

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

**Modelagem computacional de túneis gêmeos profundos
interligados por galerias transversais considerando o acoplamento
plasticidade-viscoplasticidade**

Carlos Alberto Magnus Maciel Colombo

Porto Alegre
2023

CARLOS ALBERTO MAGNUS MACIEL COLOMBO

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TÚNEIS GÊMEOS
PROFUNDOS INTERLIGADOS POR GALERIAS
TRANSVERSAIS CONSIDERANDO O ACOPLAMENTO
PLASTICIDADE-VISCOPLASTICIDADE**

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
2023

CARLOS ALBERTO MAGNUS MACIEL COLOMBO

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TÚNEIS GÊMEOS
PROFUNDOS INTERLIGADOS POR GALERIAS
TRANSVERSAIS CONSIDERANDO O ACOPLAMENTO
PLASTICIDADE-VISCOPLASTICIDADE**

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

Porto Alegre, 04 de dezembro de 2023

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

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

Prof. Nilo Cesar Consoli
Dr. pela Concordia University
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Alexandre Luis Braun (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Liércio André Isoldi (FURG)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha esposa, amor da minha vida,
aos meus pais e aos meus sogros.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, ao amor da minha vida, Graziela Milani Leal, referência de amor, de pessoa, de mulher e de profissional. És o motivo pelo qual acordo todos os dias e persigo nossos sonhos. Juntos construímos uma história e este resultado é mais um capítulo que eu não teria escrito sem todo o amor, suporte, compreensão e incentivo. Segui confiando, mesmo quando eu já não acreditava mais. Ao teu lado aprendi que tudo é possível, mesmo que as adversidades pareçam impossíveis de superar e que tudo já esteja perdido. És minha eterna escolha.

Aos meus pais, Ione e Carlos, pelo amor incondicional, apoio, compreensão e ensinamentos que sempre procuraram me proporcionar. Vocês são meus exemplos!

Aos meus sogros, Adélia e Sidi, por todo carinho e suporte ao longo da minha trajetória.

Aos meus “padinhos” e “amigos da Bahia”, Fê e Lu, por sempre estarem presentes, descontraindo e alegrando a minha vida, mesmo nos momentos de dificuldades.

Aos meus orientadores, Denise Bernaud e Samir Maghous, os quais admiro muito, por toda a paciência, a disponibilidade, o conhecimento compartilhado e, principalmente, por acreditarem que, diante de todas as adversidades, seria possível concluir este trabalho.

Ao amigo e “orientador”, Felipe Quevedo, pela disponibilidade e pelo incansável esforço em ensinar e transmitir o conhecimento sobre túneis. Saiba que és motivo de orgulho para toda a comunidade da UFRGS, além de uma referência como pessoa, pesquisador e profissional.

Aos colegas de turma, especialmente ao Lucas, ao Patrick, ao Marcos e à Daniele, componentes da família PPGEAC, que, mesmo distantes, sempre estiveram disponíveis para compartilhar as dificuldades, as angústias e os conhecimentos adquiridos ao longo da trajetória do mestrado.

À UFRGS, pela oportunidade de crescimento pessoal, e ao CEMACOM, pela disponibilização da infraestrutura física e computacional necessária ao desenvolvimento do estudo realizado.

A todos que de alguma forma torceram, participaram ou contribuíram para o processo de construção deste trabalho, muito obrigado.

Mestre não é quem sempre ensina, mas quem de repente aprende.

João Guimarães Rosa

RESUMO

COLOMBO, C. A. M. M. **Modelagem computacional de túneis gêmeos profundos interligados por galerias transversais considerando o acoplamento plasticidade-viscoplasticidade.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

No presente trabalho, modelos constitutivos desenvolvidos em trabalhos anteriores são implementados via funcionalidade USERMAT disponível no software ANSYS para analisar os processos de deformação em túneis gêmeos profundos interligados por galerias transversais. Diferentes modelos constitutivos para o maciço são considerados: elástico, elastoplástico, viscoplástico e elastoplástico-viscoplástico. A plasticidade é definida assumindo uma superfície de escoamento de Drucker-Prager com regra de fluxo associada sem endurecimento/amolecimento. Por outro lado, a viscoplasticidade é baseada no modelo de Perzyna, empregando igualmente uma superfície de escoamento de Drucker-Prager. Para o revestimento, dois modelos constitutivos são adotados: elástico e viscoelástico. O comportamento viscoelástico para o revestimento é definido por um modelo reológico de Kelvin Generalizado, formulado com base na Teoria da Solidificação de Bazant e Prasannan e ajustando os parâmetros de acordo com as formulações do CEB-FIP MC90. A verificação do modelo computacional ocorre através de comparações com soluções analíticas desenvolvidas por outros autores em elasticidade e elastoplasticidade para túneis gêmeos sem galeria. Uma análise da convergência de malha combinada com a implementação da linguagem APDL permitiu a definição de uma discretização espacial satisfatória para o domínio geométrico. Análises paramétricas são utilizadas para investigar a interação mútua entre os túneis gêmeos com ou sem galeria, em particular o efeito observado no perfil de convergências do túnel longitudinal. Destaca-se o papel da rigidez do revestimento de concreto no perfil de convergências dos túneis, atenuando os efeitos viscosos, e o notável efeito da interação entre os túneis longitudinais em relação a sua proximidade a partir de quatro raios de distância (aumento de até 11% em relação ao túnel isolado). Desse modo, os maiores valores em termos de convergência ocorrem na consideração dos efeitos viscosos em conjunto com o afastamento de quatro raios entre os túneis. Quando se trata da existência de galeria transversal, considerando a existência de revestimento, observa-se que a sua influência nos túneis gêmeos é altamente localizada, na ordem de quatro raios para cada lado a partir do seu eixo.

Palavras-chave: túneis gêmeos profundos, galerias transversais, elastoplasticidade, viscoplasticidade, Método dos Elementos Finitos.

ABSTRACT

COLOMBO, C. A. M. M. **Computational modeling of deep twin tunnels interconnected by transverse galleries considering the plasticity-viscoplasticity coupling**. 2023. Dissertation (Master's Degree in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.

In the present work, constitutive models developed in previous studies are implemented using the USERMAT functionality available in the ANSYS software to analyze deformation processes in interconnected deep twin tunnels via transverse galleries. Various constitutive models for the massif are considered: elastic, elastoplastic, viscoplastic, and elastoplastic-viscoplastic. Plasticity is defined assuming a Drucker-Prager yield surface with an associated flow rule without hardening/softening. On the other hand, viscoplasticity is based on the Perzyna model, also employing a Drucker-Prager yield surface. For the lining, two constitutive models are adopted: elastic and viscoelastic. The viscoelastic behavior for the lining is defined by a Generalized Kelvin rheological model, formulated based on Bazant and Prasannan's Solidification Theory and adjusting the parameters according to the formulations of CEB-FIP MC90. Computational model verification occurs through comparisons with analytical solutions developed by other authors in elasticity and elastoplasticity for twin tunnels without galleries. A mesh convergence analysis combined with the implementation of the APDL language allowed the definition of a satisfactory spatial discretization for the geometric domain. Parametric analyses are used to investigate the mutual interaction between twin tunnels with or without galleries, particularly the observed effect on the convergence profile of the longitudinal tunnel. The role of the concrete lining stiffness in the convergence profile of tunnels is highlighted, mitigating viscous effects, along with the significant effect of the interaction between longitudinal tunnels in terms of their proximity from four radii apart (an increase of up to 11% compared to an isolated tunnel). Thus, the highest convergence values occur when considering viscous effects together with the distance of four radii between the tunnels. Regarding the existence of a transverse gallery and considering the presence of lining, its influence on twin tunnels is highly localized, within approximately four radii on each side from its axis.

Keywords: twin deep tunnels, transverse galleries, elastoplasticity, viscoplasticity, Finite Element Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distinção entre túnel raso e túnel profundo	36
Figura 2 - Demonstração da mobilização da resistência ao cisalhamento do maciço no entorno da abertura do túnel	40
Figura 3 – Apresentação da direção das tensões principais antes e após a escavação	40
Figura 4 – Apresentação do arqueamento tridimensional das tensões no avanço da escavação	41
Figura 5 – Deslocamentos do maciço com o avanço da frente de escavação do túnel	41
Figura 6 – Zona de influência da frente de escavação.....	42
Figura 7 – Posição do problema de natureza tridimensional – interação maciço-revestimento	44
Figura 8 – Curvas de convergência (a) e confinamento (b)	45
Figura 9 – Curvas características do maciço	45
Figura 10 – Curvas características do revestimento	46
Figura 11 – Curvas de confinamento e convergência no gráfico $P_i \times U_i$ – Solução do problema de interação maciço-revestimento	48
Figura 12 – Campo de deslocamentos no entorno do túnel no caso de método analítico.....	50
Figura 13 – Delimitação da região plástica e elástica no maciço.....	50
Figura 14 – Comportamento da solução em estado plano de deformações radiais: maciço elástico (a) e maciço elastoplástico (b).....	51
Figura 15 – Curva de Fenner-Pacher: curva de resposta que representa a interação maciço-suporte e as deformações no tempo.....	54
Figura 16 – Possíveis situações em relação à face de escavação do túnel	56
Figura 17 – Intersecção das curvas CV-CF	57
Figura 18 – Aplicação do método CV-CF a partir da determinação de U_0	58
Figura 19 – Influência da rigidez do suporte no perfil de convergências do túnel, quando considerada na determinação de U_0	58
Figura 20 – Malha representativa de análise bidimensional de túneis profundos- deformações planas.....	61
Figura 21 – Malha representativa de análise bidimensional de túneis profundos – axissimetria	62

Figura 22 – Malha representativa de análise tridimensional – túneis gêmeos profundos com galerias.....	63
Figura 23 – Revestimento com comportamento elástico linear	65
Figura 24 – Revestimento com comportamento elástico não-linear	65
Figura 25 – Vista geral do trecho com cintas metálicas com juntas deslizantes: Galeria de Mol	66
Figura 26 – Esquema do modelo de concreto pela Teoria da Solidificação, com a cadeia de Kelvin Generalizada na parte esquerda superior.	70
Figura 27 – Superfícies de plastificação clássicas.....	73
Figura 28 – Desenho esquemático do modelo elastoplástico-viscoplástico.....	79
Figura 29 – Função linear definida por partes para representar o endurecimento/amolecimento através do parâmetro coesivo	82
Figura 30 – Superfícies e domínios do modelo acoplado elastoplástico-viscoplástico.....	85
Figura 31 – Comparação soluções em elasticidade sem revestimento: analítica e numérica (ANSYS)	91
Figura 32 – Comparação soluções em plasticidade sem revestimento: analítica e numérica (ANSYS)	92
Figura 33 – Comparação perfis de convergência em elastoplasticidade com revestimento para $K_R = 36$ MPa: ANSYS (a) e GEOMECC91 (b).....	93
Figura 34 – Comparação perfis de convergência em elastoplasticidade com revestimento para $K_R = 360$ MPa: ANSYS (a) e GEOMECC91 (b).....	94
Figura 35 – Comparação perfis de convergência em elastoplasticidade com revestimento para $K_R = 3600$ MPa: ANSYS (a) e GEOMECC91 (b).....	95
Figura 36 – Comparativo dos perfis de convergências em elastoplasticidade para diferentes rigidezes de revestimento (K_R).....	96
Figura 37 – Comparativo dos perfis de convergências em elastoplasticidade para diferentes valores de d_0	97
Figura 38 – Resultado obtido em plasticidade não associada com o critério de Drucker-Prager	97
Figura 39 – Campo de deslocamentos radiais (m) em elastoplasticidade com revestimento considerando: $E_R = 3000$ MPa; $E = 500$ MPa; $d_0 = 2/3R_i$	98
Figura 40 – Campo de tensões radiais (MPa) em elastoplasticidade com revestimento considerando: $E_R = 3000$ MPa; $E = 500$ MPa; $d_0 = 2/3R_i$	99

Figura 41 – Perfil de convergências em viscoplasticidade com revestimento: $V = 1\text{m/dia}$...	100
Figura 42 – Perfil de convergências em viscoplasticidade com revestimento: $V = 5\text{m/dia}$...	101
Figura 43 – Perfil de convergências em viscoplasticidade com revestimento: $V = 10\text{m/dia}$.	102
Figura 44 – Comparativo dos perfis de convergências no curto (a) e no longo prazo (b) em viscoplasticidade com revestimento para diferentes valores de velocidade de escavação.....	104
Figura 45 – Detalhe do encontro do revestimento da galeria transversal (elementos hexaédricos) com o revestimento do túnel longitudinal (elementos tetraédricos).....	106
Figura 46 – Exemplo de malha, dimensões e condições de contorno do modelo 3D de túneis gêmeos com galerias transversais.....	107
Figura 47 – Exemplo de detalhe do encontro do revestimento da galeria transversal com o túnel longitudinal.....	108
Figura 48 – Elementos tridimensionais: SOLID185 (a) e SOLID186 (b).....	108
Figura 49 – Malha, dimensões e condições de contorno do modelo 3D de túneis gêmeos com galeria transversal desenvolvido na pesquisa.	110
Figura 50 – Detalhes 1 e 2 da malha e dimensões para o modelo 3D de túneis gêmeos com galeria transversal.....	111
Figura 51 – Detalhe 3 da malha e dimensões para o modelo 3D de túneis gêmeos com galeria transversal.....	112
Figura 52 – Detalhes 4 e 5 do encontro entre a galeria transversal e o túnel longitudinal.....	113
Figura 53 – Distribuição de tensões tangenciais (σ_θ) e radiais (σ_r) em MPa para os túneis gêmeos sem pressão de apoio.....	115
Figura 54 – Distribuição das tensões tangenciais (σ_θ) em MPa ao redor da seção do túnel .	116
Figura 55 – Verificação de resultados das tensões ortorradiais em MPa: Simulação numérica ANSYS x Solução Analítica Guo, Liu e Zhu (2021)	117
Figura 56 – Campo de tensões ortorradiais obtido a partir dos parâmetros de Gui, Liu e Zhu (2021)	118
Figura 57 – Campo de tensões radiais obtido a partir dos parâmetros de Gui, Liu e Zhu (2021)	118
Figura 58 – Deslocamentos totais obtidos a partir dos parâmetros de Gui, Liu e Zhu (2021)	119
Figura 59 - Deslocamentos totais obtidos a partir dos parâmetros de Gui, Liu e Zhu (2021)	120
Figura 60 – Perfil de convergência obtido a partir dos parâmetros de Guo, Liu e Zhu (2021)	121

Figura 61 – Comparativo de resultados de zonas plásticas: presente trabalho x Ma et al. (2020)	123
Figura 62 – Comparativo de resultados de zonas plásticas: presente trabalho x Ma et al. (2020)	123
Figura 63 – Comparativo de resultados de zonas plásticas: presente trabalho x Ma et al. (2020)	124
Figura 64 – Comparativo de resultados de zonas plásticas: presente trabalho x Ma et al. (2020)	125
Figura 65 – Comparativo de resultados de zonas plásticas: presente trabalho x Ma et al. (2020)	125
Figura 66 – Somatório de deslocamentos em metros obtido a partir dos parâmetros de Ma et al. (2020)	126
Figura 67 – Campo de tensões ortorradiais em MPa obtido a partir dos parâmetros de Ma et al. (2020)	127
Figura 68 – Campo de tensões radiais em MPa obtido a partir dos parâmetros de Ma et al. (2020)	128
Figura 69 – Campo de tensões na direção z em MPa obtido a partir dos parâmetros de Ma et al. (2020)	128
Figura 70 – Diagrama representativo do processo de avanço da frente de escavação e da instalação do revestimento.....	132
Figura 71 – Diagrama de tempo das idades do material para o modelo viscoelástico	133
Figura 72 – Diagrama representativo do número de passos de escavação, número de escavações e tempos relacionados: túneis longitudinais	136
Figura 73 – Diagrama representativo do número de passos de escavação, número de escavações e tempos relacionados: galeria transversal	137
Figura 74 – Ilustração da localização do ponto do monitoramento da convergência na seção transversal e representação do fenômeno de ovalização	139
Figura 75 – Configurações esperadas para as zonas com deformações irreversíveis no maciço	140
Figura 76 – Perfil de convergências do túnel isolado sem galeria transversal: comparativo sem revestimento e com revestimentos elástico e viscoelástico	141
Figura 77 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos sem revestimento e sem galeria transversal: comparativo de distância entre os túneis para maciço elastoplástico	143

Figura 78 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos para maciço elastoplástico: $d1 = 16Re$	144
Figura 79 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos para maciço elastoplástico: $d1 = 8Re$	145
Figura 80 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos para maciço elastoplástico: $d1 = 4Re$	147
Figura 81 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos para maciço elastoplástico sem revestimento: condição com e sem galeria transversal.....	149
Figura 82 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos sem galeria: modelos elastoplástico e viscoplástico com revestimento elástico no longo prazo.....	150
Figura 83 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos com galeria: modelos elastoplástico e viscoplástico com revestimento elástico no longo prazo.....	151
Figura 84 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos sem galeria para $d1 = 16Re$: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto e longo prazo.....	153
Figura 85 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos sem galeria para $d1 = 8Re$: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto e longo prazo.....	153
Figura 86 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos sem galeria para $d1 = 4Re$: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto e longo prazo.....	154
Figura 87 – Ovalização da seção para diferentes modelos constitutivos em $z = Lt - L2/4$ considerando $d1 = 4Re$ e escala = 50x.....	155
Figura 88 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos com galeria para $d1 = 16Re$: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto e longo prazo.....	156
Figura 89 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos com galeria para $d1 = 8Re$: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto e longo prazo.....	157
Figura 90 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos com galeria para $d1 = 4Re$: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto e longo prazo.....	157
Figura 91 – Resumo dos perfis de convergências dos túneis gêmeos sem galeria: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto prazo	159
Figura 92 – Resumo dos perfis de convergências dos túneis gêmeos sem galeria: comportamento de diferentes modelos constitutivos no longo prazo.....	160
Figura 93 – Resumo dos perfis de convergências dos túneis gêmeos com galeria: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto prazo	161

Figura 94 – Resumo dos perfis de convergências dos túneis gêmeos com galeria: comportamento de diferentes modelos constitutivos no longo prazo.....	162
Figura 95 – Comparativo dos perfis de convergências dos túneis gêmeos com galeria: maciço elastoplástico com revestimento elástico e elastoplástico-viscoplástico com revestimento viscoelástico no curto e longo prazo.....	163
Figura 96 – Isosuperfícies dos deslocamentos para o modelo EPVP CRVE CG LP.....	165
Figura 97 – Resumo dos perfis de convergências da galeria transversal para diferentes modelos constitutivos no longo prazo, considerando $d1 = 16Re$ e $d1 = 4Re$	166
Figura 98 – Perfis de convergências da galeria transversal no longo prazo para os modelos EPVP CRE e EPVP CRVE, considerando $d1 = 16Re$, $d1 = 8Re$ e $d1 = 4Re$	167

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Superfícies de plasticidade clássicas	74
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de entrada para as análises no ANSYS: estado axissimétrico	90
Tabela 2 – Comparativo da malha adotada com a malha de Quevedo (2017) para túneis gêmeos com galeria transversal	114
Tabela 3 – Parâmetros constitutivos do maciço e condições de contorno	130
Tabela 4 – Parâmetros relacionados à geometria do domínio, à escavação e à instalação do revestimento	131
Tabela 5 – Parâmetros constitutivos do revestimento	133
Tabela 6 – Parâmetros dos diagramas representativos do número de passos de escavação, número de escavações e tempos relacionados.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D – Estado bidimensional

3D – Estado tridimensional de deformações

AFTES – *Association Française des Tunnels et de L'espace Souterrain*

ANSYS – *Analysis System Software*

APDL – *Ansys Parametric Design Language*

ATG – *Alptransit Gotthard AG*

AXI – Estado axissimétrico de deformações

BBT – *Brenner Base Tunnel*

BISO – *Bilinear isotropic hardening*

CEB-FIP – *Comité Euro-International du Béton*

CF – Confinamento

CG – Com galeria transversal

CP – Curto Prazo

CRE – Com revestimento elástico

CRVE – Com revestimento viscoelástico

CV – Convergência

CV-CF – Método Convergência-Confinamento

DP – Drucker-Prager

E – Comportamento elástico

EP – Comportamento elastoplástico

EPVP – Comportamento elastoplástico-viscoplástico

EPD – Estado plano de deformações

FLAC – *Fast Lagrangian Analysis of Continua Software*

FORTTRAN – *Formula Translation*

GEOMECH91 – *Geomechanic Software*

GBT – *Gotthard Base Tunnel*

HPP – Hipótese das Pequenas Perturbações

HSE – *Health and Safety Executive*

HTI – Hipótese das Transformações Infinitesimais

ICE – *Institution of Civil Engineers*

ITA – *International Tunneling and Underground Space Association*

LP – Longo Prazo

MC90 – *Model Code 1990*

MC – Mohr-Coulomb

NATM – *New Austrian Tunneling Method*

NIM – *New Implicit Method*

RMR – *Rock Mass Rating*

SBB Company – *Swiss Federal Railways*

SG – Sem galeria transversal

SR – Sem revestimento

TBM – *Tunnel Boring Machine*

TR – Tresca

USERMAT – *User Defined Material Constitutive Model*

VE – Comportamento viscoelástico

VM – von-Mises

VP – Comportamento elastoviscoplastico

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

c_i – coesão inicial;

c_p – coesão do patamar ou de pico;

c_r – coesão residual;

C – coesão do material;

C' – coesão adimensional do maciço;

C^{vp} – coesão viscoplástica de longo prazo;

C_{TR} – Coesão considerando superfície de escoamento de Tresca;

C_{VM} – Coesão considerando superfície de escoamento de von-Mises;

$C(\alpha)$ – função coesiva;

d_0 – distância do revestimento instalado em relação à frente de escavação;

d'_0 – distância adimensional do revestimento instalado em relação à frente de escavação;

d_1 – distância entre os túneis longitudinais, de eixo a eixo da seção circular;

D – diâmetro da seção transversal do túnel;

$\underline{\underline{D}}$ – tensor constitutivo elástico linear de quarta ordem;

$\underline{\underline{D}}^*$ – tensor constitutivo elástico linear modificado;

$\underline{\underline{D}}_\mu$ – tensor constitutivo elástico linear, considerando o módulo de Young (módulo de elasticidade) ajustado da μ -ésima cadeia de Kelvin;

e – espessura do revestimento;

E – módulo de Young (módulo de elasticidade) do maciço;

E_0 – módulo de elasticidade dos agregados e partículas microscópicas da pasta de cimento do concreto;

$E_c(t_0)$ – módulo elástico tangente do concreto no instante inicial de aplicação da carga;

