM,Revestimento,ELEM
*ENDIF
!
!*****!
! 3.12 Criando grupos de escavação-revestimento dos tuneis longitudinais!
!*****!
!
! Primeira escavação
i = 1
LOCAL,11,1,0,0,lt,0,0,180,0
ESEL,ALL
fi=0
ff=escini*p
ESEL,S,CENT,Z,fi,ff
ESEL,R,CENT,X,0,re
ESEL,R,CENT,Y,0,180
CM,Lesc %i%,ELEM
CMSEL,S,Lesc %i%,ELEM
!
! Proximas escavações e revestimentos
*DO,i,2,nesc,1
    ! criando grupos com os elementos escavados do passo i
    fi=escini*p+(i-2)*p
    ff=escini*p+(i-1)*p
    ESEL,S,CENT,Z,fi,ff
    ESEL,R,CENT,X,0,re
    ESEL,R,CENT,Y,0,180
    CM,Lesc %i%,ELEM
    CMSEL,S,Lesc %i%,ELEM
    !
    *IF,modrev,NE,0,THEN
        ! criando grupos com os elementos revestidos do passo i
        *IF,i,EQ,2,THEN
            fi=0
        *ELSE
            fi=(i-2)*p
        *ENDIF
        *IF,i,EQ,nesc,THEN
            ff=12
        *ELSE
            ff=escini*p+(i-2)*p-d0          !ff=(i-1)*p
        *ENDIF
        ESEL,ALL
        ESEL,S,CENT,Z,fi,ff
        ESEL,R,CENT,X,ri,ri,re
        ESEL,R,CENT,Y,0,180
        ESEL,R,MAT,,2
        CM,Lrev %i-1%,ELEM
        CMSEL,S,Lrev %i-1%,ELEM
    *ENDIF
!

```

```

! revestindo a face
*IF,i,EQ,nesc,THEN
    *IF,modrev,NE,0,THEN
        *IF,revestirultimod0,EQ,1,THEN
            fi=l1+p+d0
            ff=l1
            ESEL,S,CENT,Z,fi,ff
            ESEL,R,CENT,X,ri,re
            ESEL,R,CENT,Y,0,180
            ESEL,R,MAT,,2
            MPCHG,i,ALL
            CM,Lrev %i%,ELEM
            CMSEL,S,Lrev %i%,ELEM
        *ENDIF
        *IF,revesteface,EQ,1,THEN
            fi=l1
            ff=l1-(re-ri)
            ESEL,ALL
            ESEL,S,CENT,Z,fi,ff
            ESEL,R,CENT,X,0,re
            ESEL,R,CENT,Y,0,180
            CM,soloface,ELEM
            CMSEL,S,soloface,ELEM
            !
            fi=l1
            ff=l1-(re-ri)
            ESEL,ALL
            ESEL,S,CENT,Z,fi,ff
            ESEL,R,CENT,X,0,re
            ESEL,R,CENT,Y,0,180
            EGEN,2,0,all,all,1,1,,,,0,0,0
            NUMMRG,node, , , ,LOW
            ESEL,R,MAT,,2
            MPCHG,i,ALL
            CM,Lrevface,ELEM
            CMSEL,S,Lrevface,ELEM
        *ENDIF
    *ENDIF
*ENDIF

*ENDDO
CSYS,0
!
!*****!
! 3.13 Criando grupos de escavação-revestimento das galerias !
!*****!
!
! Primeira escavação da primeira galeria
i = 1
LOCAL,12,1,re,0,lt-d2/2,0,0,90
fi=-re
ff=escini1*p1      !+d01
ESEL,ALL
CMSEL,S,VG1,VOLUME
ESLV,S
ESEL,R,CENT,Z,fi,ff
ESEL,R,CENT,X,0,re1
ESEL,R,CENT,Y,0,180
CM,T1esc %i%,ELEM
CMSEL,S,T1esc %i%,ELEM
!
! criando grupo da entrada da galeria 1
*IF,modrev,NE,0,THEN
    ESEL,ALL
    CMSEL,S,CASCA1,VOLUME
    ESEL,R,CENT,Z,fi,ff
    ESEL,R,CENT,X,0,re1-1
    ESEL,R,CENT,Y,0,180
    ESEL,R,MAT,,2
    CM,T1escent,ELEM
    CMSEL,S,T1escent,ELEM
*ENDIF
!
! Proximas escavações e resvestimentos da primeira galeria
*DO,i,2,nesc1,1

```