E_{ci} – módulo elástico tangente do concreto na idade de 28 dias;

E_R – módulo de Young (módulo de elasticidade) do revestimento;

E_μ – módulo elástico da μ -ésima cadeia de Kelvin;

E' – módulo de Young (módulo de elasticidade) adimensional do maciço;

E^* – módulo de elasticidade efetivo;

f_{cm} – resistência média a compressão do concreto;

F – critério de plasticidade;

F_0 – constante para adimensionalização do critério de viscoplasticidade F^{vp} ;

F^{vp} – função que representa o critério de viscoplasticidade;

G – função análoga a F entretanto, substituindo o ϕ (ângulo de atrito) pelo ângulo de dilatância

$0 < \psi < \phi$ nos parâmetros β_1 e β_2 ;

G – função potencial da plasticidade;

\underline{G}_σ – gradiente do potencial plástico;

G^{vp} – função potencial da viscoplasticidade;

$\underline{G}_\sigma^{vp}$ – gradiente do potencial viscoplástico;

h – função potencial relacionada às forças termodinâmicas associadas;

h_q – vetor que contém os gradientes da função potencial h em relação às forças termodinâmicas associadas;

H – profundidade do túnel em relação ao eixo da seção;

i_p – passo de escavação;

I_1 – primeiro invariante do tensor de tensões;

$J(t, t_0)$ – função de fluência;

J_2 – segundo invariante do tensor desviador;

k – coeficiente de empuxo;

K_R – rigidez equivalente do revestimento;

K'_R – rigidez equivalente adimensional do revestimento;

L_p – tamanho do passo de escavação;

n – expoente do modelo de Perzyna;

n_p – número de passos de escavação;

P_{eq} – pressão de equilíbrio de um túnel revestido;

P_h – pressão horizontal no domínio;

P_i – pressão interna fictícia no interior da seção do túnel;

P_{lim} – pressão limite a partir da qual se inicia a plastificação do maciço;

P_v – pressão vertical no domínio;

P_∞ – pressão geostática-hidroestática;

P'_∞ – pressão geostática-hidroestática adimensional;

q – força termodinâmica associada à variável interna α ;

\dot{q} – lei de endurecimento/amolecimento;

r – coordenada radial no plano da seção transversal do túnel;

R_i – raio da seção circular do túnel;

R_e – raio da interface entre o túnel e o maciço;

R_{e1} – raio da galeria transversal;

s – fator de segurança;

$\underline{\underline{s}}$ – tensor de tensões desviadoras;

$S(\alpha)$ – tensão de escoamento para Mohr-Coulomb e Drucker-Prager;

S' – parâmetro adimensional relacionado ao maciço;

t_p – tempo transcorrido durante cada passo de escavação;

t_s – tempo de cura do concreto;

t_0 – idade do concreto no momento de aplicação do incremento de tensão;

$(t - t_0)$ – idade do incremento de tensão;

$u(r)$ – deslocamento radial em uma coordenada radial r ;

U_0 – convergência da seção do túnel na cota não revestida, correspondente à distância não revestida, em relação à frente de escavação;

U_{eq} – convergência do maciço no equilíbrio;

U_i – convergência em $r = R_i$;

U_{pico} – convergência relacionada ao maior valor no ponto de encontro da galeria com o túnel;

V_p – velocidade do passo de escavação;

V' – velocidade adimensional;

x – distância da face de escavação do túnel em relação à seção de estudo;

y – raio da zona plástica ao redor da seção do túnel;

y_f – cota da face de escavação;

y_r – cota da face do revestimento.

Símbolos Gregos

α – variável interna que controla o endurecimento ou amolecimento isotrópico por deformação. Considerado como sendo a deformação plástica equivalente;

$\beta_c(t - t_0)$ – coeficiente que depende da idade do carregamento;

β_i – parâmetros da superfície de Drucker-Prager;

γ_c – deformação microviscoelástica da fração de volume solidificada do concreto;

γ_m – peso específico do maciço;

$\underline{\underline{\Delta\varepsilon}}$ – incremento de deformações;

$\underline{\underline{\Delta\varepsilon}}^{cr}$ – incremento de deformação por fluência;

$\underline{\underline{\Delta\varepsilon}}^{sh}$ – incremento de deformação por retração;

$\Delta\varepsilon^{sh}$ – variação da magnitude da deformação do concreto por retração;

$\underline{\underline{\Delta\sigma}}$ – incremento de tensões;

Δt_{lim} – limites para o incremento de tempo;

$\underline{\underline{\varepsilon}}$ – tensor de deformações totais;

$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}$ – taxa de deformações totais;

$\underline{\underline{\varepsilon}}^{cr}$ – tensor de deformações por fluência;

$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^{cr}$ – taxa das deformações por fluência;

$\underline{\underline{\varepsilon}}^e$ – tensor de deformações elásticas;

$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e$ – taxa das deformações elásticas;

$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p$ – taxa das deformações plásticas;

$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^{sh}$ – taxa das deformações por retração;

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

$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^{vp}$ – taxa das deformações viscoplásticas;

$\bar{\varepsilon}^p$ – deformação plástica equivalente;

η – coeficiente de viscosidade dinâmica;

$\eta(t)$ – viscosidade macroscópica aparente;

θ – ângulo de Lode;

λ_μ – fator que leva em conta a razão entre os incrementos de tempo e os incrementos de tempo de retardação do μ -ésimo elemento da cadeia de Kelvin;

$\dot{\lambda}$ – taxa da magnitude da deformação plástica (taxa do multiplicador plástico);

$\dot{\lambda}^{vp}$ – taxa da magnitude da deformação viscoplástica (taxa do multiplicador viscoplástico);

ν – coeficiente de Poisson do maciço;

ν_R – coeficiente de Poisson do revestimento;

$\nu(t)$ – fração de volume solidificada do concreto;

ρ – coeficiente de viscosidade do material;

σ – tensão;

$\underline{\underline{\sigma}}$ – tensor de tensões totais;

σ_{eq} – tensão equivalente;

σ_i – tensões principais para $i=1$ até 3 ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$);

σ_m – tensão média;

$\sigma_{rr} = \sigma_r$ – tensão na direção radial;

$\sigma_s = \sigma_0$ – tensão de escoamento do material;

$\sigma_v = \sigma_y$ – tensão vertical;

σ_x – tensão horizontal;

$\sigma_{zz} = \sigma_z$ – tensão ortogonal ao plano da seção do túnel;

$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_\theta$ – tensão na direção tangencial;

$\underline{\underline{\dot{\sigma}}}$ – taxa das tensões;

$\underline{\underline{\sigma^D}}$ – tensor desviador;

τ_μ – tempo de retardamento à fluência da μ -ésima unidade da cadeia de Kelvin;

ϕ – ângulo de atrito interno;

ϕ_0 – coeficiente que depende da idade do concreto no instante de aplicação da carga;

Φ, Φ^{vp} – função de sobretensão do modelo de Perzyna;

Ψ – ângulo de dilatância;

Ω – potencial viscoplástico.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	26
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	30
2.1 TEMA.....	30
2.2 PROBLEMA DE PESQUISA	30
2.3 OBJETIVOS.....	30
2.4 DELIMITAÇÕES.....	31
2.5 METODOLOGIA E ETAPAS DO ESTUDO.....	32
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
3.1 ESTADO DA ARTE	33
3.2 ASPECTOS GERAIS DE TÚNEIS GÊMEOS PROFUNDOS	36
3.3 INFLUÊNCIA DA ESCAVAÇÃO	39
3.4 PROBLEMA DE INTERAÇÃO MACIÇO-REVESTIMENTO	42
3.4.1 Posição do problema.....	43
3.4.2 Curvas características	44
3.4.3 Curvas de confinamento e convergência no diagrama P_i x U_i : obtenção dos parâmetros de dimensionamento.....	46
3.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	48
3.5.1 Métodos analíticos.....	49
3.5.2 Métodos simplificados.....	51
3.5.2.1 <i>New Austrian Tunneling Method</i> (NATM)	52
3.5.2.2 Método da convergência-confinamento (<i>CV-CF</i>).....	55
3.5.2.3 Novo Método Implícito (<i>NIM</i>)	59
3.5.3 Métodos diretos	59
4 MODELOS CONSTITUTIVOS	64
4.1 MODELOS DE REVESTIMENTO	64
4.1.1 Revestimento elástico linear e não linear	64
4.1.2 Revestimento de comportamento inelástico	66
4.2 LEI CONSTITUTIVA DO REVESTIMENTO DE CONCRETO	67
4.3 LEI CONSTITUTIVA DO MACIÇO	71
4.3.1 Leis de comportamento	72
4.3.1.1 Lei de comportamento elástico.....	72

4.3.1.2 Lei de comportamento plástico.....	72
4.3.1.3 Lei de comportamento viscoplástico - Modelo de Perzyna.....	76
4.3.1.4 Lei de comportamento elastoplástico-viscoplástico	79
5 VERIFICAÇÕES PRELIMINARES CONSIDERANDO TÚNEL PROFUNDO	87
5.1 PARÂMETROS ADIMENSIONAIS.....	87
5.2 PARÂMETROS ADOTADOS PARA A REALIZAÇÃO DAS VERIFICAÇÕES	89
5.3 VERIFICAÇÕES PRELIMINARES EM ELASTICIDADE E ELASTOPLASTICIDADE	91
5.4 VERIFICAÇÕES PRELIMINARES EM VISCOPLASTICIDADE.....	99
6 ESTUDO DA CONVERGÊNCIA DE MALHA E VERIFICAÇÕES COM SOLUÇÕES ANALÍTICAS EM TÚNEIS GÊMEOS PROFUNDOS.....	105
6.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO.....	105
6.2 VERIFICAÇÃO COM SOLUÇÃO ANALÍTICA EM ELASTICIDADE.....	115
6.3 VERIFICAÇÃO COM SOLUÇÃO ANALÍTICA EM ELASTOPLASTICIDADE.....	121
7 ANÁLISES PARAMÉTRICAS COM DIVERSAS LEIS CONSTITUTIVAS	129
7.1 PARÂMETROS ADOTADOS PARA A REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES.....	130
7.2 ANÁLISES DO PERFIL DE CONVERGÊNCIA COMPARANDO COM TÚNEL ISOLADO.....	141
7.3 ANÁLISES DO PERFIL DE CONVERGÊNCIA DE TÚNEIS GÊMEOS CONSIDERANDO DIVERSOS MODELOS CONSTITUTIVOS	148
7.4 ANÁLISES DO PERFIL DE CONVERGÊNCIA DA GALERIA TRANSVERSAL CONSIDERANDO DIVERSOS MODELOS CONSTITUTIVOS	166
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	170
REFERÊNCIAS	173
APÊNDICE A – PLANILHA RESUMO COM OS RESULTADOS DAS ANÁLISES	179

1 INTRODUÇÃO

A ocupação superficial do solo, principalmente nas regiões mais desenvolvidas dos centros urbanos, corroborada pela crescente preocupação com a preservação do meio ambiente e com a mitigação dos impactos decorrentes da intervenção humana, incentivam o desenvolvimento e a implementação de técnicas que permitam o melhor aproveitamento do espaço subterrâneo. Neste contexto, os túneis configuram-se como solução para a problemática de diversos cenários, seja para o transporte e tráfego de pessoas e mercadorias, seja para viabilizar a infraestrutura de serviços públicos como redes de saneamento, dutos, galerias, canalizações e poços de descarte e armazenamento de materiais radioativos, ou, ainda, para a transposição de adversidades topográficas, como regiões montanhosas, e para atividades de mineração.

De acordo com Cayro (2020), em diversas situações a preferência pela execução de túneis se justifica diante de outras estruturas superficiais, como vias elevadas e pontes, tendo em vista que o custo de manutenção durante a vida útil da estrutura, a economia de energia, a avaliação dos impactos ambientais, as perturbações ocasionadas no processo de execução, a necessidade de desapropriações e a avaliação da prioridade de utilização do espaço superficial podem condicionar e favorecer a tomada de decisão. Dessa forma, a implementação de túneis beneficia a utilização da superfície terrestre para finalidades mais nobres, como moradia, trabalho e lazer, além de reduzir a deterioração do entorno e minimizar a alteração da configuração e das características naturais do local, preservando a valorização da região envolvida. Em alguns países desenvolvidos já existe a priorização de estruturas subterrâneas para preservar a superfície, como, por exemplo, a Holanda, que construiu o *Roertunnel* e o *Swalmentunnel* para preservar áreas verdes.

No entanto, cabe ressaltar a complexidade da concepção de projetos de túneis, uma vez que confrontam aspectos ambientais, sociais, econômicos, legislativos, bem como exigem avaliações geotécnicas e estruturais. Existem variáveis importantes no dimensionamento de túneis, como a convergência da cavidade, a pressão atuante no revestimento e a descompressão do maciço, bem como a ocorrência de assentamentos na superfície nos casos de túneis superficiais. Ademais, o campo de deformações e tensões ao redor do túnel é dependente da profundidade, da geometria da seção, da distribuição de cargas na superfície, da heterogeneidade e distribuição das camadas do maciço, do comportamento mecânico do maciço

e do revestimento, do processo de escavação e de colocação do revestimento e da interação entre o maciço e o revestimento.

Denota-se, ainda, o risco de acontecimentos inconvenientes durante a execução destas grandes obras de arte, relacionados com a dificuldade de prever, de modelar e de compreender o desempenho e a interação entre duas estruturas tão distintas, o maciço e o revestimento do túnel, particularizando a complexidade de um comportamento essencialmente tridimensional, principalmente na proximidade com a face do túnel, conforme abordado por Bernaud, Benamar e Rousset (1994). Os incidentes resultantes destas complicações manifestam-se em atrasos no cronograma de execução, custos excessivos e não previstos, bem como implicações mais gravosas, como a perda de vidas e o comprometimento de patrimônio de terceiros.

Dentre os assuntos abordados no estudo de túneis, destaca-se a importância da relação entre o comportamento imediato e o diferido destes, tendo em vista a correlação representativa nas deformações e estabilidade da cavidade. De acordo com Quevedo (2021), a plastificação da região mobilizada no maciço ao redor do túnel, a convergência progressiva da seção, a extrusão da face de escavação e a sobrecarga atuante sobre o revestimento podem se manifestar e progredir durante o período de construção, relacionando-se com o comportamento imediato, ou seja, no curto prazo, ou após a conclusão da execução, durante o regime de serviço, no médio e longo prazo, ou seja, associando-se ao comportamento diferido. O reflexo deste comportamento pode ser observado em deformações excessivas, em deterioração do revestimento e, de acordo com a intensidade dos efeitos, inclusive no colapso da região mobilizada no entorno do túnel.

Desse modo, considerando a complexidade do tema e a relevância da contribuição para a comunidade geotécnica que se dedica à pesquisa de túneis, este estudo apresenta a implementação de diversos modelos constitutivos destinados a descrever o comportamento do maciço e do revestimento do túnel. Especial ênfase é dada ao modelo acoplado elastoplástico-viscoplástico.

Neste contexto, utiliza-se o modelo computacional desenvolvido para conduzir uma análise paramétrica. Esta análise tem o propósito de investigar a interação entre túneis gêmeos, considerando a presença ou a ausência da galeria de interligação. Em particular, o foco recai sobre o efeito que a interseção com a galeria transversal exerce sobre o perfil de convergência do túnel longitudinal. Além disso, examina-se como a distância entre os túneis longitudinais influencia este perfil. Assim, o presente trabalho divide-se nos seguintes capítulos:

O Capítulo 2 destina-se a especificar as diretrizes da pesquisa desenvolvida nesta dissertação, determinando o tema e a problemática de estudo, bem como estabelecer os objetivos, as delimitações e a metodologia empregada para alcançar os resultados.

O Capítulo 3 busca contextualizar de modo geral os túneis gêmeos profundos, apresentado aspectos gerais característicos deste tipo de estrutura, como a influência do processo de escavação, o problema tridimensional resultante da interação maciço-revestimento e os conceitos específicos fundamentais sobre túneis, como convergência e confinamento. Além disso, introduz informações resumidas sobre alguns dos métodos de dimensionamento existentes e cita alguns estudos sobre túneis gêmeos profundos de outros autores, enquanto resultado da revisão bibliográfica realizada nesta pesquisa.

O Capítulo 4 traz uma breve abordagem sobre os modelos de revestimento e apresenta as leis constitutivas consideradas para o maciço e para o revestimento de concreto, com ênfase no modelo viscoelástico para o revestimento e no acoplamento plasticidade-viscoplasticidade para o comportamento do maciço.

O Capítulo 5 mostra as verificações preliminares direcionadas ao estudo do comportamento do perfil de convergência relacionadas a túneis profundos simples, considerando a abordagem do domínio em axissimetria com a aplicação de leis constitutivas elástica, elastoplástica e viscoplástica para o maciço e a utilização de revestimento elástico. Ademais, apresenta os parâmetros adimensionais relacionados às leis constitutivas no contexto das soluções analíticas.

O Capítulo 6 descreve o estudo da convergência de malha realizado para a discretização espacial do domínio aplicado no presente trabalho para o estudo de túneis gêmeos profundos com galeria transversal, determinando os tipos de elementos finitos empregados. Este capítulo mostra, ainda, a verificação parcial do modelo computacional, implementado na análise paramétrica do Capítulo 7, realizada através de comparações com soluções analíticas desenvolvidas por outros autores, em elasticidade e elastoplasticidade, para túneis gêmeos sem galeria de interligação.

O Capítulo 7 apresenta a análise paramétrica direcionada ao estudo de túneis gêmeos profundos interligados por galerias transversais de seção circular, aplicando diferentes leis constitutivas para o maciço e para o revestimento, com ênfase no comportamento do maciço, considerando o acoplamento plasticidade-viscoplasticidade. Portanto, busca-se investigar a interação entre os túneis gêmeos com ou sem a galeria de interligação, analisando o efeito no perfil de

convergências do túnel longitudinal e a influência da distância entre os túneis neste perfil. Nesse capítulo, também serão feitas análises considerando o revestimento viscoelástico.

O Capítulo 8 expõe as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

2.1 TEMA

Deformações induzidas pelo processo construtivo de túneis profundos com galerias transversais, considerando o comportamento instantâneo e diferido no tempo.

2.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Qual é a influência das galerias transversais nos túneis gêmeos profundos, levando em consideração a aplicação de leis constitutivas não-lineares, onde o revestimento e o maciço apresentam o comportamento instantâneo e diferido no tempo?

2.3 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho consiste em aplicar modelos constitutivos não-lineares, tanto para o maciço, quanto para o revestimento, a fim de analisar as diferenças destas leis nas deformações instantâneas e diferidas na região de encontro entre as galerias transversais e os túneis longitudinais profundos.

Tem-se como objetivos específicos:

- a) Elaborar, por meio da utilização do *software* ANSYS, um *script APDL* que viabilize a análise de túneis gêmeos profundos com galerias transversais com a lei de comportamento elastoplástica-viscoplástica para o maciço e viscoelástica para o revestimento;
- b) Empregar o recurso de customização USERMAT para introduzir as leis constitutivas desenvolvidas por Quevedo (2017) e Quevedo (2021);
- c) Avaliar a convergência da malha com soluções analíticas desenvolvidas por Guo, Liu e Zhu (2021) e Ma *et al.* (2020);
- d) Analisar a convergência da seção do túnel longitudinal no encontro da galeria, por meio da variação de diferentes modelos constitutivos;
- e) Analisar as variações e os resultados dos estudos paramétricos, a fim de aferir a influência da galeria sobre os túneis gêmeos e a interação mútua entre os túneis.

2.4 DELIMITAÇÕES

Para o desenvolvimento deste trabalho, fez-se necessário adotar as delimitações especificadas abaixo:

- a) Assume-se apenas túneis considerados profundos, desprezando-se as influências da superfície, como, por exemplo, as deformações impostas por cargas superficiais e os recalques decorrentes do processo de escavação;
- b) Desconsidera-se as discontinuidades do maciço decorrentes da heterogeneidade da estratificação de suas camadas, adotando-o como um meio contínuo, homogêneo e isotrópico;
- c) Apesar da grande complexidade do estado de tensões internas de um maciço, decorrente, por exemplo, das discontinuidades, anisotropia e heterogeneidade dos materiais, serão utilizadas, antes do processo construtivo, tensões verticais e horizontais iguais, se tratando, portanto, de um estado de tensões iniciais geostático-hidrostático;
- d) Túneis gêmeos muitas vezes são executados com defasagem da frente de escavação. No presente trabalho, como o foco será a introdução da galeria, a escavação será feita concomitantemente para ambas as frentes, utilizando condições de simetria, de modo a reduzir o tempo de processamento computacional;
- e) Diferentemente da condição real inerente à execução de túneis, em que a velocidade de escavação e de instalação do revestimento são variáveis durante o processo de construção, adota-se velocidade de avanço constante, espessura do revestimento uniforme ao longo do eixo longitudinal do túnel e escavação realizada à plena seção, de modo plano e vertical;
- f) Embora seja reconhecida a realidade da complexidade do comportamento do maciço, influenciado por diversas propriedades que variam no espaço, este estudo adotará um maciço homogêneo e isotrópico. Mesmo que o maciço em que o túnel seja construído apresente discontinuidades, em diversas situações, seu comportamento global pode ser assumido e modelado como um meio contínuo. Desse modo, o maciço é presumido monofásico, modelado fenomenologicamente por uma lei reológica elastoplástica-viscoplástica para representar seu comportamento instantâneo e

diferido, não ponderando, portanto, outros enfoques de análises como, por exemplo, a influência de gradientes de temperatura ou do fluxo da água, e da poro mecânica;

- g) Não serão consideradas as excitações dinâmicas (proveniente de uma análise considerando terremotos e explosões, por exemplo), ou os termos inerciais (densidade e aceleração), de modo que a evolução das deformações ocorra de maneira quase-estática. Logo, assume-se a hipótese das pequenas perturbações.

2.5 METODOLOGIA E ETAPAS DO ESTUDO

A metodologia aplicada neste trabalho leva em consideração o estudo teórico acerca de túneis profundos e leis de comportamento não-lineares, aplicando-se a modelagem computacional para a solução da problemática de forma numérica com o emprego do *software* ANSYS, a fim de viabilizar o estudo pelo Método dos Elementos Finitos. Por conseguinte, para o desenvolvimento do trabalho elenca-se as seguintes etapas:

- a) Pesquisa bibliográfica sobre túneis, com ênfase em túneis gêmeos profundos;
- b) Estudo sobre os modelos constitutivos, em particular do modelo elastoplástico-viscoplástico para o maciço e do modelo viscoelástico para o revestimento, desenvolvidos por Quevedo (2021) e Quevedo (2017), respectivamente;
- c) Realização de estudos preliminares mais simples para a compreensão do comportamento de túneis profundos durante o processo construtivo, empregando o *software* ANSYS nas análises e a verificação dos resultados com a solução numérica obtida pelo código GEOMEQ91 (BERNAUD, 1991);
- d) Desenvolvimento da malha e das condições necessárias para a modelagem numérica no *software* ANSYS para a solução do problema proposto, implementando o modelo constitutivo no *software* ANSYS através da sub-rotina USERMAT e desenvolvendo o domínio tridimensional de estudo na linguagem APDL (*Ansys Parametric Design Language*);
- e) Realização do estudo de convergência de malha, no espaço e no tempo, através de soluções analíticas que consideram túneis gêmeos;
- f) Estudos paramétricos de túneis com galerias e análise dos resultados encontrados;
- g) Conclusões.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados aspectos importantes acerca de túneis, com destaque para túneis gêmeos profundos com galerias transversais. Ademais, busca-se expor as referências de alguns estudos direcionados a túneis gêmeos profundos encontrados durante a revisão bibliográfica realizada nesta pesquisa, ou seja, o estado da arte, bem como explicar sobre a influência do processo de escavação, a problemática tridimensional que envolve a interação entre o maciço e o revestimento, alguns conceitos importantes relacionados à estrutura de túneis e alguns exemplos de métodos existentes aplicados para o dimensionamento de túneis.

Para os modelos constitutivos do revestimento e do maciço empregados neste trabalho serão utilizados como referenciais teóricos os estudos realizados por Quevedo (2017, 2021), apresentando de forma resumida estes modelos.

3.1 ESTADO DA ARTE

Como resultado da revisão bibliográfica realizada sobre túneis profundos, pode-se elencar alguns estudos mais recentes, sobretudo relacionados a túneis gêmeos profundos com galerias transversais, encontrados em Fortsakis *et al.* (2012); Spyridis e Bergmeister (2015); Ma *et al.* (2020); Chortis e Kavvadas (2021a); Chortis e Kavvadas (2021b); Guo, Liu e Zhu (2021); Chortis e Kavvadas (2023a); Chortis e Kavvadas (2023b) e Gkikas e Nomikos (2023). Desse modo, apresenta-se de forma sintetizada alguns comentários sobre os referidos estudos.

Chortis e Kavvadas (2021a) consideraram o cálculo das forças axiais que atuam sobre o apoio primário na zona de intersecção antes, durante e após a construção de um túnel transversal que interliga túneis gêmeos. Os resultados das análises indicaram que a zona de influência se estende aproximadamente dois diâmetros (2D) do túnel principal para cada lado a partir do centro da intersecção, sendo que os efeitos de interação são praticamente eliminados quando excedem esta zona de influência delimitada.

Em outra pesquisa, Chortis e Kavvadas (2021b) realizaram análises paramétricas de elementos finitos 3D, para verificar a interação entre túneis gêmeos profundos, com seção circular e não circular, suportados por revestimento de concreto projetado, considerando o maciço com comportamento elástico linear, perfeitamente plástico, com critério de ruptura de Mohr-Coulumb, e o revestimento elástico linear. O estudo se direciona a investigação das forças axiais que se desenvolvem no revestimento primário dos túneis gêmeos em função dos principais

parâmetros geométricos e dos geomateriais, porém, sem considerar as potenciais deformações dependentes do tempo (efeito de fluência) que ocorrem em alguns tipos de maciços rochosos.

Já Guo, Liu e Zhu (2021) desenvolveram um método analítico para avaliar a distribuição e a concentração de tensões, constatando o aumento desta concentração quando a distância entre os túneis paralelos e a pressão no suporte diminuía. Gkikas e Nomikos (2023), a partir da importância de análises axissimétricas, consideraram o maciço com comportamento elástico linear, perfeitamente plástico, com critério de ruptura de Hoek-Brown. Assim, estes autores analisaram cenários com e sem revestimento de concreto elástico linear, averiguando que a incorporação do suporte para estimar o confinamento antes da efetiva instalação deste é de extrema importância para o desenvolvimento do projeto do revestimento.

De acordo com Ma *et al.* (2020), o reconhecimento da zona plástica ao redor do túnel fornece um embasamento teórico relevante para a definição e concepção do suporte. Ademais, mencionaram que uma zona plastificada excessiva afeta significativamente a estabilidade e a funcionalidade de um túnel. Logo, a delimitação da zona plástica no entorno de túneis é de grande importância para o desenvolvimento dos projetos.

Ao revisar a literatura, verifica-se que, por meio de análises numéricas tridimensionais paramétricas, Chortis e Kavvadas (2023a; 2023b) investigaram o efeito da construção de um túnel transversal que interceptava perpendicularmente os túneis gêmeos profundos, direcionando o estudo, respectivamente, para as forças axiais e para os momentos fletores circunferenciais e longitudinais atuantes no suporte primário das regiões de intersecção. A partir disso, foi possível observar os efeitos da interação e confrontar os resultados das forças axiais e dos momentos fletores no suporte primário dos túneis principais antes, durante e depois da construção do túnel transversal.

Nos modelos numéricos do referido estudo, foram utilizados elementos sólidos para a representação do maciço rochoso com comportamento elástico linear, perfeitamente plástico, com critério de ruptura generalizado de Hoek-Brown, e elementos de casca para a modelagem do suporte de concreto projetado com comportamento elástico linear. Conforme os autores, deve-se levar em consideração a interação potencial entre túneis gêmeos profundos revestidos com concreto projetado, principalmente quando o afastamento entre estes for menor ou igual a duas vezes o seu diâmetro.

Dessa forma, no contexto realista de construção, os túneis gêmeos são escavados e apoiados com um atraso, de modo que o segundo túnel é normalmente construído após o primeiro ter avançado o suficiente para manter uma distância de separação longitudinal entre as faces. Portanto, o avanço do túnel subsequente mobiliza a redistribuição das tensões e deformações na zona entre os túneis, resultando no carregamento adicional do túnel precedente (FORTSAKIS *et al.*, 2012).

Quanto aos túneis transversais, estes são geralmente construídos a uma distância suficiente atrás da face de avanço do túnel principal para garantir que a sua escavação praticamente não tenha efeito durante a construção do túnel de junção (CHORTIS E KAVVADAS, 2021a). A interação na intersecção, entre o túnel principal e o túnel transversal, modifica significativamente o estado de tensão do suporte primário e o do maciço rochoso circundante nestas áreas, em comparação com o do túnel singular, tornando as análises tridimensionais de elementos finitos essenciais ao desenvolvimento de um projeto realista e seguro para a realização de junções entre túneis (SPYRIDIS E BERGMEISTER, 2015).

Durante a construção do túnel transversal, o maciço rochoso circundante é submetido a uma redistribuição de tensões, causando uma carga adicional no túnel principal, exatamente na zona de intersecção. Se estas cargas adicionais excederem a capacidade de carga do suporte primário do túnel principal, pode desenvolver-se uma região potencialmente instável, conduzindo a falhas, especialmente em condições geotécnicas adversas (CHORTIS E KAVVADAS, 2021a).

Neste contexto, o presente trabalho direciona-se ao estudo de túneis gêmeos profundos interligados por galeria transversal. O objetivo é proceder à modelagem computacional de túneis com o auxílio do Método dos Elementos Finitos, de forma a considerar o comportamento instantâneo e diferido no tempo da convergência e avaliar a influência da galeria no perfil de convergências dos túneis longitudinais. Para isso, buscou-se realizar a investigação numérica tridimensional a partir de análises paramétricas, a fim de aferir a interação mútua entre os túneis gêmeos com ou sem galeria de interligação. Em particular, destaca-se o efeito observado no perfil de convergências do túnel longitudinal devido a intersecção com a galeria transversal, assim como a influência da distância entre os túneis longitudinais sobre este perfil.

3.2 ASPECTOS GERAIS DE TÚNEIS GÊMEOS PROFUNDOS

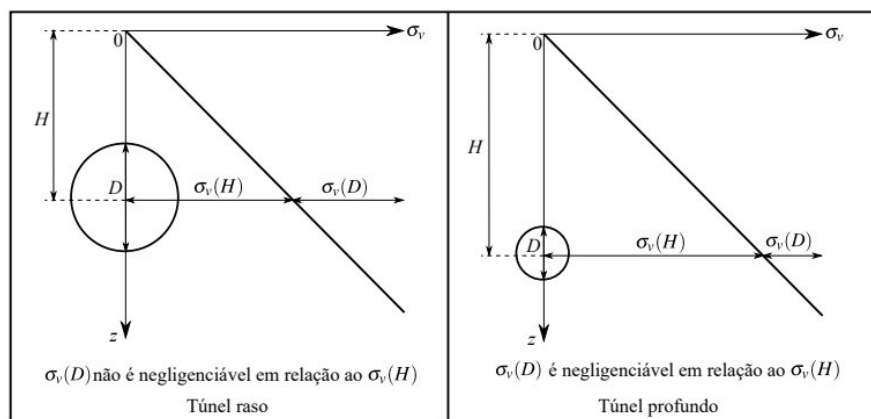
De acordo com o Congresso Internacional sobre Túneis ocorrido em Washington, no mês de junho de 1970, o conceito de túnel está relacionado à execução de uma cavidade aberta de geometria predefinida, com o emprego de metodologia qualquer, com implantação e finalidade de utilização abaixo da superfície terrestre, sendo a área transversal da seção superior a dois m² (SILVEIRA, 1974).

Quanto à profundidade, pode-se classificar os túneis em superficiais (rasos) e profundos. Neste caso, não há uma definição absoluta quanto ao parâmetro de classificação, mas destacam-se a consideração da ocorrência de deformações superficiais, presente nos casos de túneis superficiais, e a relação entre a profundidade do eixo (H) e o diâmetro da seção transversal (D) do túnel, conforme Figura 1 (BENAMAR, 1996). Assim, segundo Benamar (1996), um túnel será considerado profundo se o diâmetro da seção (D) ou diâmetro equivalente, quando a seção não é circular, é pequeno se comparado com a profundidade do eixo (H) do túnel, ou seja, $H/D > 10$.

Em túneis profundos, observa-se que a variação da tensão vertical inicial, anteriormente a escavação, entre as partes superior e inferior da seção do túnel $\sigma_v(D)$, é desprezível quando comparada com a tensão vertical inicial devido ao peso do maciço na profundidade média do túnel $\sigma_v(H)$ (profundidade do eixo) (BENAMAR, 1996). Destaca-se, ainda, que a tensão vertical pode ser obtida pela expressão abaixo, onde γ_m é o peso específico do maciço e H é a profundidade do túnel (HOEK; BROWN, 1980):

$$\sigma_v(z = H) = \gamma_m \cdot H \quad (1)$$

Figura 1 – Distinção entre túnel raso e túnel profundo



Fonte: BENAMAR (1996)

No que diz respeito a túneis gêmeos, no geral, observa-se a configuração de uma estrutura composta pela formação de duas vias paralelas e independentes. Quando destinados para a finalidade de transporte, podem ser projetados para o tráfego de diferentes modais, como rodoviário e ferroviário, por exemplo, de modo que o fluxo ocorra no mesmo sentido ou em sentidos opostos em cada túnel. No caso de ambientes urbanos, pode ocorrer o agravante da distância reduzida entre eles e da necessidade da execução de um túnel adjacente a outro existente por questões de limitações espaciais ou de preservações de estruturas presentes no entorno.

Com o intuito de ampliar a segurança dos usuários em túneis gêmeos de grande extensão, usualmente, empregam-se galerias transversais que interligam os dois túneis. Estas consistem em rotas de saída em circunstâncias de emergência, passagem de um túnel para o outro, fácil acesso para a realização de manutenções e podem, inclusive, contribuir para o melhoramento da qualidade de ar e da ventilação ao longo dos túneis, possibilitando a renovação de ar.

De acordo com a *Swiss Federal Railways* (SBB Company), o *Gotthard Base Tunnel* (GBT), construído pela *AlpTransit Gotthard AG* (ATG) e inaugurado em 2016, é o túnel ferroviário mais longo do mundo, oferecendo uma ligação mais rápida e confiável entre a Suíça e a Itália, tanto para pessoas quanto para mercadorias. O GBT possui duas estações multifunções com pontos de água para comboios de combate a incêndios e salvamento, quatro estações de parada de emergência, 57 km de túneis paralelos e 178 passagens transversais de conexão entre os túneis paralelos, localizadas a cada 325 m. (FABBRI, D.; STRASSL, C.; PEGGS, S., 2007).

Em fase de construção e com previsão de conclusão do projeto para o ano de 2032, o *Brenner Base Tunnel* (BBT) é um túnel ferroviário reto e plano que prevê a conexão de dois países, apresentando uma extensão de 55 km entre Innsbruck (Áustria) e Fortezza (Itália). A projeção de interligação do BBT ao *Inn valley tunnel* de 12,7 km, inaugurado em maio de 1994 ao sul de Innsbruck, resultará em uma linha com um total de 64 km, tornando-se a maior conexão ferroviária subterrânea do mundo (BBT SE, 2023).

O BBT consiste em dois tubos, cada um com 8,1 m de largura, distantes 40 a 70 m um do outro. Cada um desses tubos é equipado com uma via única, o que significa que o tráfego de trem através dos tubos é unidirecional. Os dois tubos estão interligados a cada 333 m por túneis laterais. Estes podem ser usados em emergências como rotas de fuga, garantindo conformidade com os mais altos padrões de segurança para túneis (BBT SE, 2023).

Uma característica peculiar do *Brenner Base Tunnel* (BBT) é o túnel exploratório que vai de uma ponta à outra. Este túnel situa-se entre os dois túneis principais e cerca de 12 m abaixo deles, com um diâmetro de 5 m, visivelmente menor do que os tubos principais. As escavações em curso no túnel exploratório deverão fornecer informações sobre o maciço rochoso e, assim, reduzir ao mínimo os custos e os tempos de construção. O túnel exploratório será essencial para a drenagem quando o BBT entrar em operação (BBT SE, 2023).

Em relação às análises numéricas para túneis gêmeos, comumente, busca-se a resolução através de duas perspectivas, sendo a primeira com a implementação de um modelo bidimensional, considerando deformações planas, o que implica em algumas limitações, como a ausência da correta modelagem da face de avanço dos túneis. A segunda alternativa refere-se ao emprego de um modelo numérico tridimensional que corresponde ao método que possibilita a correta modelagem do avanço da escavação e da colocação do revestimento, através do método da ativação e desativação dos elementos finitos. Assim, um dos parâmetros mais importantes no estudo de túneis gêmeos refere-se à definição da distância entre eixos de túneis e da distância de defasagem da face de escavação.

O estudo do comportamento mecânico dos materiais envolvidos na análise da estrutura de túneis é essencial, pois viabiliza a compreensão da interação entre o maciço e o revestimento, elementos principais do problema. A partir das leis constitutivas, que apresentam as diretrizes da relação entre as tensões e deformações e do modo como se desenvolve ao longo do tempo, pode-se interpretar o modelo reológico atribuído a cada elemento.

Ademais, sabendo-se do elevado grau de dificuldade que envolve a análise relacionada às galerias transversais em túneis gêmeos profundos, a resolução da problemática depende do emprego de modelos numéricos tridimensionais. Dessa forma, devido à complexidade do problema, sugere-se um elevado grau de detalhamento do modelo numérico, para que haja uma maior proximidade de resultados com a realidade do túnel projetado.

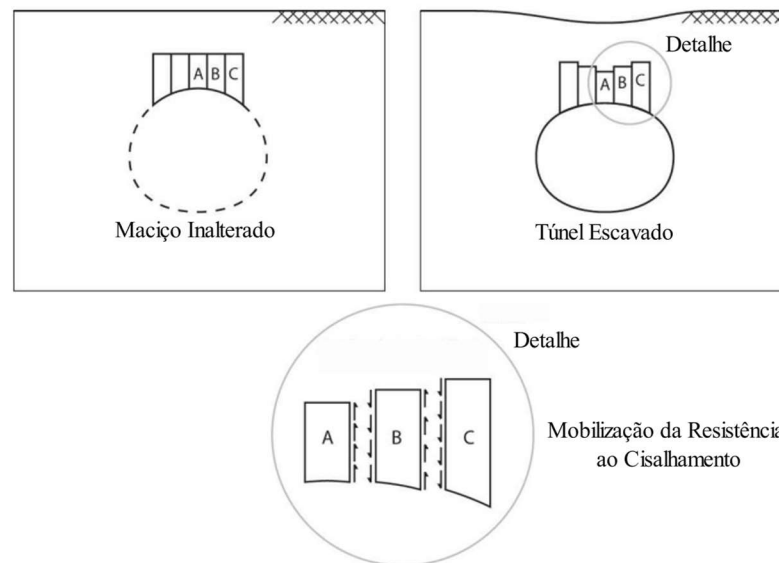
A análise da interface entre as galerias transversais e os túneis principais configura-se como um fator importante na modelagem tridimensional. Neste estudo, julgou-se relevante a realização de testes de sensibilidade de malha para a observação dos campos de tensões e deslocamentos nestes locais, de modo a avaliar a qualidade dos resultados obtidos.

3.3 INFLUÊNCIA DA ESCAVAÇÃO

Independentemente do método construtivo empregado, a retirada de material de dentro da geometria escavada em um túnel estimula a ocorrência do movimento do maciço circundante na direção da abertura realizada. Assim, levando em consideração o estado de tensão inicial do maciço, ao proceder a escavação, as tensões circunvizinhas à abertura sofrem um processo de rearranjo, formando um novo estado de tensão devido a redistribuição, denominado estado de tensões induzidas, também conhecido como fenômeno de arqueamento de tensões. Dessa forma, esta nova condição regulará o comportamento do maciço após a escavação (HOEK, KAISER E BAWDEN, 1995).

Para compreender o fenômeno de arqueamento de tensões considera-se o comportamento de uma faixa do maciço relativamente acima do perímetro da abertura do túnel, conforme indicado na Figura 2. Observa-se que os elementos A, B e C, anteriormente à execução da abertura, localizam-se perfeitamente alinhados com o perímetro da escavação. Entretanto, a partir da execução da escavação, percebe-se que o elemento A apresenta um deslocamento superior ao elemento B e este desloca-se mais que o elemento C. O resultado da diferença entre estes deslocamentos condiciona o surgimento de tensões de cisalhamento entre os elementos representados. Assim, caso o maciço não possua propriedades geomecânicas suficientes para mobilizar resistência ao esforço de cisalhamento, ocorrerá o deslocamento uniforme entre os elementos A, B e C, bem como em todo o contorno da escavação, implicando o colapso do túnel (FRANÇA, 2006).

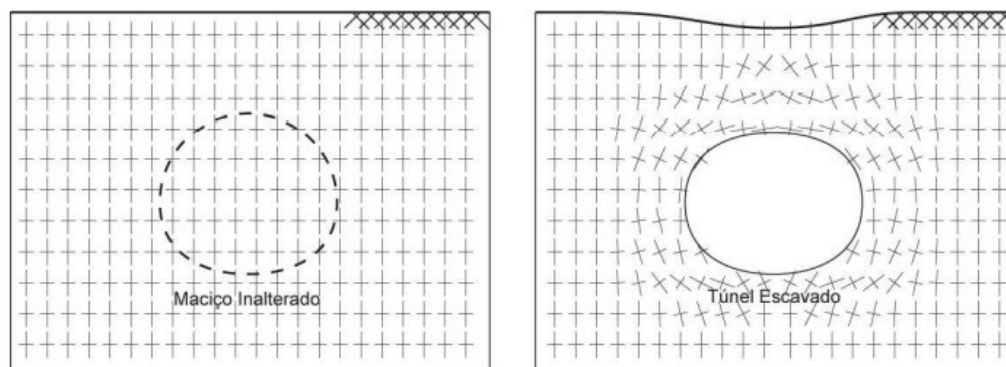
Figura 2 - Demonstração da mobilização da resistência ao cisalhamento do maciço no entorno da abertura do túnel



Fonte: adaptado de FRANÇA (2006)

De acordo com França (2006), em uma condição inicial e ideal, anterior à execução da escavação, não há tensões de cisalhamento nos planos vertical e horizontal do maciço, ou seja, a direção das tensões principais coincide com os eixos vertical e horizontal, existindo apenas tensões normais. No entanto, conforme evidenciado acima, posteriormente à execução da abertura no maciço, aparecem tensões de cisalhamento no entorno da escavação, que induzem a ocorrência de desvios nas direções das tensões principais da região mobilizada do maciço, fazendo com que estas não coincidam mais com os planos verticais e horizontais que passam pelo eixo do túnel, conforme ilustrado na Figura 3.

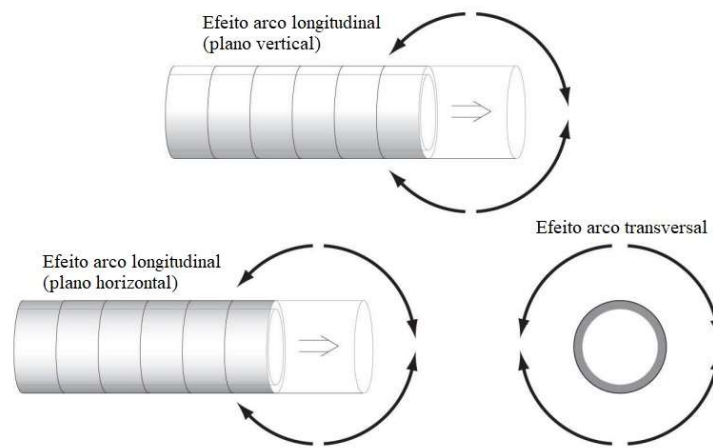
Figura 3 – Apresentação da direção das tensões principais antes e após a escavação



Fonte: FRANÇA (2006)

Destaca-se que o fenômeno de arqueamento das tensões se pronuncia tanto nos planos verticais e horizontais longitudinais, quanto nos planos transversais ao eixo do túnel, conforme ilustrado na Figura 4. Logo, a frente de escavação condiciona o surgimento de uma zona de influência tridimensional, devida à mobilização das tensões tangenciais que implicam o desvio das tensões principais.