```

fi=escini1*p1+(i-2)*p1
ff=escini1*p1+(i-1)*p1
ESEL,S,CENT,Z,fi,ff
ESEL,R,CENT,X,0,re1-1
ESEL,R,CENT,Y,0,180
CM,T1esc %i%,ELEM
CMSEL,S,T1esc %i%,ELEM
!
*IF,modrev,NE,0,THEN
    ! criando grupos com os elementos revestidos do passo i
    *IF,i,EQ,2,THEN
        fi=-re
    *ELSE
        fi=(i-2)*p1
    *ENDIF
    *IF,i,EQ,nesc1,THEN
        ff=d2/2-re
    *ELSE
        ff=escini1*p1+(i-2)*p1-d01
    *ENDIF
    ESEL,ALL
    CMSEL,S,VG1,VOLUME
    ESLV,S
    ESEL,R,CENT,Z,fi,ff
    ESEL,R,CENT,X,ri1,re1-1
    ESEL,R,CENT,Y,0,180
    ESEL,R,MAT,,2
    CM,T1rev %i-1%,ELEM
    CMSEL,S,T1rev %i-1%,ELEM
*ELSE
    ! não aplica o revestimento
*ENDIF
*ENDDO
CSYS,0
!
! Primeira escavação da segunda galeria
i = 1
LOCAL,12,1,re,0,lt-d2/2-d2,0,0,90
fi=-re
ff=escini1*p1      !+d01
ESEL,ALL
CMSEL,S,VG2,VOLUME
ESLV,S
ESEL,R,CENT,Z,fi,ff
ESEL,R,CENT,X,0,re1
ESEL,R,CENT,Y,0,180
CM,T2esc %i%,ELEM
CMSEL,S,T2esc %i%,ELEM
!
! criando grupo da entrada da galeria 2
*IF,modrev,NE,0,THEN
    ESEL,ALL
    CMSEL,S,CASCA1,VOLUME
    ESEL,R,CENT,Z,fi,ff
    ESEL,R,CENT,X,0,re1-1
    ESEL,R,CENT,Y,0,180
    ESEL,R,MAT,,2
    CM,T2escent,ELEM
    CMSEL,S,T2escent,ELEM
*ENDIF
!
! Proximas escavações e revestimentos da segunda galeria
*DO,i,2,nesc1,1
    ! criando grupos com os elementos escavados do passo i
    fi=escini1*p1+(i-2)*p1      !+d01
    ff=escini1*p1+(i-1)*p1      !+d01
    ESEL,S,CENT,Z,fi,ff
    ESEL,R,CENT,X,0,re1-1
    ESEL,R,CENT,Y,0,180
    CM,T2esc %i%,ELEM
    CMSEL,S,T2esc %i%,ELEM
    !
    *IF,modrev,NE,0,THEN

```

```

! criando grupos com os elementos revestidos do passo i
*IF,i,EQ,2,THEN
    fi=-re
*ELSE
    fi=(i-2)*p1
*ENDIF
*IF,i,EQ,nesc1,THEN
    ff=d2/2-re
*ELSE
    ff=escini1*p1+(i-2)*p1-d01 !ff=(i-1)*p
*ENDIF
ESEL,ALL
CMSEL,S,VG2,VOLUME
ESLV,S
ESEL,R,CENT,Z,fi,ff
ESEL,R,CENT,X,ri1,re1-1
ESEL,R,CENT,Y,0,180
ESEL,R,MAT,,2
CM,T2rev %i-1%,ELEM
CMSEL,S,T2rev %i-1%,ELEM