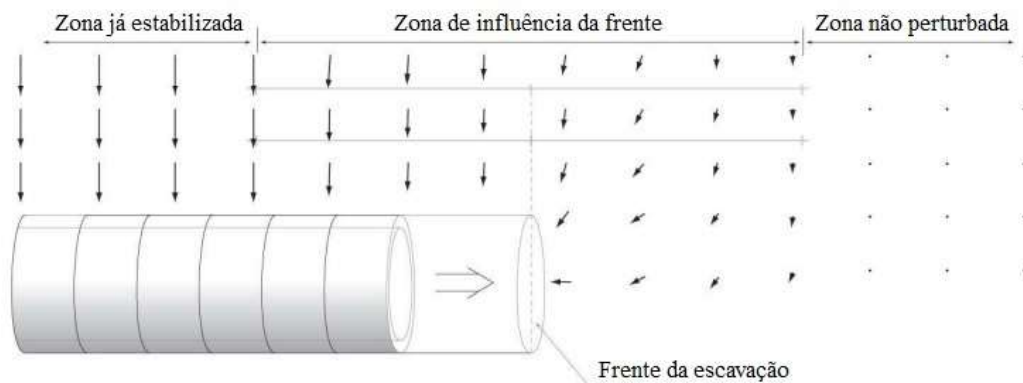
Figura 4 – Apresentação do arqueamento tridimensional das tensões no avanço da escavação



Fonte: FRANÇA (2006)

O avanço da frente de escavação de um túnel promove a movimentação do maciço na direção da cavidade aberta. Assim, conforme é possível visualizar na Figura 5, identifica-se a região tridimensional do estado de deformação na proximidade da frente de escavação e a região de equilíbrio após a escavação, onde a frente de trabalho não possui mais representatividade, evidenciando um comportamento próximo do estado plano de deformações.

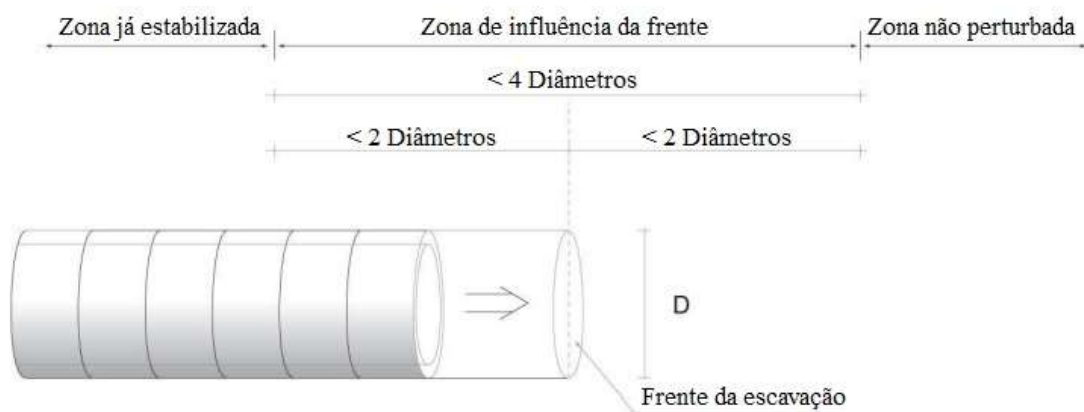
Figura 5 – Deslocamentos do maciço com o avanço da frente de escavação do túnel



Fonte: FRANÇA (2006)

A partir das características do maciço e da competência do sistema de suporte empregado pode-se estimar a distância da frente de escavação em que ocorrerá a condição de equilíbrio e o estado plano de deformação (GALLI, GRIMALDI E LEONARDI, 2004 *apud* FRANÇA, 2006). De acordo com Shahrour e Ghorbanbeigi (1996) *apud* França (2006), quanto menor a resistência do maciço, maior será a zona de plastificação e, por conseguinte, maior será a distância exigida para que a situação de estado plano de deformação seja atingida. No que diz respeito ao sistema de suporte empregado, quanto mais rígido e mais depressa for instalado, mais rápido ocorrerá a instauração da condição de equilíbrio. Segundo França (2006), no geral, conforme pode ser visualizado na Figura 6, a influência da escavação estende-se até, aproximadamente, dois diâmetros a frente e atrás da frente de escavação.

Figura 6 – Zona de influência da frente de escavação



Fonte: FRANÇA (2006)

De acordo com Rocha (1971), o equilíbrio estabelecido pelo rearranjo das tensões pode ser obtido tanto pelo próprio maciço na condição autoportante, ou seja, sem a necessidade do auxílio de um elemento de suporte, quanto pela implementação de um sistema de suporte para conter as deformações do maciço, recorrente na maioria dos casos. Outrossim, pode-se destacar que os deslocamentos, que acontecem no decorrer da etapa construtiva a uma grande distância de afastamento da face do túnel, são essencialmente radiais e assimétricos em referência ao plano que contém o eixo horizontal do túnel (ALMEIDA E SOUSA, 2005).

3.4 PROBLEMA DE INTERAÇÃO MACIÇO-REVESTIMENTO

O problema decorrente da interação entre o maciço e o sistema de suporte implementado para limitar as deformações configura-se como um sistema hiperestático, implicando elevada

complexidade para determinar o estado de tensão-deformação. A redistribuição de tensões na região circunvizinha não escavada do maciço, decorrente das deformações ocorridas anterior e posteriormente à instalação da estrutura de suporte, ocasiona o efeito de arqueamento de tensões, ou seja, o redirecionamento das tensões principais no maciço, conforme abordado no item precedente.

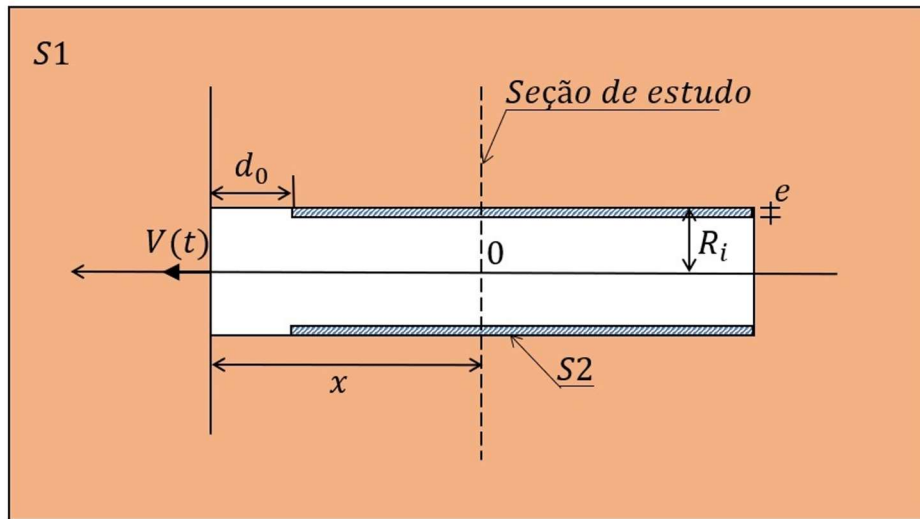
Por conseguinte, o carregamento atuante na estrutura de suporte, bem como os esforços mobilizados e os deslocamentos que ocorrem nesta são considerados interdependentes e correlacionados. Portanto, denota-se que estes são resultantes das tensões iniciais e das características geométricas da escavação, das propriedades mecânicas do maciço e do procedimento construtivo do túnel, mais precisamente do sistema de escavação, da velocidade de avanço, da tipologia, das características e do instante de instalação do suporte (ALMEIDA E SOUSA, 1998).

Tendo em vista o exposto acima, comprova-se que para o devido estudo do processo de execução de um túnel faz-se necessária uma análise tridimensional, levando em consideração a simulação das etapas de escavação do maciço e da instalação do suporte. No entanto, a abordagem do problema com o auxílio de formulações simplificadas que consideram o estado plano de deformação é recorrente em estudos preliminares e nos casos em que as características geotécnicas e geométricas ao longo do eixo do túnel são mantidas praticamente constantes.

3.4.1 Posição do problema

De acordo com Bernaud (1991), o problema de túneis revestidos apresenta duas particularidades essenciais, sendo a importância do acoplamento entre o maciço e o revestimento e a condição tridimensional, visto que a proximidade da frente de trabalho o torna não simétrico. Logo, a construção de um túnel, levando em consideração as etapas de escavação e de instalação do revestimento, consiste em um problema de natureza tridimensional, pois trata-se da análise da interação entre o maciço e o revestimento, conforme mostrado na Figura 7. Ademais, o nível atual de conhecimento sobre o comportamento mecânico de túneis profundos em maciços rochosos demonstra que, geralmente, estas estruturas possuem efeitos diferidos, ou seja, evolução da convergência e/ou da pressão sobre o revestimento ao longo do tempo (BERNAUD, 1991).

Figura 7 – Posição do problema de natureza tridimensional – interação maciço-revestimento



e – espessura do revestimento
 R_i – raio da seção circular do túnel
 d_0 – distância do revestimento instalado em relação à frente de escavação
 $V(t)$ – velocidade do avanço da escavação
 $S1$ – maciço
 $S2$ – revestimento

Fonte: adaptado de PIEPI (1995)

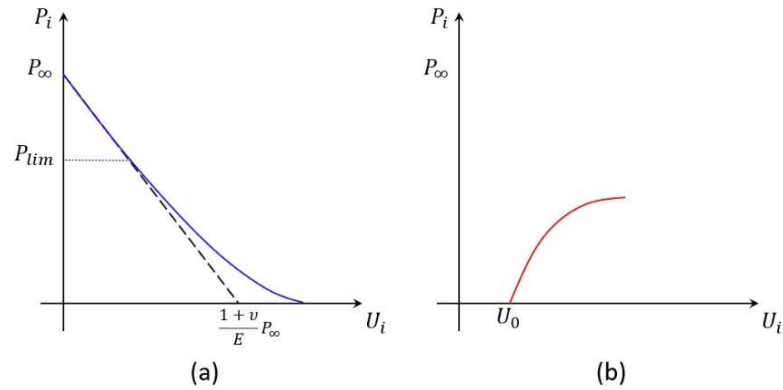
Este efeito diferido ao longo do tempo deve-se a dois principais fatores, sendo o primeiro relacionado ao comportamento reológico do maciço e o segundo atrelado ao histórico de escavação da estrutura. Além disso, o estado de tensões e de deformações ao redor da seção de um túnel revestido depende de aspectos como as características geométricas e mecânicas do maciço e do revestimento, sobretudo das leis de comportamento, as condições de escavação, como velocidade de escavação e etapas de construção, e as condições de instalação do revestimento, principalmente no que diz respeito à distância de instalação em relação à frente de escavação (BERNAUD, 1991).

3.4.2 Curvas características

As curvas características resumem as informações sobre o comportamento do maciço e do revestimento no gráfico $P_i \times U_i$, ilustrado na Figura 8, representando as relações entre a pressão e a convergência radial do maciço e do suporte. Desse modo, a curva de convergência (CV) relaciona-se apenas com a lei de comportamento do maciço, correspondendo a convergência U_i do túnel em função da pressão P_i aplicada na parede. Por outro lado, a curva de confinamento (CF) envolve somente a lei de comportamento do revestimento, representando a convergência

do suporte U_i em função da pressão P_i aplicada no revestimento, sendo uma linha reta no caso do comportamento elástico linear (PIEPI, 1995).

Figura 8 – Curvas de convergência (a) e confinamento (b)

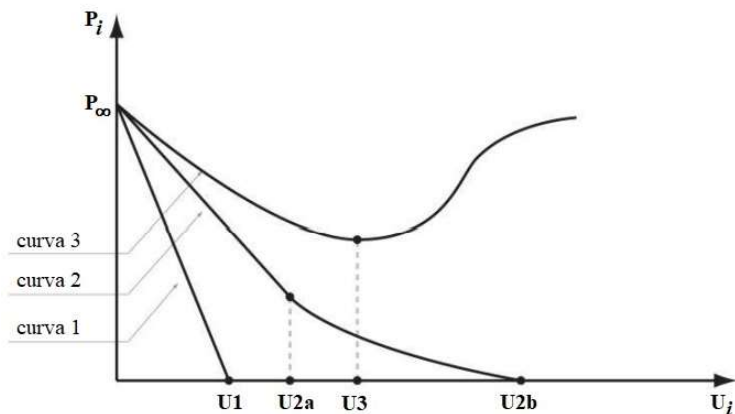


Fonte: adaptado de PIEPI (1995)

Assim, pode-se aplicar uma pressão fictícia no contorno da escavação para simular o efeito do avanço da escavação. Através das curvas características do maciço, Figura 9, consegue-se demonstrar a relação existente entre a pressão P_i na interface maciço-revestimento e a convergência U_i .

$$U_i = - \frac{u(r = R_i)}{R_i} \tag{2}$$

Figura 9 – Curvas características do maciço



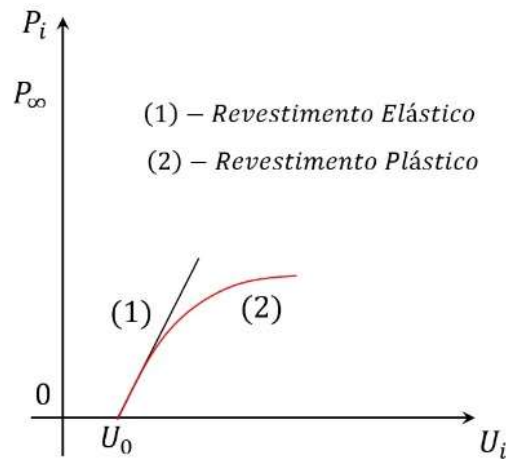
Fonte: adaptado de FRANÇA (2006)

Na curva 1 da Figura 9 pode-se observar um comportamento elástico linear, representando um maciço autoportante, em que a deformação do maciço no entorno da abertura se dá de forma

diretamente proporcional ao alívio das tensões no contorno da escavação, sendo $U1$ a convergência final no contorno da escavação. Em relação a curva 2, após atingir o valor de convergência $U2a$, percebe-se o início do regime não linear do tipo elastoplástico, alcançando a estabilização com a convergência de valor $U2b$. No entanto, na curva 2 tem-se um maciço que não se pode considerar autoportante, pois se $U2b$ for muito grande haverá a degradação do maciço e, conseqüentemente, a necessidade de um revestimento. Por fim, na curva 3 é necessário o emprego de um suporte que permita uma convergência com o valor limite antes de $U3$ para evitar o colapso da abertura.

Evidencia-se que, embora o maciço apresente característica autoportante, nos casos das curvas 1 e 2 recomenda-se o emprego de estrutura de suporte para restringir os deslocamentos finais, de forma a controlar os valores de convergência. Assim, a instalação de uma estrutura de suporte implica uma problemática de interação maciço-estrutura na obtenção do equilíbrio, em que a rigidez relativa entre o maciço e o revestimento aplicado, bem como os deslocamentos existentes no instante de instalação do suporte, tornam-se essenciais na análise. Aproveita-se para ilustrar na Figura 10 os comportamentos admitidos para o revestimento.

Figura 10 – Curvas características do revestimento



Fonte: adaptado de PIEPI (1995)

3.4.3 Curvas de confinamento e convergência no diagrama $P_i \times U_i$: obtenção dos parâmetros de dimensionamento

A curva de convergência (CV) está relacionada ao comportamento do maciço, resultando do gráfico da convergência U_i em função de uma pressão interna fictícia P_i que atua no interior da

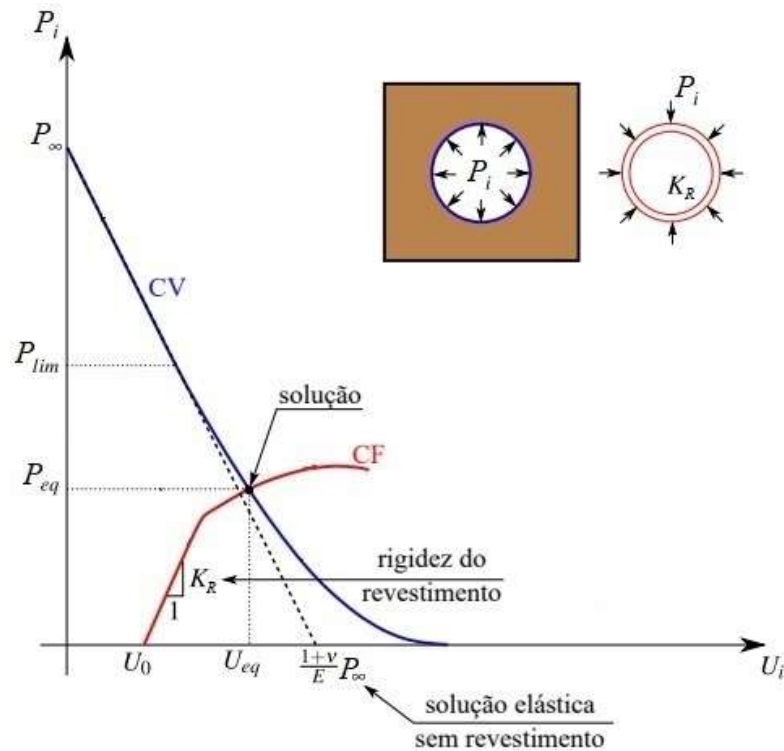
cavidade, correspondendo a variação desta pressão do valor da tensão inicial geostática-hidroestática P_∞ até zero. A curva de convergência independe do suporte e reflete o comportamento do maciço quando submetido a uma simulação de descompressão, representada pela variação de P_i . No caso em que o maciço apresenta um comportamento elastoplástico, a curva demonstra um trecho linear elástico até o momento em que a descompressão alcança o valor limite P_{lim} , a partir do qual passa a ser um trecho não-linear (QUEVEDO, 2021).

Todavia, a curva de confinamento (CF) refere-se ao revestimento, ou seja, ao suporte do túnel. Logo, obedece unicamente a lei constitutiva do revestimento. No entanto, o ponto de partida desta curva relaciona-se com o valor da convergência U_0 correspondente a uma distância d_0 , representando a convergência no instante de colocação do revestimento, que depende da interação entre o maciço e o revestimento instalado anteriormente, pois a seção do túnel, localizada a uma distância d_0 da face de escavação, já apresenta certa convergência durante o avanço da execução (QUEVEDO, 2021).

Estas curvas podem ser adquiridas tanto através de soluções analíticas, quanto numéricas, as quais permitem considerar leis de comportamento de maior complexidade. Não obstante, a definição de U_0 somente é possível com emprego de método que contemple a plena interação entre o maciço e o revestimento, quais sejam análises tridimensionais, axissimétricas ou medidas *in loco* (QUEVEDO, 2021).

A utilização dos conceitos de curva de convergência do maciço e de curva de confinamento do revestimento permite desacoplar o problema de interação entre o maciço e o revestimento. Assim, a união das duas curvas em um único gráfico $P_i \times U_i$ possibilita encontrar o ponto de equilíbrio ($P_{eq} \times U_{eq}$), ou seja, a pressão de equilíbrio P_{eq} e a convergência ao equilíbrio U_{eq} , que corresponde a intersecção entre as duas curvas e, por conseguinte, a solução do problema de interação entre o maciço e o revestimento, conforme ilustrado na Figura 11 (QUEVEDO, 2021).

Figura 11 – Curvas de confinamento e convergência no gráfico $P_i \times U_i$ – Solução do problema de interação maciço-revestimento



Fonte: BERNAUD, BENAMAR E ROUSSET (1994) adaptado por QUEVEDO (2021)

3.5 MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

O aperfeiçoamento tecnológico dos mecanismos e ferramentas para execução de túneis aliado ao avanço dos estudos e das análises permitiram aos engenheiros viabilizarem diversas metodologias voltadas ao desenvolvimento de projetos de túneis. Segundo as recomendações indicadas pela *Association Française des Tunnels et de L'espace Souterrain* (AFTES, 2001) sobre o método da convergência-confinamento (CV-CF) no ano de 2001, os métodos direcionados ao dimensionamento de suportes de túneis podem ser classificados em quatro grupos:

- a) Métodos essencialmente empíricos, que levam em consideração diversos sistemas geotécnicos de classificação para indicar o tipo de suporte mais recomendado conforme a situação analisada;
- b) Métodos que definem a carga atuante no suporte, independentemente do tipo e da deformação deste;

- c) Métodos de projeto de suporte, que levam em consideração as cargas atuantes impostas pelo maciço, como dados de entrada, porém consideram a rigidez e as deformações do suporte, bem como as reações do maciço no entorno;
- d) Métodos que consideram a interação maciço-suporte.

De acordo com Iftimie (1996), a progressão dos métodos se deve, principalmente, a dois domínios da Mecânica de Meios Deformáveis, correspondendo à Resistência dos Materiais e à Teoria da Elasticidade. No entanto, há, ainda, alguns métodos empíricos amparados na experiência, observações e medições.

Os métodos empíricos buscam reproduzir os tipos de suportes que obtiveram êxito em situações semelhantes ao projeto em análise. Desta aplicação, conforme destacado por Panet (1995), surge o conceito de “obras de referência”. Assim, o dimensionamento está atrelado às informações registradas e à avaliação da semelhança entre as condições da referência e do projeto a ser realizado. As informações analisadas relacionam-se com a profundidade e a largura do túnel, dados geométricos da problemática, bem como as condicionantes geológicas e geomecânicas.

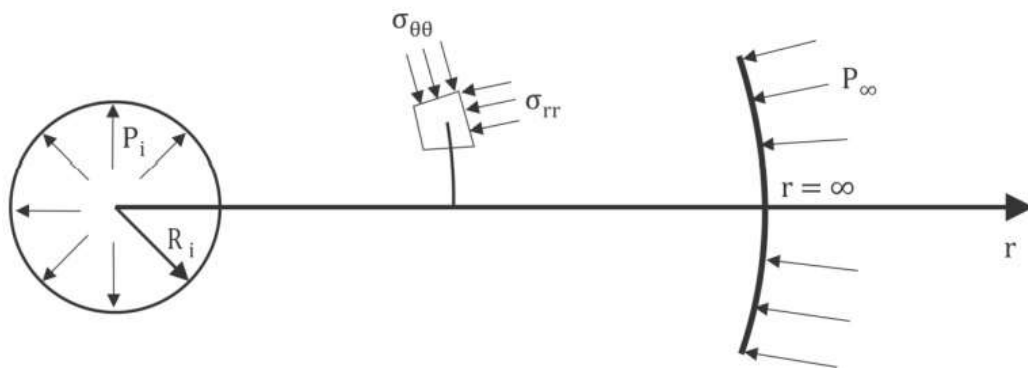
Portanto, a classificação do maciço decorre da análise de parâmetros geotécnicos, que indicarão um tipo específico de suporte após a avaliação e a atribuição de uma nota calculada para o maciço. Como exemplos de métodos empíricos pode-se citar o baseado no *Rock Mass Rating* (RMR) desenvolvido por Bieniawski (1989) e o baseado no Índice Q proposto por Grimstad e Barton (1993).

3.5.1 Métodos analíticos

Os métodos analíticos, embora apresentem uma grande importância no entendimento do fenômeno, na verificação numérica e na proposta de métodos simplificados, limitam-se a diversas hipóteses como, por exemplo, domínio infinito, maciço isotrópico e homogêneo, seção circular, estado plano de deformações ou axissimetria, ausência da interação entre o maciço e o revestimento, assim como leis constitutivas mais simples. Por conseguinte, a partir do problema formulado, obedecendo a Teoria da Elasticidade, da plasticidade, da viscoplasticidade e outras, as soluções destes métodos consistem na utilização de equações exatas.

Para o caso de túneis profundos, com seção transversal circular, percebe-se que o raio do túnel apresenta uma dimensão muito pequena quando comparado à profundidade e ao comprimento. Assim, assumindo-se o comportamento inicial do maciço como um estado de tensões geostático-hidrostático, aplica-se a solução a partir de um estado plano de deformações, com as equações subordinadas somente à componente radial, sendo o campo de deslocamentos no entorno das paredes do túnel com o comportamento demonstrado na Figura 12 (BERNAUD, 1991).

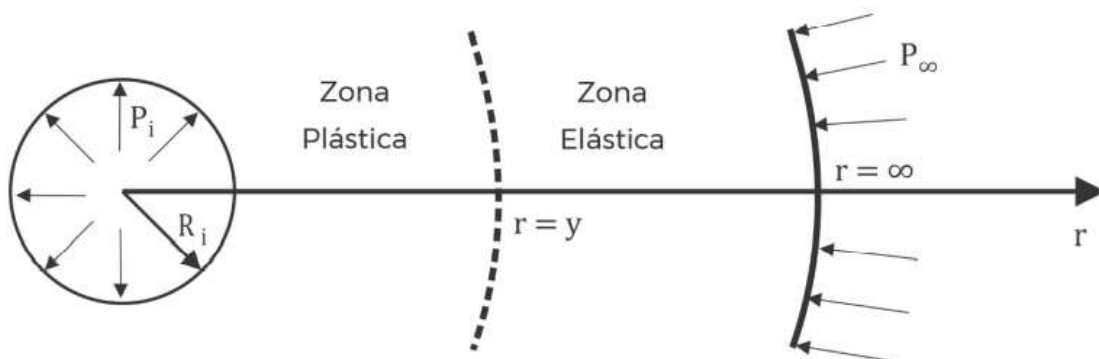
Figura 12 – Campo de deslocamentos no entorno do túnel no caso de método analítico



Fonte: adaptado de BERNAUD (1991)

No caso de um túnel em elastoplasticidade, sem encruamento, tem-se duas zonas ao redor do maciço. A primeira, partindo da parede do túnel, corresponde à zona plástica e a segunda, a partir do raio plástico y , refere-se à zona elástica que se estende até o infinito, como mostra a Figura 13.

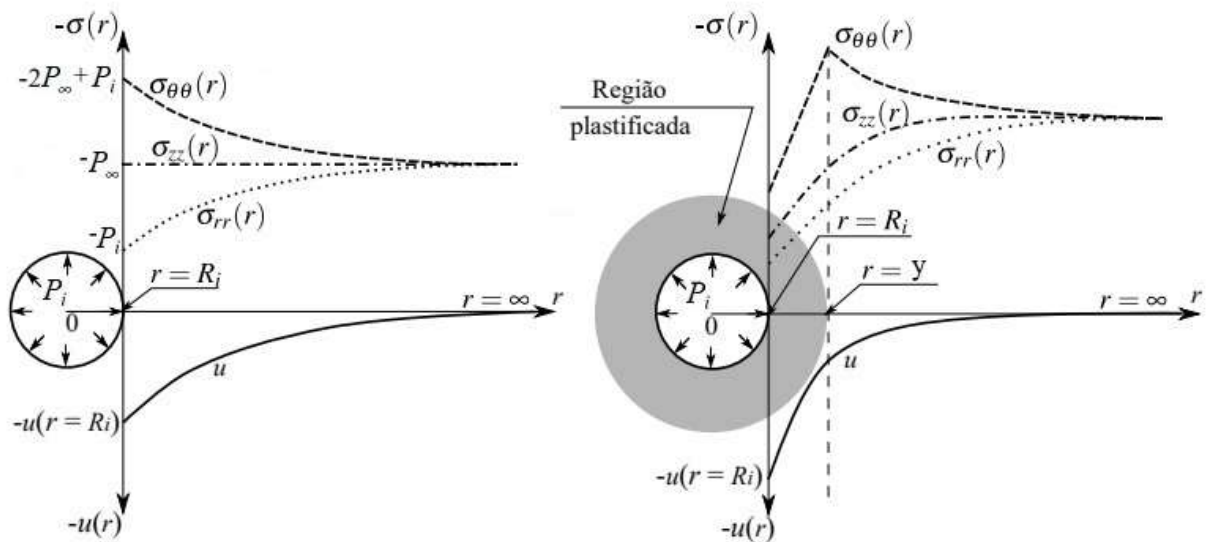
Figura 13 – Delimitação da região plástica e elástica no maciço



Fonte: adaptado de BERNAUD (1991)

O comportamento típico de tensões e deslocamentos da solução em estado plano de deformações radiais, considerando o maciço elástico e elastoplástico, conforme a coordenada r , é ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Comportamento da solução em estado plano de deformações radiais: maciço elástico (a) e maciço elastoplástico (b)



Fonte: adaptado de QUEVEDO (2021)

3.5.2 Métodos simplificados

Os métodos simplificados consistem no emprego de mecanismos que simplificam profundamente o processo de caracterização do estado de equilíbrio final do túnel. Estes são amplamente empregados no pré-dimensionamento de túneis devido a rapidez na obtenção de estimativas razoáveis de resultados, assegurando uma boa base para os modelos mais refinados de cálculo a serem empregados posteriormente.

Assim, embora assumam hipóteses restritivas, estes métodos possibilitam uma investigação rápida sobre a escolha do método de escavação e do tipo de revestimento, com a utilização das curvas características do problema, ou seja, curva de convergência e curva de confinamento. Por isso, são muito empregados na fase de pré-dimensionamento de túneis.

3.5.2.1 *New Austrian Tunneling Method* (NATM)

O *New Austrian Tunneling Method* (NATM), comumente tratado como uma técnica especial e ao mesmo tempo reconhecido como uma espécie de filosofia, surgiu a partir de diversas contribuições importantes na engenharia de túneis. Entretanto, foi apresentado pela primeira vez por Rabcewicz em uma palestra no *Thirteenth Geomechanics Colloquium* em Salzburg no ano de 1962 (SAUER, 1988), sendo que a primeira versão em inglês surgiu em 1964, também produzida por Rabcewicz (1964a, 1964b, 1965).

De acordo com Rabcewicz (1964a, 1964b, 1965), a definição do método relaciona-se a aplicação de uma fina camada de concreto projetado o mais rápido possível para fechar o arco definido como “arco auxiliar”, de modo que a deformação seja medida ao longo do tempo até que se atinja o equilíbrio. Desse modo, enfatiza três principais pontos: aplicação de uma camada fina de concreto projetado, fechamento do arco o mais breve possível e a medida sistemática de deformação.

Pode-se citar, ainda, mais duas definições, sendo a primeira decorrente da redefinição dada pelo *Austrian National Committee for Underground Construction of the International Tunneling and Underground Space Association* (ITA) em 1980 (KARAKUS e FOWELL, 2004) e a segunda, mais recente, por Sauer (1988). Assim, respectivamente, define-se o NATM como uma concepção que utiliza o terreno no entorno da cavidade (solo ou rocha) como elemento de suporte pela ativação de um anel de suporte de terreno, ou como um método que produz espaço subterrâneo empregando todos os meios possíveis para desenvolver ao máximo, a capacidade da rocha ou do solo de se autossustentar, de modo a atingir a estabilidade da escavação.

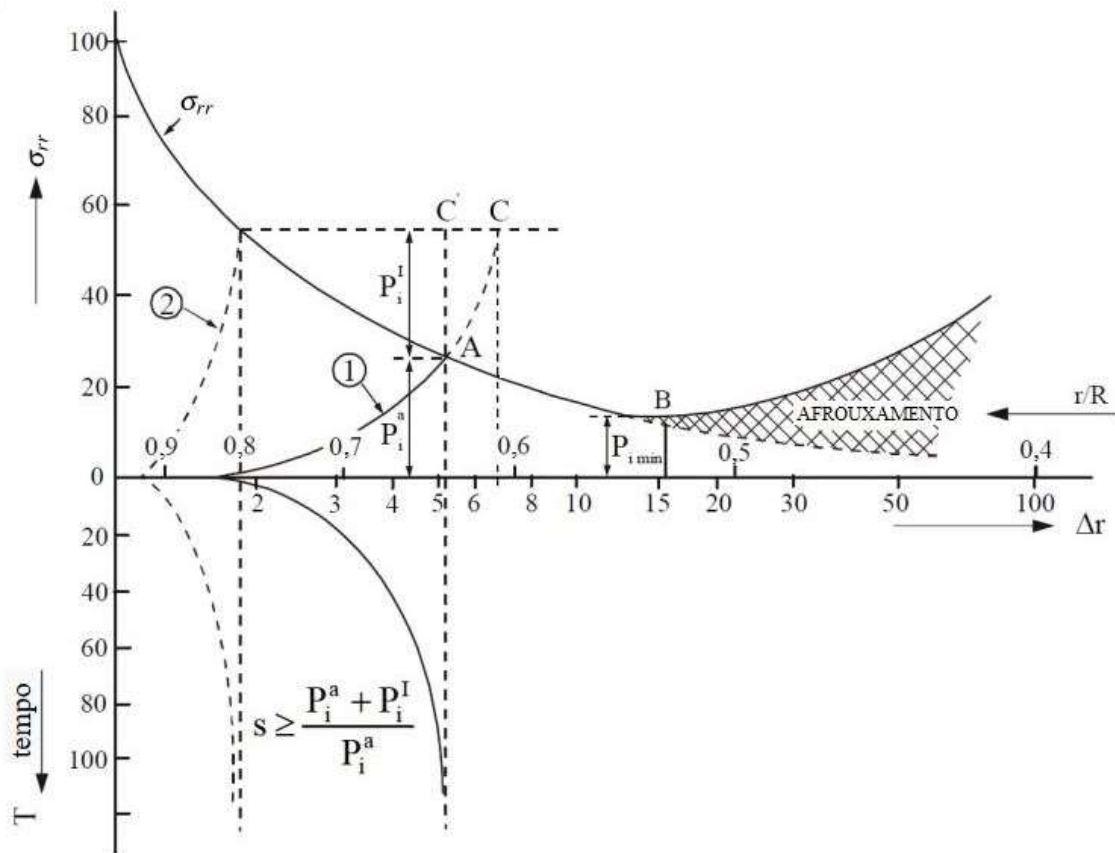
Em suma, para os austríacos, o NATM consiste numa abordagem de túneis ou filosofia e não em um conjunto de técnicas de escavação e suporte. De acordo com Karakus e Fowell (2004), como exemplo de autores que ratificam esta ideia pode-se elencar Golser (1979), Hagenhofer (1990) e Barton e Grimstad (1994).

A partir das seguintes referências, Brown (1981), Will (1989), Wallis (1995a, 1995b), ICE (1996), HSE (1996), Bowers (1997), Fowell & Bowers (1998), pode-se obter os princípios mais importantes do NATM (KARAKUS e FOWELL, 2004):

- a) A resistência do maciço no entorno do túnel precisa ser preservada e deliberadamente mobilizada ao máximo;
- b) A partir da deformação controlada do maciço permite-se a mobilização da resistência, de modo que a deformação excessiva resultaria em perda de resistência ou grandes deformações superficiais;
- c) Para alcançar o princípio do item anterior, emprega-se o suporte inicial, que pode ser de tirantes ou enfilagens e finas camadas de concreto projetado;
- d) O revestimento permanente é usualmente implementado mais tarde;
- e) A partir das condições da rocha ou do solo ajusta-se, em um tempo apropriado, o fechamento do anel;
- f) Deve-se realizar testes em laboratório e monitoramento da deformação do suporte;
- g) Todos os envolvidos com a execução, o projeto e a supervisão de uma construção com emprego do NATM devem compreender e aceitar a abordagem do método para reagirem de forma conjunta na resolução de problemas;
- h) O comprimento do trecho do túnel não revestido deve ser o menor possível.

De acordo com a curva de Fenner (1938) e Pacher (1964), representada por Rabcewicz e Golser (1973), que está demonstrada na Figura 15, observa-se que a curva de resposta do maciço demonstra a interação maciço-suporte e as deformações no tempo, atuando como uma ferramenta para auxiliar na definição da rigidez adequada do suporte e o momento favorável de instalação deste.

Figura 15 – Curva de Fenner-Pacher: curva de resposta que representa a interação maciço-suporte e as deformações no tempo



Fonte: adaptado de Fenner (1938) e Pacher (1964), apud Rabcewicz e Golser (1973)

A curva de resposta do maciço (Figura 15) demonstra a relevância da definição do momento de instalação do revestimento para que haja uma mobilização favorável da resistência característica do maciço. Além disso, contribui para o dimensionamento da rigidez do suporte. Logo, se a instalação do suporte ocorrer de forma precoce, estará submetido a um carregamento mais elevado proveniente do maciço, exigindo uma capacidade maior de resistência deste revestimento. Por outro lado, a instalação tardia deste pode ocasionar deformações excessivas no maciço localizado no entorno da cavidade do túnel, resultando em desprendimento e dissociação do maciço (PALMSTRÖM, 1993).

Assim, torna-se importante o desenvolvimento e mobilização da capacidade de carga do maciço, ou seja, que este possa se deformar suficientemente antes do revestimento produzir todos os seus efeitos. Portanto, o NATM recomenda a aplicação de revestimento na cavidade do túnel para evitar a manifestação de deformações indesejáveis no maciço circundante (BRAUN, 1980).

De acordo com a Figura 15, quando se adota um suporte mais rígido (2), percebe-se a ocorrência de uma carga maior sobre este, pois a massa rochosa ao redor da abertura não se deformou o suficiente para equilibrar as tensões. Logo, o fator de segurança (s) diminuirá drasticamente. Após o ponto C , o comportamento do maciço torna-se não linear. Se o suporte (1) for instalado após o desenvolvimento de um determinado deslocamento (ponto A), o sistema atingirá o equilíbrio com uma carga menor atuante no suporte. Assim, percebe-se uma característica particular do NATM, ou seja, que as interseções sempre ocorrem no ramo descendente da curva. Este fato implica um suporte menos rígido, que possibilita a deformação necessária.

Além disso, pode-se observar que o suporte de rocha não deve ser nem muito rígido nem muito flexível. Após o ponto B , inicia-se o "afrouxamento prejudicial" (dissociação do maciço), ou seja, a pressão de suporte necessária para interromper o afrouxamento aumenta muito. Entretanto, se o suporte for aplicado no momento certo para a deformação adequada, a pressão de suporte terá o valor mínimo nesse momento.

Em resumo, a curva mostra a variação da tensão radial como uma função da deformação e da relação deformação-tempo. Conforme a linha 2, observa-se que um suporte rígido instalado pouco tempo após a abertura da cavidade limitará o desenvolvimento da deformação e resultará em um grande carregamento para o suporte (ponto C). Se o suporte for instalado depois que um determinado deslocamento for permitido (linha 1) e o suporte tiver uma rigidez adequada, este interagirá com o maciço de forma a absorver gradualmente o carregamento e diminuir a taxa de deformação, atingindo o ponto de equilíbrio entre a capacidade do suporte e da carga (ponto A). Após o ponto B , o maciço ao redor da cavidade começa a se dissociar, aplicando uma carga adicional ao suporte.

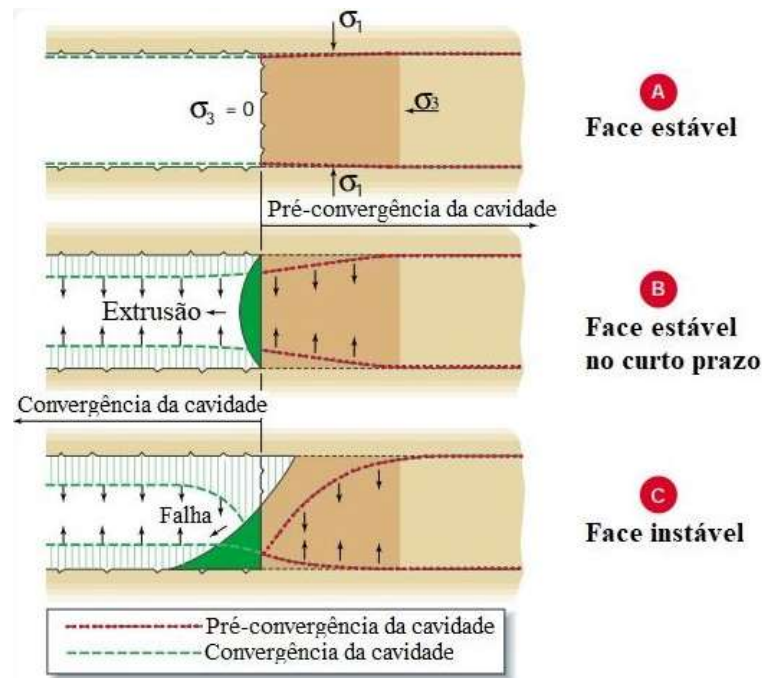
3.5.2.2 Método da convergência-confinamento ($CV-CF$)

Conhecido como método das Curvas Características, o método da convergência-confinamento ($CV-CF$) baseia-se na análise bidimensional da interação maciço-revestimento, não podendo ser comparado ao modelo complexo tridimensional, uma vez que é muito mais simples. Provavelmente, a primeira análise proposta foi realizada por Fenner (1938). Em seguida, a mesma abordagem foi adotada por Pacher (1964), porém com um erro relacionado à consideração correta das deformações que ocorrem antes da instalação do revestimento. Assim,

Panet & Guellec (1974) postularam o método *CV-CF* incorporando a deformação que acontece antes da instalação do revestimento através do “fator de perda de confinamento”.

O nome desse método se deu no encontro da *Association Française des Tunnels et de L'espace Souterrain* (AFTES) em Paris no ano de 1978 e passou a ser recomendado por esta em 1984. Quanto às vantagens do método pode-se destacar a fácil utilização e a abordagem do processo mais importante envolvido na interação maciço-revestimento. Em relação a aplicabilidade, é importante salientar que a validade do método se restringe aos casos de face de escavação estável, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Possíveis situações em relação à face de escavação do túnel



Fonte: adaptado de LUNARDI (1998)

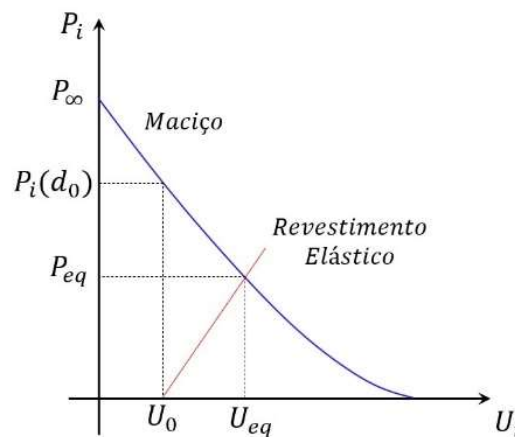
O cálculo de interação, quando a face do túnel está distante, restringe-se ao conhecimento de U_0 , que corresponde a convergência da parede do túnel no momento da instalação do revestimento. Desse modo, intuitivamente, U_0 depende da lei de comportamento do maciço, da lei de comportamento do revestimento e da distância de instalação do revestimento.

$$U_0 = f(CV, CF, d_0) \quad (3)$$

Uma simplificação relevante do problema de interação no método *CV-CF* supõe que a pressão fictícia é função somente do comportamento do maciço e da distância x da face de escavação

do túnel em relação à seção de estudo. Portanto, a resolução da problemática, relacionada a obtenção da convergência U_{eq} e da pressão P_{eq} no equilíbrio, é simples, ou seja, conhecendo-se a pressão fictícia $P_i(d_0)$ para uma distância d_0 , posiciona-se a curva de confinamento no diagrama P_i-U_i . A intersecção entre as curvas CV e CF , visualizada na Figura 17, corresponde ao equilíbrio desejado. Percebe-se que o valor de $P_i(d_0)$ equivale a convergência no instante da colocação do revestimento e que U_0 é o parâmetro chave que condiciona a interação entre o maciço e o revestimento.

Figura 17 – Intersecção das curvas $CV-CF$

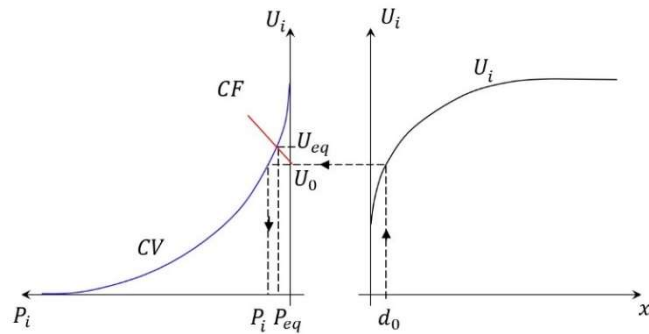


Fonte: adaptado de BERNAUD (1991)

De modo a exemplificar a utilização do método $CV-CF$, demonstra-se a realização das duas etapas abaixo. Assim, com o auxílio da Figura 18 busca-se elucidar a obtenção do parâmetro chave U_0 .

- 1) Realização do traçado do perfil de convergências $U_i(x)$ do túnel não revestido em função da distância à face (diagrama da direita). A obtenção da curva pode ser obtida pelo cálculo 2D empregado no Método dos Elementos Finitos em axissimetria ou por fórmulas aproximadas;
- 2) Para uma determinada distância d_0 deduz-se o valor de U_0 pelo perfil de convergências $U_i(x)$, de modo que U_0 será a abscissa inicial da curva de confinamento. Assim, partindo-se do ponto U_0 se traça a curva de confinamento (diagrama da esquerda). O ponto de equilíbrio do túnel, que corresponde aos parâmetros de dimensionamento, corresponde ao ponto de intersecção entre as curvas CV e CF .