*ELSE
    ! não aplica o revestimento
*ENDIF

*ENDDO
CSYS,0
!
!*****!
! 3.14 Condições de contorno !
!*****!
CSYS,0
! aplica tensões iniciais
ESEL,ALL
INISTATE,SET,CSYS,0
INISTATE,SET,DTYP,STRE
INISTATE,DEFINE,,,,-pr,-pr,-pr,0,0,0
!
!Aplica condição de simetria na face direita do modelo
LOCAL,11,0,0,0,0
ALLSEL,ALL
ASEL,S,LOC,X,d1/2,d1/2
DA,ALL,SYMM
!
! Aplica condições de simetria na face de baixo do modelo
LOCAL,11,0,0,0,0
ALLSEL,ALL
ASEL,S,LOC,Y,0,0
DA,ALL,SYMM
!
!Deslocamento zero em Z, face frontal
LOCAL,11,0,0,0,0
ALLSEL,ALL
ASEL,S,LOC,Z,lt,lt
DA,ALL,UZ,0
!
! Aplica pressão na face superior
LOCAL,11,0,0,0,0
ALLSEL,ALL
ASEL,S,LOC,Y,d3,d3
SFA,ALL,1,PRES,pr
!
! Aplica pressão na face esquerda do modelo
LOCAL,11,0,0,0,0
ALLSEL,ALL
ASEL,S,LOC,X,-d4,-d4
SFA,ALL,1,PRES,pr
!
! Aplica pressão na face do fundo
LOCAL,11,0,0,0,0
ALLSEL,ALL
ASEL,S,LOC,z,0,0
SFA,ALL,1,PRES,pr
!

```

```

!*****!
! 4. Solução !
!*****!
!
! Configurações iniciais
/CWD,diretorio
PARSAV,ALL,parametros,txt
/SOL
ANTYPE,0,NEW
NLGEOM,1
NROPT,FULL
PSCONTROL,ALL,OFF
OUTRES,ESOL, LAST
SOLCONTROL,ON
PRED,OFF
TUNIF,temperatura
ALLSEL,ALL
!
! Apaga os elementos do revestimento
*IF,modrev,NE,0, THEN
    CMSEL,S,Revestimento,ELEM
    EKILL,ALL
    !
    *IF,revesteface,EQ,1, THEN
        CMSEL,S,Lrevface,ELEM
        EKILL,ALL
        ESEL,ALL
    *ENDIF
*ENDIF
!
! Verifica o equilibrio do maciço
*IF,soleq,EQ,1, THEN
    ESEL,ALL
    TIME,1
    DELTIM,dt,,dtmax
    OUTRES,ESOL, LAST
    cnvtol,f,,1e-6
    cnvtol,u,,0.0001
    SOLVE
    FINISH
    /POST1
    RSYS,0
    ESEL,S,LIVE
    PLNSOL, U,SUM, 0,1.0
    ESEL,ALL
*ENDIF
!
*IF,modsolo,LE,1,AND,modrev,EQ,0, THEN
    /SOL
    ANTYPE,0,NEW
    ! primeira escavação
    i=1
    ESEL,ALL
    CMSEL,S,LESC %i%,ELEM
    EKILL,ALL
    ESEL,S,LIVE
    EPLOT
    *DO,i,2,nesc,1
        ! desligando elementos do grupo de escavação i
        ESEL,ALL
        CMSEL,S,LESC %i%,ELEM
        EKILL,ALL
        ESEL,S,LIVE
        EPLOT
        !
        ! ligando elementos do grupo de revestimento i-1
        *IF,modrev,NE,0, THEN
            CMSEL,S,Lrev %i-1%,ELEM
            EALIVE,ALL
            *IF,revestirultimod0,EQ,1, THEN
                *IF,i,EQ,nesc, THEN
                    CMSEL,S,Lrev %i%,ELEM
                    EALIVE,ALL
                *ENDIF
            *ENDIF
        *ENDIF
    *ENDIF

```