Figura 18 – Aplicação do método *CV-CF* a partir da determinação de U_0

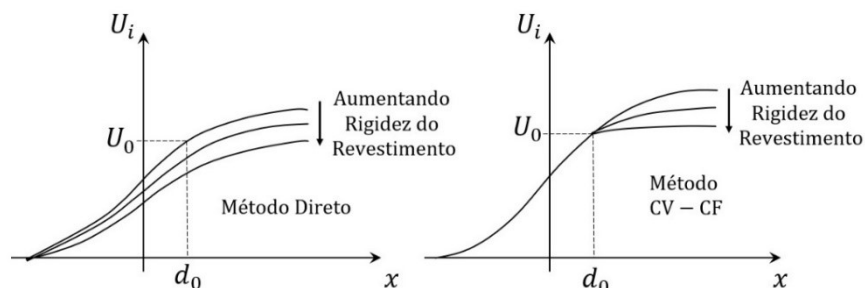


Fonte: adaptado de BERNAUD, BENAMAR E ROUSSET (1994)

Uma forma aproximada dessas curvas é proposta por Panet e Guénot (1982), por exemplo, adotando-se uma fórmula analítica muito precisa para um maciço elástico de módulo de Young (E) e coeficiente de Poisson (ν).

O equívoco do método *CV-CF* está relacionado à desconsideração da influência da rigidez do revestimento no cálculo de U_0 , conforme pode-se observar na Figura 19, representando uma má interpretação da interação maciço-revestimento, pois U_0 é o parâmetro chave da interação nos métodos simplificados. De forma simplificada, pode-se afirmar que a convergência U_0 depende das condições a sua frente, pois o método *CV-CF* sugere que a proximidade da face tem um papel de revestimento fictício, mas depende, também, das condições de trás da sua posição, ou seja, do revestimento já instalado.

Figura 19 – Influência da rigidez do suporte no perfil de convergências do túnel, quando considerada na determinação de U_0



Fonte: BERNAUD E ROUSSET (1992) adaptado por QUEVEDO (2021)

No diagrama da esquerda, verifica-se que as curvas, resultantes de cálculos numéricos em elementos finitos e axissimetria, apresentam convergências menores para valores maiores de

K_R . Por outro lado, no diagrama da direita, as curvas obtidas pelo método *CV-CF* não demonstram variação no trecho não revestido do túnel (d_0), independente da variação do valor da rigidez do revestimento (K_R).

3.5.2.3 Novo Método Implícito (*NIM*)

O Novo Método Implícito, conhecido como *NIM* (*New Implicit Method*), apresenta os mesmos princípios de base do método *CV-CF*, mas propõe uma melhoria na avaliação de U_0 , fazendo-o depender da rigidez do revestimento e, também, da convergência ao equilíbrio U_{eq} . Assim, Bernaud e Rousset (1992) desenvolveram um novo método simplificado para o cálculo de túneis que busca corrigir os erros do método *CV-CF*, através de estudos realizados com um modelo bidimensional axissimétrico com revestimento elástico em elementos finitos.

O objetivo do método consiste em deduzir a curva de convergência do túnel revestido a partir da curva do túnel sem revestimento, com o auxílio de uma transformação geométrica simples. Logo, a solução do problema e, respectivamente, o objetivo do método consiste em encontrar o ponto de equilíbrio (P_{eq} , U_{eq}) que corresponde à intersecção das curvas de convergência e de confinamento. Logo, salienta-se que o valor de U_0 no sistema depende implicitamente da solução procurada U_{eq} .

$$\begin{cases} P_{eq} = CV(U_{eq}) \\ P_{eq} = CF(U_{eq} - U_0) \end{cases} \quad (4)$$

Para maiores informações e verificação da apresentação deste estudo, pode-se recorrer ao trabalho desenvolvido por Bernaud e Rousset (1992).

3.5.3 Métodos diretos

Os métodos diretos estão relacionados às abordagens numéricas, principalmente, ao Método dos Elementos Finitos, amplamente empregado para a análise de estruturas complexas. Além deste, pode-se citar o Método das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos de Contorno. Assim, estes métodos permitem a resolução do conjunto de equações diferenciais, satisfazendo a condição de equilíbrio.

A modelagem numérica possibilita uma verificação razoável da interação maciço-revestimento em túneis, considerando parâmetros como: a profundidade do túnel, a geometria da seção de

escavação, a geometria do suporte com as respectivas equações constitutivas, a geometria e as equações constitutivas de elementos geomecânicos localizados no entorno do túnel e as etapas de escavação e de instalação do suporte. Dessa forma, configuram-se como métodos que possibilitam a consideração aproximada da real complexidade da estrutura de túneis.

Quanto a aplicação, as análises numéricas podem ser realizadas por abordagens bidimensionais, relacionadas aos casos de deformações planas (Figura 20) e axissimétricas (Figura 21), e por abordagens tridimensionais (Figura 22), que garantem maior precisão e realidade ao procedimento de escavação e instalação do suporte. Estas justificam-se uma vez que a região localizada próxima à frente de escavação demonstra, nitidamente, estados de tensões e deformações tridimensionais, representando de maneira realista os fenômenos de transferência de carga do maciço para o suporte.

As soluções numéricas bidimensionais surgem como alternativa às abordagens tridimensionais, pois implicam alternativas menos onerosas, ou seja, em menores tempos de processamento e, conseqüentemente, na redução dos recursos computacionais necessários às análises. No caso das análises bidimensionais em deformações planas, busca-se estudar as seções transversais de maior relevância no processo construtivo, assumindo-se o estado plano de deformações. Nesta condição, o carregamento pode ser anisotrópico e admite-se qualquer comportamento para o maciço e qualquer geometria para abertura.

A partir do Método da Pressão Fictícia, empregado também no método da convergência-confinamento, pode-se modelar o processo de escavação, de modo a considerar uma pressão fictícia atuante na parede do túnel antes da instalação do suporte. Dessa forma, assume-se que o valor da pressão varia de P_∞ (pressão geostática-hidrostatica) até zero e que a pressão no momento da instalação do revestimento equivale a um deslocamento radial U_0 .

Uma vez instalado o suporte, iguala-se a zero a pressão fictícia. Por conseguinte, destaca-se que a pressão fictícia correspondente ao instante da colocação do revestimento é obtida a partir de U_0 , que é definido por leituras de instrumentação (medidas *in loco*) ou pela aplicação de métodos simplificados, como o método *NIM*.

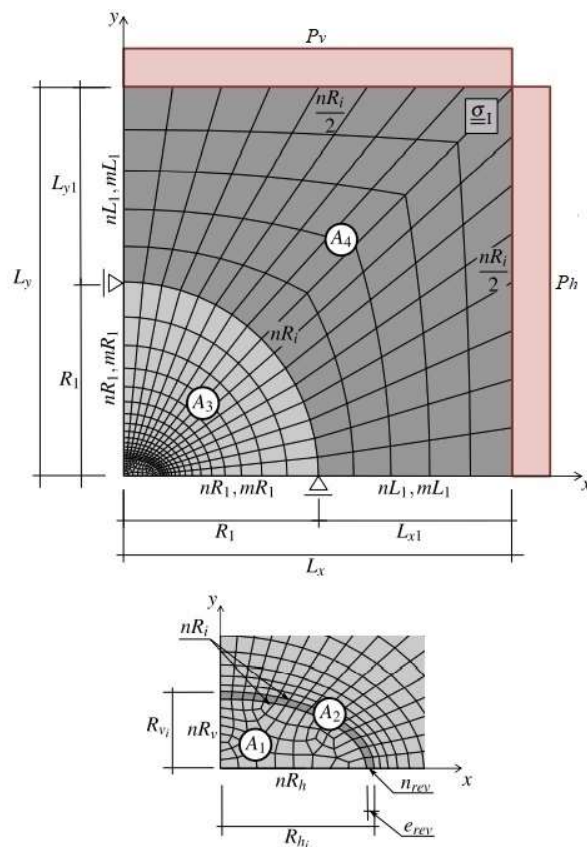
Em relação às análises bidimensionais axissimétricas, evidencia-se que a sua aplicação se direciona aos casos de túneis com seção geométrica circular e quando as propriedades mecânicas do material e o carregamento fazem com que as grandezas do problema não

dependam da coordenada angular θ , como, por exemplo, no caso de um túnel profundo de seção circular em um maciço isotrópico e homogêneo com tensões geostáticas hidrostáticas. Portanto, aponta-se que este tipo de análise modela o processo de escavação de forma real equivalente a um modelo 3D, se as condições de axissimetria forem respeitadas.

Bernaudo (1991) sugere algumas hipóteses sobre os elementos envolvidos no estudo para que seja viável o enquadramento das análises axissimétricas:

- Maciço: túnel com seção geométrica circular, face de escavação plana e ortogonal ao eixo, maciço homogêneo e comportamento isotrópico;
- Revestimento: extremidade do revestimento plana e ortogonal ao eixo, espessura constante, material homogêneo e comportamento isotrópico;
- Tensões: campo de tensões iniciais geostático-hidroestático.

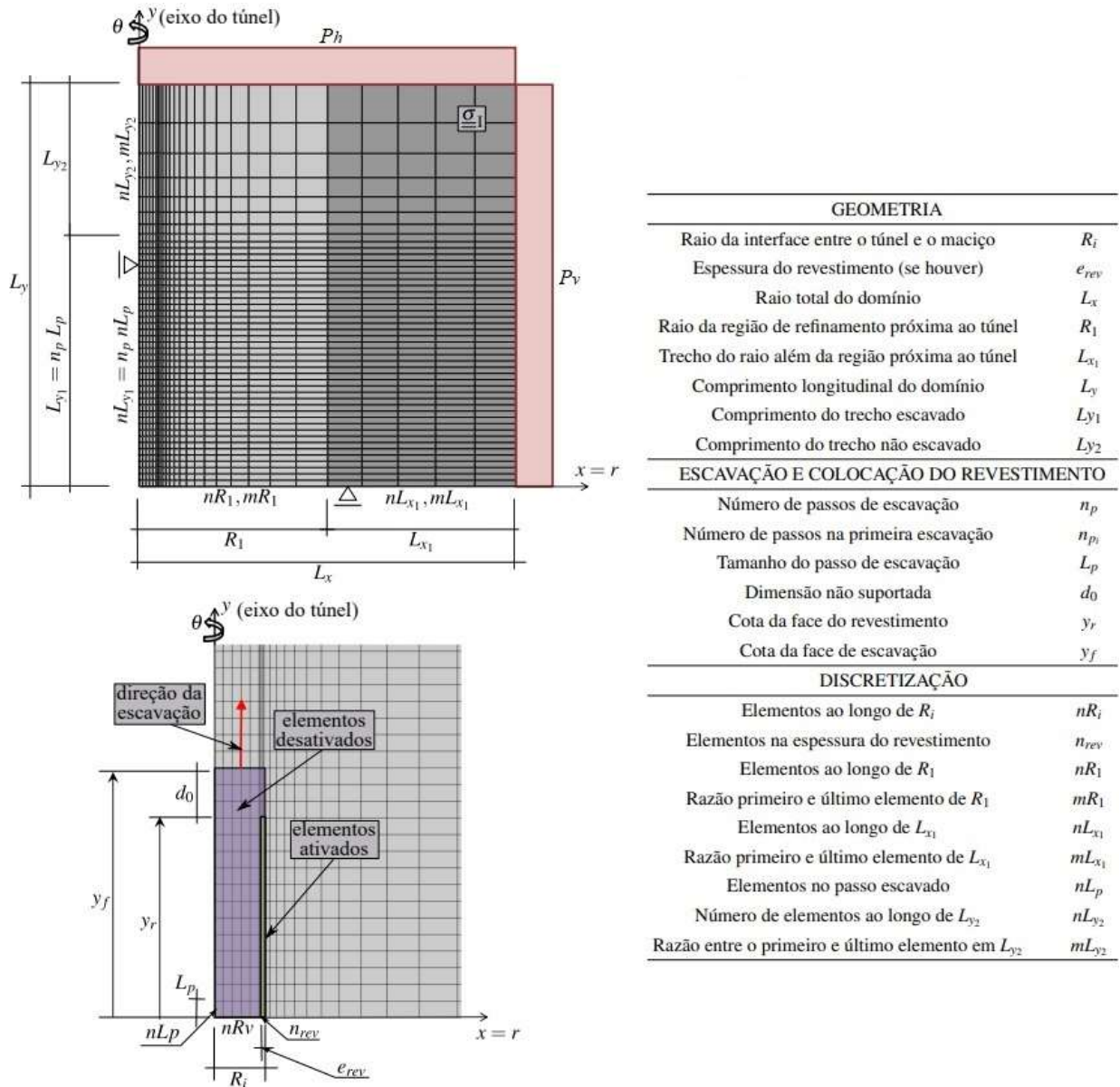
Figura 20 – Malha representativa de análise bidimensional de túneis profundos- deformações planas



GEOMETRIA	
Raio horizontal na interface entre o túnel e o maciço	R_{hi}
Raio vertical na interface entre o túnel e o maciço	R_{vi}
Espessura do revestimento (se houver)	e_{rev}
Largura transversal do domínio	L_x
Altura do domínio	L_y
Raio da região A3	R_1
Largura além da região A4	L_{x1}
Altura além da região A4	L_{y1}
DISCRETIZAÇÃO	
Elementos na direção ortoradial	nR_i
Elementos na altura da seção escavada	nR_v
Elementos na largura da seção escavada	nR_h
Elementos na espessura do revestimento	n_{rev}
Elementos ao longo do raio da região A3	nR_1
Razão entre primeiro e último elemento de A3	mR_1
Elementos ao longo do raio da região A4	nL_1
Razão entre primeiro e último elemento de A4	mL_1

Fonte: QUEVEDO (2021)

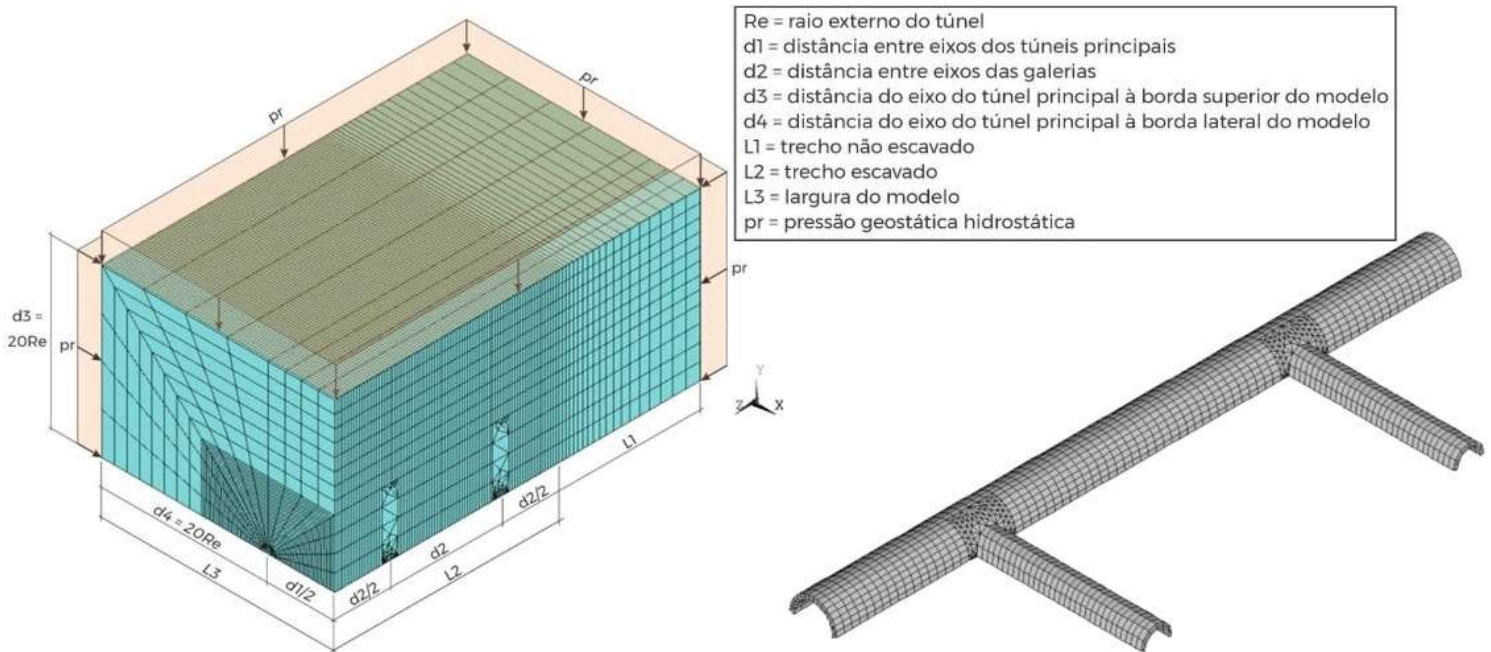
Figura 21 – Malha representativa de análise bidimensional de túneis profundos – axissimetria



Fonte: QUEVEDO (2021)

Por outro lado, as análises por abordagens tridimensionais não apresentam as limitações dos modelos bidimensionais, permitindo a representação acessível de heterogeneidade, carregamento, anisotropia do material, posição e forma das camadas que formam o maciço. Ademais, viabilizam a análise correta da região próxima à frente de escavação, modelando com precisão as etapas de escavação e instalação do revestimento. Não obstante, requerem tempo de processamento elevado e maior capacidade computacional, uma vez que empregam malhas de construção complicada para a resolução de problemas complexos como galerias que interligam túneis paralelos, poços de ventilação e estações (COUTO, 2011).

Figura 22 – Malha representativa de análise tridimensional – túneis gêmeos profundos com galerias



Fonte: DADA (2020)

4 MODELOS CONSTITUTIVOS

4.1 MODELOS DE REVESTIMENTO

Os revestimentos em túneis consistem em estruturas instaladas no perímetro da seção transversal com o objetivo de garantir a estabilidade do maciço a curto, a médio e a longo prazo, quando este não apresenta capacidade própria de suporte satisfatória. Ademais, exercem as funções de manter a abertura da cavidade, de minimizar a infiltração de água para a parte interna do túnel e de controlar as deformações provenientes do processo de escavação. Assim, de acordo com Cayro (2020), o revestimento possui três funções: garantir a estabilidade da escavação em curto prazo, suportar as pressões impostas pelo maciço no longo prazo (comportamento diferido) e limitar as deformações, compatibilizando-as com a finalidade da obra.

O revestimento pode ser constituído de duas etapas, sendo o revestimento primário e o secundário. O primeiro é aplicado sucessivamente ao processo de escavação, de forma a contribuir para a estabilização dos deslocamentos, mobilizando as tensões no maciço e garantindo a segurança das etapas de trabalho. O segundo é empregado quando os elementos da etapa primária são insuficientes para garantir a estabilidade da cavidade do túnel no médio e longo prazo (SÃO PAULO, 2005).

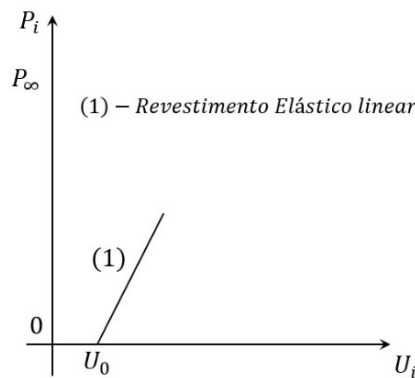
4.1.1 Revestimento elástico linear e não linear

O revestimento com comportamento elástico envolve apenas dois parâmetros, sendo o módulo de Young (E_R) e o coeficiente de Poisson (ν_R). Neste modelo, as tensões aplicadas e as deformações do corpo são regidas por uma função elástica linear ou elástica não linear. Na Teoria da Elasticidade, assume-se que a aplicação de tensões provoca imediatamente o aparecimento de deformações correspondentes, de modo que a permanência da aplicação de tensões ao longo do tempo ocasiona a manutenção das deformações de maneira proporcional. Por outro lado, caso a aplicação de tensões seja interrompida o corpo tenderá a retornar ao estado inicial, ou seja, as deformações desenvolvidas serão reversíveis, não haverá deformação residual.

Um exemplo clássico de revestimento com comportamento elástico aplicado como suporte em túneis refere-se a elementos de concreto pré-moldado, que correspondem a trechos anelares pré-

fabricados de concreto. Para um determinado nível de tensões o material se encontra em regime elástico e a convergência da seção será proporcional a pressão aplicada, conforme Figura 23. Assim, de modo a auxiliar na compreensão da referida figura, informa-se que U_0 corresponde ao valor da convergência no instante de colocação do revestimento a uma distância d_0 da face de escavação, a reta representa os valores de convergência U_i em função de uma pressão interna fictícia P_i que atua no interior da cavidade e P_∞ refere-se ao valor da pressão inicial geostática-hidroestática.

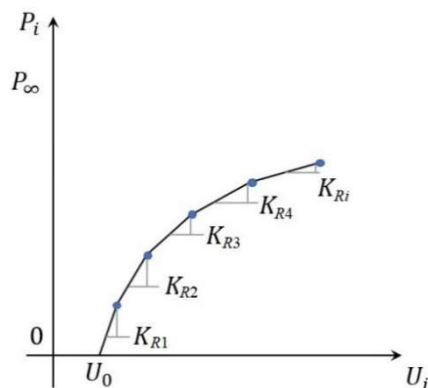
Figura 23 – Revestimento com comportamento elástico linear



Fonte: o autor (2023).

O revestimento de comportamento elástico não-linear pode ser representado aproximadamente por uma função definida por partes em que dependendo do nível de tensões tem-se diversos módulos de elasticidade, conforme Figura 24. A convergência será proporcional à pressão apenas em cada trecho da discretização da curva.

Figura 24 – Revestimento com comportamento elástico não-linear



Fonte: o autor (2023).

Uma abordagem elástica não-linear pode ser usada para modelar o comportamento de cintas metálicas deslizantes, por exemplo, distribuídas, com um certo espaçamento, ao longo do comprimento longitudinal do túnel, conforme Figura 25. Este tipo de suporte consiste em trechos anelares metálicos unidos por juntas deslizantes. Neste caso, a evolução da convergência em função das pressões atuantes ocorre de maneira não-linear.

Figura 25 – Vista geral do trecho com cintas metálicas com juntas deslizantes: Galeria de Mol



Fonte: BERNAUD (1991)

4.1.2 Revestimento de comportamento inelástico

Pode-se citar como comportamento não-elástico os revestimentos de comportamento irreversível como os elastoplásticos e viscoplásticos. O revestimento de comportamento elastoplástico, por exemplo, depende do trajeto das tensões, e por isso é caracterizado por apresentar uma componente elástica e outra plástica. Destaca-se que a taxa de deformação plástica também é reconhecida por fluxo plástico, responsável pela parcela das deformações irreversíveis. Neste modelo, há um limite dentro do qual o material apresenta comportamento elástico, domínio este que em materiais isotrópicos é delimitado por uma superfície de escoamento no espaço das tensões principais.

Quando o estado de tensões alcança esta superfície, relacionada com a função de escoamento, ocorre a transição do regime elástico para o plástico e o desenvolvimento das deformações plásticas. Neste contexto, há diferentes teorias clássicas de superfície de plastificação, como von-Mises, Tresca, Drucker-Prager e Mohr-Coulomb.