```

*ENDIF
*IF,revesteface,EQ,1,THEN
  *IF,i,EQ,nesc,THEN
    CMSEL,S,Lrevface,ELEM
    EALIVE,ALL
    CMSEL,S,soloface,ELEM
    EKILL,ALL
  *ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
!
! grupo de escavação da galeria 1
*IF,escavagaleria,EQ,1,THEN
  *IF,i,EQ,pig1,THEN
    ! escava entrada da galeria 1
    *IF,modrev,NE,0,THEN
      ESEL,ALL
      CMSEL,S,T1escent,ELEM
      EKILL,ALL
      ESEL,S,LIVE
      EPLOTT
    *ENDIF
    !
    *DO,j,1,nesc1,1
      /TITLE, entrei do nesc1
      ! desligando os elementos do grupo de escavação
      ESEL,ALL
      CMSEL,S,T1ESC %j%,ELEM
      EKILL,ALL
      ESEL,S,LIVE
      EPLOTT
      !
      ! ligando os elementos do grupo de revestimento
      *IF,revestegaleria,NE,0,THEN
        *IF,j,GE,2,THEN
          CMSEL,S,T1REV %j-1%,ELEM
          EALIVE,ALL
        *ENDIF
      *ENDIF
      !
      ! plotando para o usuario apenas os elementos
      ESEL,S,LIVE
      EPLOTT
    *ENDDO
  *ENDIF
!
! grupo de escavação da galeria 2
*IF,i,EQ,pig2,THEN
  *IF,modrev,NE,0,THEN
    ESEL,ALL
    CMSEL,S,T2escent,ELEM
    EKILL,ALL
    ESEL,S,LIVE
    EPLOTT
  *ENDIF
  *DO,j,1,nesc1,1
    ! desligando os elementos do grupo de escavação
    ESEL,ALL
    CMSEL,S,T2ESC %j%,ELEM
    EKILL,ALL
    ESEL,S,LIVE
    EPLOTT
    !
    ! ligando os elementos do grupo de revestimento
    *IF,revestegaleria,NE,0,THEN
      *IF,j,GE,2,THEN
        CMSEL,S,T2REV %j-1%,ELEM
        EALIVE,ALL
      *ENDIF
    *ENDIF
  *ENDIF
!

```

ativos

```

ativos
! plotando para o usuario apenas os elementos
ESEL,S,LIVE
EPLLOT
*ENDDO
*ENDIF
*ENDIF
*ENDDO
ESEL,S,LIVE
EPLLOT
ESEL,ALL
SAVE
cnvtol,f,,1e-6
cnvtol,u,,0.0001
SOLVE
*ELSE
/SOL
ANTYPE,0,NEW
i=1
ESEL,ALL
CMSEL,S,LESC %i%,ELEM
EKILL,ALL
ESEL,S,LIVE
EPLLOT
TIME,t*i
DELTIM,dt,,dtmax
OUTRES,ESOL, LAST
ESEL,ALL
cnvtol,f,,1e-6
cnvtol,u,,0.0001
SOLVE
SAVE
FINISH
/POST1
RSYS,1
ESEL,S,LIVE
PLNSOL,U,SUM,0,1.0
!
! Escavando próximos passos
/SOL
ANTYPE,0,RESTART
*DO,i,2,nesc,1
! desligando elementos do grupo de escavação i
ESEL,ALL
CMSEL,S,LESC %i%,ELEM
EKILL,ALL
ESEL,S,LIVE
EPLLOT
!
! ligando elementos do grupo de revestimento i-1
*IF,modrev,NE,0,THEN
CMSEL,S,Lrev %i-1%,ELEM
EALIVE,ALL
*IF,revestirultimod0,EQ,1,THEN
*IF,i,EQ,nesc,THEN
CMSEL,S,Lrev %i%,ELEM
EALIVE,ALL
*ENDIF
*ENDIF
*IF,revesteface,EQ,1,THEN
*IF,i,EQ,nesc,THEN
CMSEL,S,Lrevface,ELEM
EALIVE,ALL
CMSEL,S,soloface,ELEM
EKILL,ALL
*ENDIF
*ENDIF
*ENDIF
!
! grupo de escavação da galeria 1
*IF,escavagaleria,EQ,1,THEN
*IF,i,EQ,pig1,THEN
! escava entrada da galeria 1
*IF,modrev,NE,0,THEN

```

```

ESEL,ALL
CMSEL,S,T1escent,ELEM
EKILL,ALL
ESEL,S,LIVE
EPlot
*ENDIF
!
*DO,j,1,nesc1,1
/TITLE, entrei do nesc1
! desligando os elementos do grupo de escavação
ESEL,ALL
CMSEL,S,T1ESC %j%,ELEM
EKILL,ALL
ESEL,S,LIVE
EPlot
!
! ligando os elementos do grupo de revestimento
*IF,revestegaleria,NE,0,THEN
*IF,j,GE,2,THEN
CMSEL,S,T1REV %j-1%,ELEM
EALIVE,ALL
*ENDIF
*ENDIF
!
! plotando para o usuario apenas os elementos