4.2 LEI CONSTITUTIVA DO REVESTIMENTO DE CONCRETO

O modelo constitutivo reológico empregado para o revestimento de concreto configura-se em duas parcelas, sendo uma delas relacionada à retração, conforme formulação do CEB-FIP MC90 (CEB, 1993), e outra voltada à fluência modelada mediante uma cadeia de Kelvin Generalizada, de acordo com a Teoria da Solidificação de Bazant e Prasannan (1989a, 1989b), onde os parâmetros são ajustados com as formulações do CEB-FIP MC90 (CEB, 1993). Assim, no presente trabalho, serão apresentadas apenas as principais equações que envolvem o referido modelo, conforme demonstrado em Quevedo, Bernaud e Campos Filho (2022).

Além disso, maiores explicações desse modelo podem ser visualizadas em Quevedo *et al.* (2018). Por outro lado, a aplicação direcionada ao estudo de túneis, com as respectivas verificações, validações e análises podem ser encontrados em Quevedo, Bernaud e Campos Filho (2022), enquanto as análises paramétricas de túneis gêmeos sem galerias em Quevedo, Bernaud e Campos Filho (2020).

Levando em consideração a hipótese das transformações infinitesimais e empregando o princípio da superposição do tensor de deformações linearizado de Green-Lagrange tem-se:

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^e} + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{sh}} + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{cr}} \quad (5)$$

onde os tensores $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}$, $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}^e}$, $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{sh}}$ e $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{cr}}$ representam, respectivamente, a taxa das deformações totais, elásticas, por retração e por fluência. Assim, pode-se escrever a relação constitutiva linearizada entre tensões e deformações do seguinte modo:

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}}} = \underline{\underline{D}} : \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^e} = \underline{\underline{D}} : \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} - \underline{\underline{D}} : \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{sh}} - \underline{\underline{D}^*} : \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^{cr}} \quad (6)$$

onde $\underline{\underline{D}}$ refere-se ao tensor constitutivo elástico linear de quarta ordem e $\underline{\underline{D}^*}$ ao tensor constitutivo elástico linear modificado (decorrente do módulo de elasticidade efetivo E^* , que considera o envelhecimento do concreto) de acordo com a Teoria da Solidificação de Bazant e Prasannan. Em considerações não-lineares, resolvidas por intermédio do método de Newton-Raphson implementado no sistema global de equações de equilíbrio, a Equação (6) é reescrita de forma incremental conforme demonstrado por Quevedo, Bernaud e Campos Filho (2022):

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}}}_{n+1} = \underline{\underline{\dot{\sigma}}}_n + \underline{\underline{D}} : \underline{\underline{\Delta \varepsilon}} - \underline{\underline{D}} : \underline{\underline{\Delta \varepsilon}}^{sh} - \underline{\underline{D}}^* : \underline{\underline{\Delta \varepsilon}}^{cr} \quad (7)$$

onde o incremento de deformação de retração equivale a

$$\underline{\underline{\Delta \varepsilon}}^{sh} = \Delta \varepsilon^{sh}(t_s) \underline{\underline{1}} \quad (8)$$

sendo t_s o tempo de cura do concreto, $\underline{\underline{1}}$ o tensor unitário de segunda ordem e $\Delta \varepsilon^{sh}$ a variação da magnitude da deformação do concreto por retração obtida através das expressões do CEB-FIP MC90, conforme consta em maiores detalhes em Quevedo (2017).

Em relação ao incremento de deformação por fluência $\underline{\underline{\Delta \varepsilon}}^{cr}$, o algoritmo incremental desenvolvido por Bazant e Prasannan (1989a, 1989b) é empregado, entretanto, com uma adequação para a formulação do CEB-FIP MC90 (CEB, 1993). Esta adaptação é apropriada, pois prescinde de ajustes dos parâmetros da cadeia por intermédio de ensaios e emprega formulações de norma de projeto regularmente utilizadas. Esta adequação é possível confrontando as funções de fluência $J(t, t_0)$ de ambas as referências: Bazant e Prasannan (1989a, 1989b) e CEB-FIP MC90 (CEB, 1993). A comparação entre as referências direciona à seguinte equivalência:

$$E_0 = E_c(t_0), \quad \gamma_c(t - t_0) = \beta_c(t - t_0), \quad \frac{1}{v(t)} = \frac{\phi_0}{E_{ci}}, \quad \frac{1}{\eta(t)} = 0 \quad (9)$$

em que, de acordo com Bazant e Prasannan (1989a, 1989b), E_0 é o módulo de elasticidade dos agregados e partículas microscópicas da pasta de cimento do concreto, $\gamma_c(t - t_0)$ a deformação microviscoelástica da fração de volume solidificada $v(t)$ do concreto, $\eta(t)$ a viscosidade macroscópica aparente, enquanto de acordo com o CEB-FIP MC90, $E_c(t_0)$ é o módulo elástico tangente do concreto no instante inicial de aplicação da carga t_0 , $\beta_c(t - t_0)$ é o coeficiente que depende da idade do carregamento $(t - t_0)$, ϕ_0 é o coeficiente que depende da idade do concreto no instante de aplicação da carga e E_{ci} o módulo elástico tangente do concreto na idade de 28 dias.

A deformação por fluência é dependente da idade do concreto no momento de aplicação do incremento de tensão t_0 e da idade $(t - t_0)$ desse incremento. Por conseguinte, a deformação equivalente a cada subpasso de tempo é condicionada pela superposição das deformações ocasionadas por cada incremento de tensão anterior, ou seja, o histórico de tensões. Em busca de eficiência do algoritmo incremental, com a finalidade de evitar salvar o histórico de tensões,

Bazant e Prasannan (1989a, 1989b) propõem ajustar uma cadeia de Kelvin Generalizada no termo que depende somente da idade do incremento $\gamma_c(t - t_0)$. O ajuste é realizado selecionando convenientemente os tempos de retardação e definindo os módulos dessa cadeia utilizando o Método dos Mínimos Quadrados. Por consequência, o módulo de cada unidade da cadeia de Kelvin é obtido de acordo com:

$$A(i, j) = \sum_{k=1}^L [1 - e^{-(t_k - t_0)/\tau_i}] [1 - e^{-(t_k - t_0)/\tau_j}] \quad (10)$$

$$B(i) = \sum_{k=1}^L \gamma_c(t_k - t_0) [1 - e^{-(t_k - t_0)/\tau_i}], \text{ e } X(j) = \frac{1}{E_j} \quad (11)$$

onde $i = 1, \dots, N$ e $j = 1, \dots, N$ são unidades da cadeia de Kelvin e $k = 1, \dots, L$ pontos de ajustes. Como a curva de fluência é mais expressiva em idades jovens, a idade de carregamento é mantida constante em uma escala logarítmica, conforme a seguinte fórmula de recorrência:

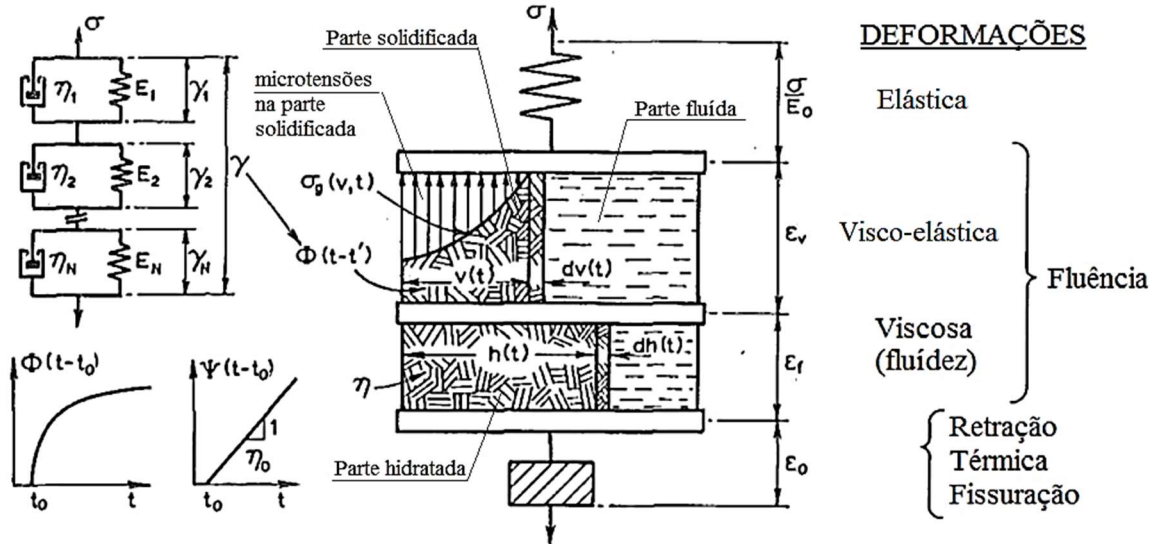
$$t_{k+1} - t_0 = 10^{1/m_y} (t_k - t_0), \text{ para } k = 2, \dots, L. \quad (12)$$

Adota-se $t_1 - t_0 = 0,1t_0$, $m_y = 10$ e $L = 30$ para se obter um ajuste satisfatório. Para se ter uma matriz A bem condicionada, de acordo com Bazant e Prasannan (1989a, 1989b), os tempos de retardação são dados por:

$$\tau_\mu = \tau_1 10^{\mu-1}, \text{ para } \mu = 1, \dots, N. \quad (13)$$

Ademais, os tempos de retardação devem cobrir a metade do tempo da análise t_{max} e serem pequenos o suficiente para expressar a curva de fluência em idades jovens. Logo, $\tau_1 = 0,01t_0$ e $\tau_N = 0,5t_{max}$. O número de unidades da cadeia de Kelvin foi definido como sendo o máximo até que se alcance a condição de $\tau_\mu \geq \tau_N$ não sendo superior a $N = 6$. A representação gráfica dessa cadeia de Kelvin pode ser verificada na Figura 26.

Figura 26 – Esquema do modelo de concreto pela Teoria da Solidificação, com a cadeia de Kelvin Generalizada na parte esquerda superior.



Fonte: BAZANT & PRASANNAN (1989a) adaptado por QUEVEDO (2017)

O tensor constitutivo modificado $\underline{\underline{D}}^*$ da Equação (37) equivale ao tensor constitutivo elástico linear isotrópico, porém com o módulo de Young ajustado de acordo com:

$$\frac{1}{E} = \left[\frac{1}{E_0} + \frac{F[\underline{\underline{\sigma}}(t_n + \Delta t/2)]}{v(t_n + \Delta t/2)} \frac{1}{D} \right] \quad (14)$$

sendo $F[\underline{\underline{\sigma}}]$ uma função adimensional que introduz a não linearidade das tensões com o nível de tensão $\underline{\underline{\sigma}}$. Todavia, o modelo do CEB-FIP MC90 não considera esse comportamento e, portanto, na equivalência, esse fator é igual a 1. Essa simplificação, limita a tensão em 40% da resistência média a compressão f_{cm} do concreto. Desse modo, garante-se que o princípio da superposição considerado pela norma continue válido. Os demais parâmetros da Equação (14) são dados por:

$$E_0 = E_c(t_n + \Delta t/2), \quad v(t_n + \Delta t/2) = \frac{E_{ci}}{\phi(t_n + \Delta t/2 - t_0)}, \quad \frac{1}{D} = \sum_{\mu=1}^N \left(\frac{1 - \lambda_{\mu}}{E_{\mu}} \right) \quad (15)$$

sendo λ_{μ} o fator que leva em conta a razão entre os incrementos de tempo e os incrementos de tempo de retardação do μ -ésimo elemento da cadeia de Kelvin, conforme:

$$\lambda_{\mu} = \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu}}}\right) \frac{\tau_{\mu}}{\Delta t} \quad (16)$$

Por fim, o incremento de deformação por fluência é obtido por:

$$\Delta \underline{\underline{\varepsilon}}^{cr} = \sum_{\mu=1}^N \left(\underline{\underline{\varepsilon}}^{cr}_{\mu} \right)_n \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu}}}\right) \quad (17)$$

onde

$$\left(\underline{\underline{\varepsilon}}^{cr}_{\mu} \right)_n = \sum_{\mu=1}^N \left(\underline{\underline{\varepsilon}}^{cr}_{\mu} \right)_{n-1} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\mu}}}\right) + \underline{\underline{D}}_{\mu}^{-1} : \Delta \underline{\underline{\sigma}} \quad (18)$$

A Equação (18) demonstra que a deformação por fluência no passo n é calculado empregando a deformação acumulada das unidades da cadeia de Kelvin do passo anterior $n - 1$ e o incremento de tensão do passo atual $\Delta \underline{\underline{\sigma}}$. Conseqüentemente, não é necessário manter o histórico de tensões. A expressão para o tensor constitutivo $\underline{\underline{D}}_{\mu}$ é equivalente ao tensor constitutivo elástico linear isotrópico, porém com o módulo de Young ajustado conforme:

$$E = E_{\mu} \frac{v(t_n + \Delta t/2)}{\lambda_{\mu}} \quad (19)$$

4.3 LEI CONSTITUTIVA DO MACIÇO

O maciço é o componente essencial envolvido no processo de execução de um túnel, apresentando elevada complexidade na compreensão e na previsão do comportamento, tendo em vista ser um material natural, com presença de descontinuidades, de heterogeneidade e de anisotropia.

Conforme evidenciado por Couto (2011), é indispensável a compreensão do comportamento do maciço frente à escavação de um túnel, pois possibilita a interpretação correta da ocorrência dos deslocamentos e das alterações no campo de tensões do maciço, permite interpretar a interação que acontece entre o maciço e o suporte, direciona a avaliação dos métodos de dimensionamento do revestimento e dos procedimentos executivos. Assim, da perspectiva do maciço, a execução de um túnel configura-se como uma perturbação no estado natural de tensões que se encontra em equilíbrio inicialmente.

4.3.1 Leis de comportamento

Nos itens seguintes serão abordadas, de forma resumida, as leis de comportamento em elasticidade, plasticidade perfeita com critério de Tresca e viscoplasticidade considerando o modelo de Perzyna. Por fim, será abordado, de forma mais detalhada, o modelo constitutivo elastoplástico-viscoplástico, de acordo com Quevedo (2021), tendo em vista a sua aplicabilidade direta no presente trabalho.

Destaca-se que esse modelo possui superfície de plasticidade de Drucker-Prager com opções de aproximar a superfície de Mohr-Coulomb, bem como a capacidade para análises com plasticidade não-associada e com ocorrência de endurecimento ou amolecimento por deformação. Contudo, no presente trabalho será usada apenas a plasticidade perfeita e associada.

4.3.1.1 Lei de comportamento elástico

A ocorrência de deformações imediatas e reversíveis, que evoluem de forma linear, ou não linear, e simultânea com as tensões aplicadas, permanecendo constantes ao longo do tempo com a manutenção destas tensões, caracterizam o modelo elástico. No entanto, caso sejam aplicadas tensões opostas às iniciais, as deformações desaparecem e o material tende a retornar para o estado inicial.

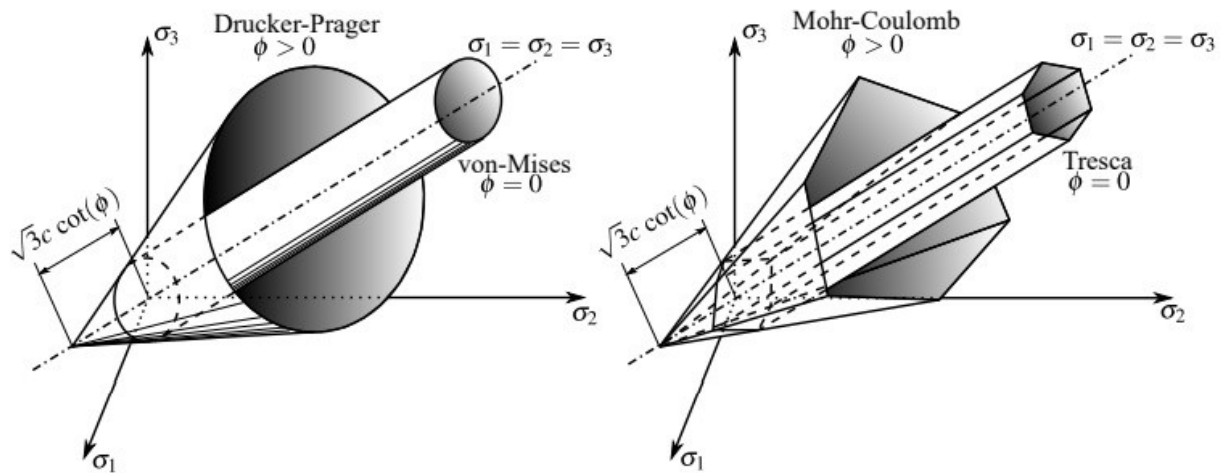
4.3.1.2 Lei de comportamento plástico

No caso da lei de comportamento plástico, o material possui a característica de apresentar deformações imediatas e irreversíveis, ou seja, as deformações não desaparecem com a realização da etapa de descarga. Neste caso, a função de escoamento será responsável pela transição do regime elástico para o regime plástico, através da definição de uma superfície geométrica no espaço das tensões principais. Assim, o escoamento ou a plastificação de um material acontecerá quando o estado de tensão pertencer a esta superfície.

Em relação às teorias clássicas, as superfícies de plastificação mais comuns são: Tresca, von-Mises, Drucker-Prager e Mohr-Coulomb, conforme Figura 27. Para a de Tresca e de von-Mises considera-se que o escoamento é independente da componente hidrostática do estado de tensão, apresentando formato prismático ou cilíndrico, respectivamente. Por outro lado, para as

superfícies de Mohr-Coulomb e de Drucker-Prager, observa-se que o escoamento depende da componente hidrostática, adotando formatos piramidais ou cônicos, atribuídos para materiais com ângulo de atrito interno. Destaca-se que as superfícies de Mohr-Coulomb e Drucker-Prager se convertem em Tresca e von-Mises, respectivamente, caso o ângulo de atrito seja nulo.

Figura 27 – Superfícies de plastificação clássicas



Fonte: ZIENKIEWICZ E CORMEAU (1974) adaptado por QUEVEDO (2021).

De acordo com Bernaud (1991), o critério de plasticidade, relacionado ao tensor de tensões e ao parâmetro adimensional de endurecimento isotrópico, atribuído às superfícies de plastificação apresentadas anteriormente, pode ser explicitado em função do tensor desviador e dos parâmetros do material. De forma resumida, apresenta-se no Quadro 1 abaixo as superfícies de plasticidade para as teorias clássicas.

Quadro 1 – Superfícies de plasticidade clássicas

CRITÉRIO	SUPERFÍCIE
von-Mises	$F(\underline{\sigma}, \alpha) = \sqrt{\frac{3}{2}} \ \underline{\sigma}^D\ - \sigma_s$
Tresca	$F(\underline{\sigma}, \alpha) = \sqrt{2} \cos(\theta) \ \underline{\sigma}^D\ - \sigma_s$
Mohr-Coulomb	$F(\underline{\sigma}, \alpha) = \frac{k-1}{3} \text{tr}(\underline{\sigma}) + \frac{\sqrt{3}(k+1)\cos(\theta) - (k-1)\sin(\theta)}{\sqrt{6}} \ \underline{\sigma}^D\ - S(\alpha)$
Drucker-Prager	$F(\underline{\sigma}, \alpha) = \frac{k-1}{3} \text{tr}(\underline{\sigma}) + \frac{k_1}{\sqrt{6}} \ \underline{\sigma}^D\ - S(\alpha)$
<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>$k = \frac{1 + \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)}$ - 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>$\theta = \frac{1}{3} \arcsen\left(-3\sqrt{6} \det \underline{\sigma}^D \ \underline{\sigma}^D\ ^{-3}\right)$; $\theta \in \left[-\frac{\pi}{6}, +\frac{\pi}{6}\right]$ - Ângulo de Lode</p> <p>$\sigma_m = \frac{1}{3} \text{tr}(\underline{\sigma})$ - tensão média</p> <p>$\underline{\sigma}^D = \underline{\sigma} - \sigma_m \underline{1}$ - tensor desviador</p> <p>$\ \underline{\sigma}^D\ = \sqrt{\sigma_{ij}^D \sigma_{ij}^D}$ - norma do tensor desviador</p>	

Fonte: BERNAUD (1991) adaptado por QUEVEDO (2017).

No caso de von-Mises e Tresca, quando se conhece somente os parâmetros de um dos critérios e o modelo disponível para cálculo consiste em outro critério, pode-se realizar a aproximação entre as superfícies de plasticidade. Logo, de acordo com Quevedo (2021), pode-se realizar uma aproximação entre von-Mises e Tresca, resultantes do procedimento de igualar as expressões das superfícies e isolar a coesão.

$$C_{TR} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\theta') C_{VM} = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{3}} C_{VM}, & \text{se } \theta' = 0^\circ \text{ (VM) inscrito em (TR)} \\ C_{VM}, & \text{se } \theta' = \pm 30^\circ \text{ (VM) circunscribe (TR)} \end{cases} \quad (20)$$

Nesse item será demonstrado o desenvolvimento da lei de comportamento elastoplástico perfeito com critério de Tresca, embora haja outras superfícies de plasticidade e ocorrência de casos com endurecimento e amolecimento do maciço. Assim, considerando a hipótese das pequenas deformações, inicia-se a abordagem com a apresentação da taxa de deformações totais $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}$ em elastoplasticidade, que corresponde ao somatório da taxa de deformações elásticas $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}^e}$ com a taxa de deformações plásticas $\underline{\underline{\dot{\epsilon}}^p}$.