ativos
ESEL,S,LIVE
EPlot
TIME,t*i+t1*j
DELTIM,dt,,dtmax
OUTRES,ESOL, LAST
ESEL,ALL
SAVE
cnvto1,f,,1e-6
cnvto1,u,,0.0001
SOLVE
*ENDDO
tad1 = t1*nesc1
*ENDIF
!
! grupo de escavação da galeria 2
*IF,i,EQ,pig2,THEN
*IF,modrev,NE,0,THEN
ESEL,ALL
CMSEL,S,T2escent,ELEM
EKILL,ALL
ESEL,S,LIVE
EPlot
*ENDIF
*DO,j,1,nesc1,1
! desligando os elementos do grupo de escavação
ESEL,ALL
CMSEL,S,T2ESC %j%,ELEM
EKILL,ALL
ESEL,S,LIVE
EPlot
!
! ligando os elementos do grupo de revestimento
*IF,revestegaleria,NE,0,THEN
*IF,j,GE,2,THEN
CMSEL,S,T2REV %j-1%,ELEM
EALIVE,ALL
*ENDIF
*ENDIF
!
! plotando para o usuario apenas os elementos

ativos
ESEL,S,LIVE
EPlot
TIME,t*i+tad1+t1*j
DELTIM,dt,,dtmax
OUTRES,ESOL, LAST

```

```

ESEL,ALL
SAVE
cnvtol,f,,1e-6
cnvtol,u,,0.0001
SOLVE

*ENDDO
tad2 = t1*nesc1

*ENDIF

*ENDIF
ESEL,S,LIVE
EPLT
TIME,t*i+tad1+tad2
DELTIM,0.02*dt,,dtmax
OUTRES,ESOL, LAST
ESEL,ALL
SAVE
cnvtol,f,,1e-6
cnvtol,u,,0.0001
SOLVE

*ENDDO
!
FINISH

*ENDIF
!
!*****!
! 5.0 Pós-processamento !
!*****!
!
! mudando a cor da janela
/RGB,INDEX,100,100,100,0
/RGB,INDEX,0,0,0,15
!
! qualidade do arquivo jpeg de saída
JPEG,QUAL,100,
JPEG,ORIENT,HORIZ
JPEG,COLOR,2
JPEG,TMOD,1
/GFILE,800,
/TYPE,,3
!
!*****!
! 5.1 Escrevendo arquivo txt com os valores !
!*****!
!
/POST1
!
! numero de analises

*IF,escavagaleria,EQ,1,THEN
nanalises=nesc+2*nesc1

*ELSE

nanalises=nesc

*ENDIF
!
!
! selecionando os nós na interface entre revestimento e solo
CSYS,1
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,0.999*Re,1.001*Re
NSEL,R,LOC,Z,0,lt
NSEL,R,LOC,Y,-270,-269.99
!
CSYS,0
RSYS,0
*GET,ncount,NODE,,COUNT ! pegando numero máximo de nós selecionados
*GET,ntotal,NODE,,NUM,MAX ! pegando numero total de nós
*DIM,results,TABLE,ncount,2+nanalises ! dimensionando tabela de resultados
*DIM,n_z,ARRAY,ntotal ! dimensionando vetor de numeração de nós
*DIM,u_y,ARRAY,ntotal ! dimensionando vetor de deslocamentos em X
*DIM,n_sel,ARRAY,ntotal ! dimensionando vetor que indica se o nó está
selecionado

```

```

*VGET,results(1,1),node,,nlist          ! atribuindo nós a primeira coluna
!
*VGET,n_sel(1),NODE,1,NSEL              ! pegando atributos dos nós (selecionado ou não selecionado)
*VMASK,n_sel(1)                          ! usa como mascara os nós selecionados
*VGET,n_z(1),NODE,1,LOC,Z                ! pega a localização y dos nós selecionados
*VOPER,n_z(1),n_z(1),MULT,1/Re          !
*VMASK,n_sel(1)                          ! usa como mascara os nós selecionados
*VFUN,results(1,2),COMP,n_z(1)          ! guarda a localização y na 2 coluna da tabela de resultados
*DO,i,1,nanalises,1
    ! identifica o passo
    *IF,i,EQ,nanalises,THEN
        SUBSET,LAST
    *ELSE
        *IF,modsolo,LE,1,AND,modrev,EQ,0,THEN
            SUBSET,LAST
        *ELSE
            SUBSET,,,,,i
        *ENDIF
    *ENDIF
    !
    ! guarda os deslocamento x dos nós selecionados
    *VMASK,n_sel(1)
    *VGET,u_y(1),NODE,1,U,Y
    !
    ! faz a operação nos deslocamentos
    *VOPER,u_y(1),u_y(1),MULT,-1/Re*100
    !
    ! guarda os resultados na coluna 2+i da tabela de resultados
    *VMASK,n_sel(1)
    *VFUN,results(1,2+i),COMP,u_y(1)
*ENDDO
*MOPER,ORDER,results,SORT,results(1,2) ! ordena a tabela de acordo com a segunda coluna
*VSCFUN,umaximoconst,max,results(1,2+nanalises-1)
*VSCFUN,umaximofinal,max,results(1,2+nanalises)
!
! formatando grafico de convergencia
/RGB,INDEX,100,100,100,0
/RGB,INDEX,0,0,0,15
/AXLAB,X,Y/Re                                ! titulo dos eixos
/AXLAB,Y,U=-u(r=Re)/Re (%)                   ! titulo dos eixos
/XRANGE,0,1t/Re                               ! alcance do eixo x
/YRANGE,umaximofinal*1.2,0                   ! alcance do eixo y (2% do raio)
/GROPT,DIVY,20                                ! divide o eixo y 20 vezes
/GROPT,DIVX,10                                ! divide o eixo x 10 vezes
/GROPT,DIG1,3
/GTHK,CURVE,1                                ! espessura da curva
/PLOPTS,INFO,off                             ! retirar legenda das linhas
!
! Graficando em arquivo
*IF,flag15,EQ,1,THEN
    /ERASE
    /SHOW,JPEG,,iso
    *DO,i,1,nanalises,1
        *IF,i,EQ,nanalises,THEN
            /COLOR,CURVE,MAGE,1
        *ELSEIF,i,EQ,nesc,THEN
            /COLOR,CURVE,YELL,1
        *ELSE
            /COLOR,CURVE,LGRA,1
        *ENDIF
        *VPLOT,results(1,2),results(1,2+i)
        /NOERASE
    *ENDDO
    /SHOW,CLOSE
    /ERASE
*ENDIF
!
! cria o arquivo com os resultados (coordenada y, final da construção, tempo final)
*IF,flag16,EQ,1,THEN
    *CREATE,ansuitmp
    *CFOPEN,%arqconv%, 'txt', ' '
    *VWRITE,results(1,2),results(1,2+nanalises-1),results(1,2+nanalises) , , , , , ,
(F10.4, ' ', E10.4, ' ', E10.4)
    *CFCLOS

```

```

*END
/INPUT,ansuitmp
/PLOPTS,INFO,on          ! coloca legenda das linhas
*ENDIF
!
! graficando na tela do Ansys
*IF,flag17,EQ,1,THEN
/ERASE
*DO,i,1,nanalises,1
  *IF,i,EQ,nanalises,THEN
    /COLOR,CURVE,MAGE,1
  *ELSEIF,i,EQ,nesc,THEN
    /COLOR,CURVE,YELL,1
  *ELSE
    /COLOR,CURVE,LGRA,1
  *ENDIF
  *VPLOT,results(1,2),results(1,2+i)
/NOERASE
*ENDDO
/ERASE
*ENDIF
!*****!
! 5.2 Deslocamentos e tensões nodais          !
!*****!
! Obs: rodar cada trecho em separado
!
! ler dados de um passo específico
/POST1
SUBSET,passo
/CTYPE,isosup
!
! Deslocamento em X
*IF,flag1,EQ,1,THEN
/POST1          ! seleciona módulo de pós-processamento
ESEL,S,mat,,1,1 ! seleciona material 1
ESEL,R,live     ! selecionar apenas elementos vivos
/EFACET,1      ! interpolação dos deslocamentos pelos cantos
/DSCALE,ALL,escala ! escala dos resultados
PLNSOL,U,X,0   ! plotar solução nodal, tipo, componente, só deformada
/SHOW,JPEG,,iso ! escolhe plotar em arquivo JPEG
/REPLOT        ! plota em arquivo
/SHOW,CLOSE    ! fecha o arquivo JPEG
*ENDIF
!
! Deslocamento em Y
*IF,flag2,EQ,1,THEN
/POST1
ESEL,S,mat,,1,1
ESEL,R,live
/EFACET,1
/DSCALE,ALL,escala
PLNSOL,U,Y,0
/SHOW,JPEG,,iso
/REPLOT
/SHOW,CLOSE
*ENDIF
!
! Soma das componentes de deslocamentos
*IF,flag3,EQ,1,THEN
/POST1
ESEL,S,mat,,1,1
ESEL,R,live
/EFACET,1
/DSCALE,ALL,escala
PLNSOL,U,SUM,0
/SHOW,JPEG,,iso
/REPLOT
/SHOW,CLOSE
*ENDIF
!
! Tensão X
*IF,flag4,EQ,1,THEN
/POST1
ESEL,S,mat,,1,1

```

```

        ESEL,R,live
        /EFACET,1
        /DSCALE,ALL,escala
        PLNSOL, S,X, 0
        /SHOW,JPEG,,iso
        /REPLOT
        /SHOW,CLOSE
*ENDIF
!
! Tensão Y
*IF,flag5,EQ,1,THEN
        /POST1
        ESEL,S,mat,,1,1
        ESEL,R,live
        /EFACET,1
        /DSCALE,ALL,escala
        PLNSOL, S,Y, 0
        /SHOW,JPEG,,iso
        /REPLOT
        /SHOW,CLOSE
*ENDIF
!
! Tensão XY
*IF,flag6,EQ,1,THEN
        /POST1
        ESEL,S,mat,,1,1
        ESEL,R,live
        /EFACET,1
        /DSCALE,ALL,escala
        PLNSOL, S,XY, 0
        /SHOW,JPEG,,iso
        /REPLOT
        /SHOW,CLOSE
*ENDIF
!
! Tensão XZ
*IF,flag7,EQ,1,THEN
        /POST1
        ESEL,S,mat,,1,1
        ESEL,R,live
        /EFACET,1
        /DSCALE,ALL,escala
        PLNSOL, S,XZ, 0
        /SHOW,JPEG,,iso
        /REPLOT
        /SHOW,CLOSE
*ENDIF
!
! Tensão YZ
*IF,flag8,EQ,1,THEN
        /POST1
        ESEL,S,mat,,1,1
        ESEL,R,live
        /EFACET,1
        /DSCALE,ALL,escala
        PLNSOL, S,YZ, 0
        /SHOW,JPEG,,iso
        /REPLOT
        /SHOW,CLOSE
*ENDIF
!
! Tensão principal 1
*IF,flag9,EQ,1,THEN
        /POST1
        ESEL,S,mat,,1,1
        ESEL,R,live
        /EFACET,1
        /DSCALE,ALL,escala
        PLNSOL, S,1, 0
        /SHOW,JPEG,,iso
        /REPLOT
        /SHOW,CLOSE
*ENDIF
!

```

```

! Tensão principal 2
*IF,flag10,EQ,1,THEN
  /POST1
  ESEL,S,mat,,1,1
  ESEL,R,live
  /EFACET,1
  /DSCALE,ALL,escala
  PLNSOL,S,2,0
  /SHOW,JPEG,,iso
  /REPLOT
  /SHOW,CLOSE
*ENDIF
!
! Tensão principal 3
*IF,flag11,EQ,1,THEN
  /POST1
  ESEL,S,mat,,1,1
  ESEL,R,live
  /EFACET,1
  /DSCALE,ALL,escala
  PLNSOL,S,3,0
  /SHOW,JPEG,,iso
  /REPLOT
  /SHOW,CLOSE
*ENDIF
!
! Tensão resultante
*IF,flag12,EQ,1,THEN
  /POST1
  ESEL,S,mat,,1,1
  ESEL,R,live
  /EFACET,1
  /DSCALE,ALL,escala
  PLNSOL,S,INT,0
  /SHOW,JPEG,,iso
  /REPLOT
  /SHOW,CLOSE
*ENDIF
!
! Tensão equivalente de Von-Mises
*IF,flag13,EQ,1,THEN
  /POST1
  ESEL,S,mat,,1,1
  ESEL,R,live
  /EFACET,1
  /DSCALE,ALL,escala
  PLNSOL,S,EQV,0
  /SHOW,JPEG,,iso
  /REPLOT
  /SHOW,CLOSE
*ENDIF
!
! Pressão hidrostática
*IF,flag14,EQ,1,THEN
  /POST1
  ESEL,S,mat,,1,1
  ESEL,R,live
  /EFACET,1
  /DSCALE,ALL,escala
  PLNSOL,NL,HPRES,0
  /SHOW,JPEG,,iso
  /REPLOT
  /SHOW,CLOSE
*ENDIF

```