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^e} + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}^p} \quad (21)$$

Em um determinado ponto M da fronteira plástica, verifica-se que as deformações plásticas se desenvolvem, exclusivamente, caso o critério de plasticidade $F(\underline{\underline{\sigma}}) = 0$ seja atingido. Em um ponto regular da fronteira plástica, em plasticidade perfeita, descreve-se a regra do fluxo plástico da seguinte forma:

Para o ponto M,

se

$$F(\underline{\underline{\sigma}}) = 0 \text{ e } \frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} : \underline{\underline{\dot{\sigma}}} > 0 \quad (22)$$

então

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}^p} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \quad (23)$$

se

$$F(\underline{\underline{\sigma}}) < 0 \text{ ou } F(\underline{\underline{\sigma}}) = 0, \text{ e } \frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} : \underline{\underline{\dot{\sigma}}} \leq 0 \quad (24)$$

então

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p = 0 \quad (25)$$

No caso tridimensional, assume-se a hipótese de que os resultados anteriores podem ser generalizados a um caso qualquer. Em um ponto M da fronteira plástica, para o critério de Tresca, define-se σ_i (com $i=1$ até 3) para as tensões principais ($\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$) de modo que:

$$F(\underline{\underline{\sigma}}) = \sigma_1 - \sigma_3 - 2C(\alpha) \quad (26)$$

Em que uma escolha possível para a deformação plástica equivalente é:

$$\alpha = \frac{1}{3} \sqrt{\sum_{i=1}^3 (\varepsilon_i^p)^2} \quad (27)$$

Logo, a função coesiva $C(\alpha)$ pode simular o efeito do amolecimento (*softening*) ou do endurecimento (*hardening*) à medida que a coesão diminui ou aumenta com as deformações plásticas equivalentes, respectivamente. (BERNAUD, 1991)

4.3.1.3 Lei de comportamento viscoplástico - Modelo de Perzyna

A referência dos primeiros estudos de modelos reológicos viscoplásticos indicam os de Bingham (1922), sendo generalizados na sequência por Perzyna (1966). Esse modelo pode ser usado para aproximar o trecho secundário da curva de fluência por uma reta, conforme em Quevedo (2017). Assim, de forma análoga ao realizado por Quevedo (2017), para simular o comportamento viscoplástico do maciço neste trabalho, leva-se em consideração o modelo implementado no programa GEOMEQ91 por Bernaud (1991) e o trabalho de Zienkiewicz e Corneau (1974), os quais alteram, parcialmente, a formulação original de Perzyna (1966).

Na hipótese de pequenas deformações, a taxa de deformação total do material ($\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}$) é representada por duas parcelas, sendo uma elástica ($\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e$) e outra viscoplástica ($\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^{vp}$). Em relação ao *software* GEOMEQ91, a taxa de deformação viscoplástica é implementada pela Equação (29) (ZIENKIEWICZ E CORNEAU, 1974 apud BERNAUD, 1991). Além disso, no GEOMEQ91, F_0 é assumido com o valor 1 e a unidade de η é alterada para pressão (MPa) multiplicada por unidade de tempo (segundos).

$$\underline{\dot{\underline{\epsilon}}} = \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^e + \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^{vp} \quad (28)$$

$$\underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^{vp} = \frac{1}{\eta} \left\langle \frac{F^{vp}(\underline{\sigma}, \alpha)}{F_0} \right\rangle^n \frac{\partial G^{vp}(\underline{\sigma})}{\partial \underline{\sigma}} \quad (29)$$

sendo:

$F^{vp}(\underline{\sigma}, \alpha)$ = critério de viscoplasticidade, em MPa;

α = parâmetro adimensional de endurecimento isotrópico;

$\langle X \rangle$ = parênteses de McCauley, nulo se $X < 0$;

$G^{vp}(\underline{\sigma})$ = função potencial da viscoplasticidade;

η = coeficiente de viscosidade dinâmica, em unidade de tempo (segundos);

n = parâmetro adimensional que generaliza a expressão para uma lei do tipo potência;

F_0 = constante para adimensionalização do critério de viscoplasticidade F^{vp} , em MPa.

O modelo de Perzyna também consta no *software* ANSYS para representar a evolução da deformação viscoplástica. De acordo com o manual, o modelo é considerado como uma taxa de deformação plástica equivalente e dependente do tempo (*rate-dependent plasticity*), conforme a equação abaixo:

$$\underline{\dot{\underline{\epsilon}}}^{vp} = \rho \left\langle \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} - 1 \right\rangle^{\frac{1}{m}} \quad (30)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{3}{2} \underline{\underline{\sigma}}^D : \underline{\underline{\sigma}}^D} = \sqrt{\frac{3}{2} \|\underline{\underline{\sigma}}^D\|} \quad (31)$$

sendo:

$\langle X \rangle$ = parênteses de McCauley, nulo se $X < 0$;

ρ = coeficiente de viscosidade do material;

m = parâmetro de ajuste da forma potencial;

σ_0 = tensão de escoamento do material;

σ_{eq} = tensão equivalente;

$\underline{\underline{\sigma}}^D$ = tensão desviatória.

Pode-se, também, definir a taxa de deformação viscoplástica equivalente por:

$$\dot{\underline{\underline{\epsilon}}}^{vp} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\underline{\underline{\epsilon}}}^{vp} : \dot{\underline{\underline{\epsilon}}}^{vp}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \|\dot{\underline{\underline{\epsilon}}}^{vp}\| \quad (32)$$

Comparando-se a implementação do ANSYS com a empregada no GEOMECH91 percebe-se algumas diferenças. Então, de acordo com Quevedo (2017), para que os modelos sejam equivalentes, relaciona-se as taxas de deformação viscosa utilizando-se parâmetros envolvidos ao igualar as taxas de deformação equivalente dos modelos. Sabendo-se que a única superfície disponível no ANSYS para viscoplasticidade é Von-Mises, apresenta-se, abaixo, a expressão de equivalência.

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \left\| \frac{1}{\eta} \left(\frac{3}{2} \|\underline{\underline{\sigma}}^D\| - \sigma_s \right)^n \right\| \sqrt{\frac{3}{2}} \|\underline{\underline{\sigma}}^D\| = \rho \left(\frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \|\underline{\underline{\sigma}}^D\|}{\sigma_0} - 1 \right)^{\frac{1}{m}} \quad (33)$$

sendo

$\sigma_s = \sigma_0$ = tensão de escoamento do material.

Simplificando a expressão anterior, a equivalência entre os modelos pode ser definida pelas equações abaixo (QUEVEDO, 2017):

$$\rho = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\sigma_s}{F_0} \right)^n \quad (34)$$

$$m = \frac{1}{n} \quad (35)$$

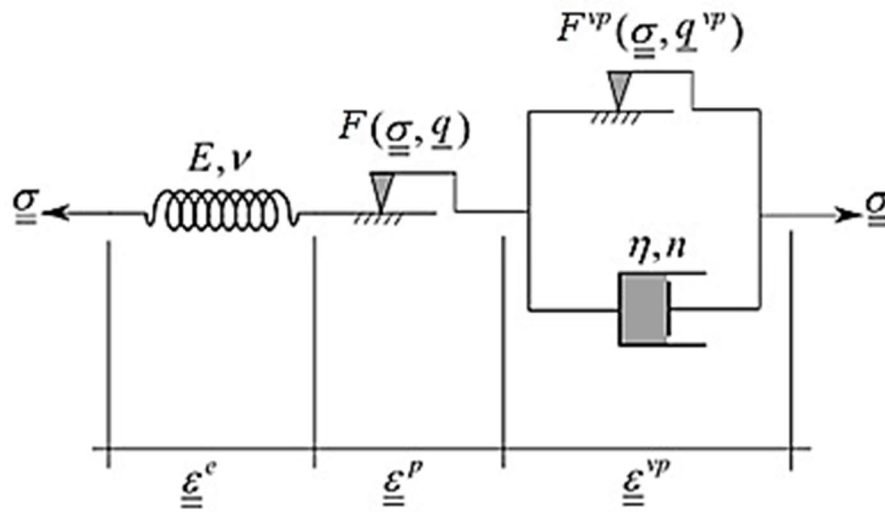
$$n = \frac{1}{m} \quad (36)$$

4.3.1.4 Lei de comportamento elastoplástico-viscoplástico

De acordo com Lemaitre e Chaboche (1990), a taxa de deformação total ($\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}$) configura-se a partir da soma de três termos: a taxa de deformação elástica ($\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^e$), a taxa de deformação plástica ($\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^p$) e a taxa de deformação viscoplástica ($\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{vp}$), representados na Figura 28.

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^e + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^p + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{vp} \quad (37)$$

Figura 28 – Desenho esquemático do modelo elastoplástico-viscoplástico



Fonte: ROUSSET (1988) adaptado por QUEVEDO (2021).

Esta hipótese permite a utilização das teorias de plasticidade e de viscoplasticidade para a resolução do problema de evolução de estruturas com comportamento plástico e viscoplástico. Assim, considerando esse princípio de superposição das deformações, a lei de evolução das tensões pode ser escrita da seguinte forma:

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}}} = \underline{\underline{D}} : (\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} - \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^p - \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{vp}) \quad (38)$$

sendo

$\underline{\underline{D}}$ = tensor constitutivo elástico.

Restringindo-se ao caso de materiais com comportamento isotrópico, a lei de fluxo plástico e da evolução da variável interna α equivale a:

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p = \lambda \frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \quad (39)$$

$$\dot{\alpha} = \dot{\lambda} \Psi(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha), \quad \text{com } \Psi(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha) = \frac{\partial F}{\partial \alpha} \quad (40)$$

Para explicitar o multiplicador plástico utiliza-se condição de consistência $\dot{F} = 0$. Dessa forma, tem-se:

$$\dot{F} = \frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} : \underline{\underline{\dot{\sigma}}} + \frac{\partial F}{\partial \alpha} \cdot \dot{\alpha} = 0 \quad (41)$$

Substituindo a expressão da tensão e do parâmetro α , leva a:

$$\frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} : \underline{\underline{D}} : (\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} - \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p - \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^{vp}) + \frac{\partial F}{\partial \alpha} \cdot \dot{\lambda} \Psi(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha) = 0 \quad (42)$$

Assim, isolando o multiplicador plástico $\dot{\lambda}$ tem-se:

$$\dot{\lambda} = \frac{\frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} : \underline{\underline{D}} : \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} - \frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} : \underline{\underline{D}} : \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^{vp}}{\frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} : \underline{\underline{D}} : \frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} - \frac{\partial F}{\partial \alpha} \cdot \Psi} \quad (43)$$

onde

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^{vp} = \frac{\partial \Omega}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{F^{vp}}{F_0} \right)^n \frac{\partial G^{vp}}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \quad (44)$$

sendo:

$G^{vp} = F^{vp}$ para viscoplasticidade associada;

α – parâmetro de endurecimento ou amolecimento isotrópico;

F^{vp} – função que representa o critério de viscoplasticidade;

η – viscosidade do material;

G – potencial plástico, sendo considerado a plasticidade associada, ou seja, $G = F$;

$\dot{\lambda}$ – multiplicador plástico;

$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}^p}$ – taxa de deformação plástica;

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

$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}$ – taxa de deformação total;

$\underline{\underline{\dot{\sigma}}}$ – taxa de tensões;

Ω – potencial viscoplástico;

Ψ – ângulo de dilatação.

Para maiores informações pode-se consultar Lemaitre e Chaboche (1990).

De acordo com Bernaud (1991), e conforme Quevedo (2021), emprega-se neste trabalho a superfície de Drucker-Prager para expressar a função de escoamento F referente a parcela elastoplástica:

$$F(\underline{\underline{\sigma}}, q) = F(I_1, J_2, \beta_i) = \beta_1 I_1 + \beta_2 \sqrt{J_2} - \beta_3 \quad (45)$$

sendo:

q – força termodinâmica associada à variável interna α ;

I_1 – primeiro invariante do tensor de tensões;

J_2 – segundo invariante do tensor desviador;

β_i – parâmetros relacionados com a coesão e o ângulo de atrito do critério de Mohr-Coulomb;

ϕ – ângulo de atrito do maciço.

Empregando a superfície de Drucker-Prager inscrita na superfície de Mohr-Coulomb tem-se:

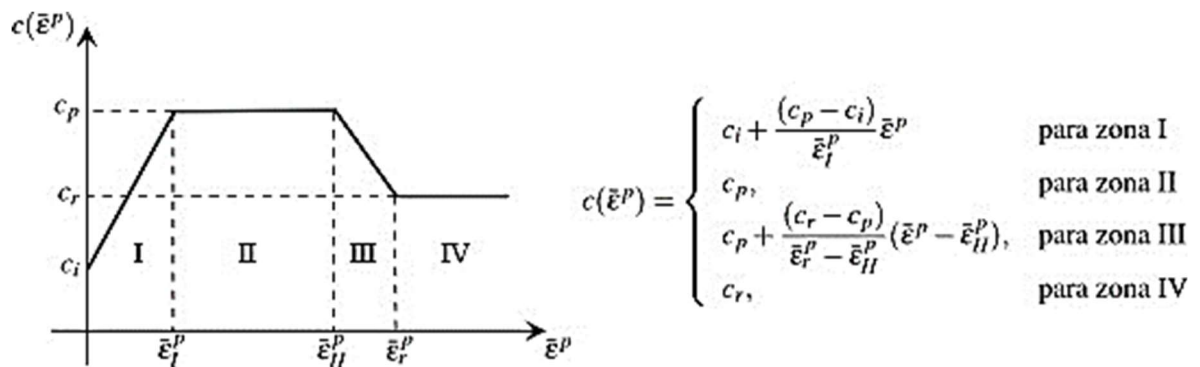
$$\beta_1 = \frac{(k-1)}{3}, \quad \beta_2 = \frac{(2k+1)}{\sqrt{3}}, \quad \beta_3 = 2\sqrt{k}C \left(\underline{\underline{\bar{\varepsilon}}^p} \right) \quad (46)$$

onde o coeficiente de empuxo é dado por:

$$k = \frac{(1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)} \quad (47)$$

A força termodinâmica varia conforme uma função linear definida por partes, ilustrada na Figura 29, de acordo com a deformação plástica equivalente $\bar{\varepsilon}^p$. Logo, a força termodinâmica associada é dada pela parcela coesiva, onde $q = \beta_3$. Na referida figura, c_i corresponde a coesão inicial, c_p representa a coesão do patamar (maciços dúcteis), ou de pico (maciços frágeis), e c_r equivale a coesão residual.

Figura 29 – Função linear definida por partes para representar o endurecimento/amolecimento através do parâmetro coesivo



Fonte: POTTS E ZDRAVKOVIC (1999, p. 158) adaptado por QUEVEDO (2021)

Assim, a lei de evolução das deformações plásticas é descrita pela seguinte regra de fluxo plástico:

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p = \dot{\lambda} \underline{\underline{G}}_\sigma \quad (48)$$

$$\underline{\underline{G}}_\sigma = \frac{\partial G}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} = \beta_1 \underline{\underline{1}} + \beta_2 \frac{\underline{\underline{s}}}{2\sqrt{J_2}} \quad (49)$$

onde:

$\dot{\lambda}$ – taxa da magnitude da deformação plástica;

\underline{G}_σ – gradiente do potencial plástico;

G – função análoga a F , entretanto, substituindo o ϕ (ângulo de atrito) pelo ângulo de dilatância $0 < \psi < \phi$ nos parâmetros β_1 e β_2 .

Portanto, tem-se a plasticidade associada quando $\psi = \phi$.

A evolução da superfície de escoamento ao longo da deformação plástica é condicionada pela seguinte lei de endurecimento/amolecimento:

$$\dot{q} = \dot{\lambda} h_q = -\dot{\lambda} \frac{\partial h}{\partial q} \quad (50)$$

Considera-se a lei de endurecimento/amolecimento associada em caráter isotrópico, sendo $h = F$. Logo, obtém-se a seguinte expressão com a aplicação da regra da cadeia:

$$\dot{q} = \dot{\lambda} h_q = -\dot{\lambda} \frac{\partial h}{\partial q} = -\dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial q} = \dot{\lambda} \left(-\frac{\partial F}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial \underline{\underline{\varepsilon}}^p} \right) = \dot{\lambda} \left(2\sqrt{k} \frac{\partial C}{\partial \underline{\underline{\varepsilon}}^p} \right) \quad (51)$$

A partir da expressão adaptada de Chen e Han (1988) abaixo, válida para a superfície de Drucker-Prager, pode-se calcular a deformação plástica equivalente:

$$\varepsilon^p = \frac{\beta_1 + 1/\sqrt{3}}{\sqrt{3\beta_1^2 + 1/2}} \left\| \underline{\underline{\varepsilon}}^p \right\| \quad (52)$$

A partir das três condições, conhecidas como condições de Kuhn-Trucker, expressas abaixo, conforme de Souza Neto, Perić e Owen (2008), determina-se a evolução das equações (48) e (50):

$$F \leq 0, \quad \dot{\lambda} \geq 0, \quad \dot{\lambda} F = 0 \quad (53)$$

De acordo com estas três condições, o fluxo plástico ocorre somente quando o estado de tensões está sobre a superfície de escoamento, logo, não há variação da função de escoamento. A seguinte equação é conhecida como condição de consistência, sendo empregada para obter a expressão utilizada para calcular $\dot{\lambda}$.

$$\dot{F} = \frac{\partial F}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} : \underline{\underline{\dot{\sigma}}} + \frac{\partial F}{\partial q} \dot{q} = \underline{\underline{F}}_{\underline{\underline{\sigma}}} : \underline{\underline{\dot{\sigma}}} + F_q \dot{q} = 0 \quad (54)$$

No caso da parcela viscoplástica, de forma análoga ao da elastoplasticidade, ou seja, a partir do gradiente de uma função potencial G , porém viscoplástica, a regra de fluxo é representada por:

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{vp} = \dot{\lambda}^{vp} \underline{\underline{G}}_{\underline{\underline{\sigma}}}^{vp} \quad (55)$$

sendo:

$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^{vp}$ – taxa de deformação viscoplástica;

$\dot{\lambda}^{vp}$ – taxa da magnitude da deformação viscoplástica;

$\underline{\underline{G}}_{\underline{\underline{\sigma}}}^{vp}$ – gradiente do fluxo viscoplástico.

Diferentemente da elastoplasticidade, neste caso não há a imposição de uma condição de consistência, pois as deformações viscoplásticas podem ocorrer quando o critério de viscoplasticidade for $F^{vp} > 0$. Logo, a taxa do multiplicador viscoplástico $\dot{\lambda}^{vp}$ não pode ser definida a partir de uma condição semelhante a $\dot{F}^{vp} = 0$. Assim, de acordo com Zienkiewicz e Corneau (1974), neste trabalho adotou-se a seguinte expressão explícita para $\dot{\lambda}^{vp}$, conforme o modelo de Perzyna:

$$\dot{\lambda}^{vp} = \frac{\Phi}{\eta}, \quad \Phi = \left\langle \frac{F^{vp}(\underline{\underline{\sigma}}, q)}{F_0} \right\rangle^n \quad (56)$$

sendo:

η – constante de viscosidade dinâmica (unidade de tempo);

Φ – função de sobretensão, neste caso, uma função potencial com expoente n ;

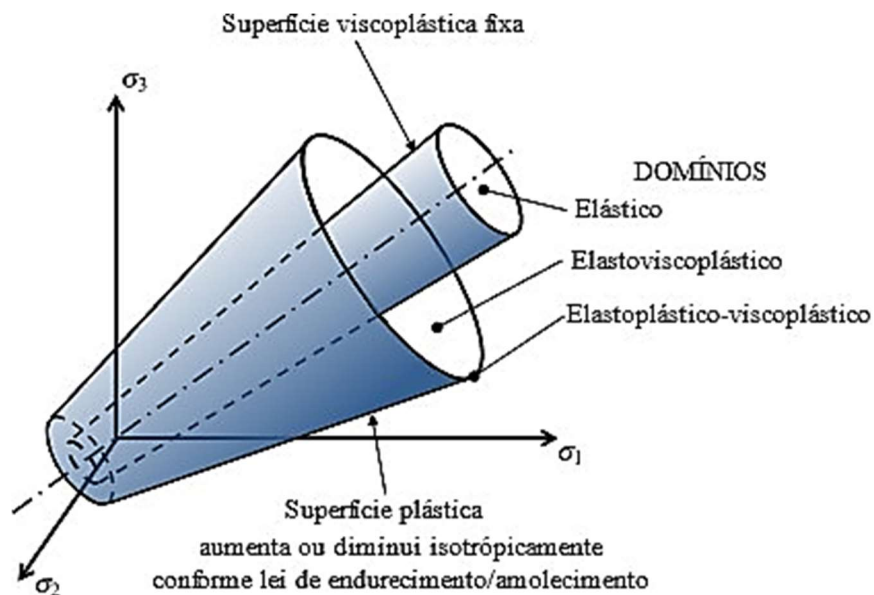
F_0 – parâmetro de tensão convenientemente adotado a partir do qual se inicia o fenômeno viscoso;

$\langle * \rangle$ – função de McCauley, nula quando $* < 0$, ou seja, o fluxo viscoplástico somente ocorrerá quando o critério F/F_0 for positivo.

No geral, o valor de F_0 é dependente da superfície viscoplástica, que neste caso equivale a $F_0 = \beta_3$. Entretanto, o valor de F_0 poderá depender de ajuste em conjunto com o n , a partir de ensaios de fluência, tornando-o um parâmetro de entrada do modelo.

Destaca-se que, no referido modelo acoplado, a elastoplasticidade possui endurecimento/amolecimento, porém a viscoplasticidade é perfeita. Em regra, as superfícies não são definidas pelos mesmos parâmetros. Devido às desigualdades das coesões em ambas as superfícies, antes de atingir o comportamento instantâneo elastoplástico, o comportamento diferido pode ser iniciado. As superfícies do referido modelo acoplado no espaço das tensões principais, bem como os domínios onde um determinado ponto do maciço pode estar, podem ser observados na Figura 30.

Figura 30 – Superfícies e domínios do modelo acoplado elastoplástico-viscoplástico



Fonte: DEBERNARDI E BARLA (2009, p. 263) adaptado por QUEVEDO (2021)

Levando em consideração o esquema de solução não-linear por elementos finitos, informa-se que maiores informações sobre a dedução do algoritmo de integração das equações constitutivas acopladas podem ser encontradas em Quevedo (2021). Entretanto, emprega-se um esquema de integração semi-implícita de dois passos de Euler, preditor-corretor, para a parcela plástica. Ou seja, para o multiplicador plástico, um esquema implícito, enquanto, para o vetor de fluxo e módulo de endurecimento, emprega-se um esquema explícito. Assim, com o auxílio de um esquema de Newton-Raphson empregado nas equações locais busca-se a resolução do sistema que fornece o corretor plástico do modelo constitutivo.

Por outro lado, utiliza-se um esquema de Euler semi-implícito para a parcela viscoplástica, onde todas as variáveis são explicitadas, com exceção do multiplicador viscoplástico que é integrado conforme a regra trapezoidal generalizada. Neste caso de integração, a parcela viscoplástica é incondicionalmente estável, contudo, de acordo com Cormeau (1975), a precisão dos resultados não é garantida, sendo necessário o emprego de limites para o incremento de tempo. Assim, no caso semi-implícito, devido ao incremento de tempo, pode-se ter um aumento significativo no tempo da análise.

$$\Delta t_{\text{lim}} \leq \begin{cases} \frac{4 \eta (1 + \nu)}{3 \Phi} \frac{\sqrt{3J_2}}{E} \\ \frac{\eta F_0 (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{\Phi'} \frac{(3 - \sin \phi^{vp})^2}{\frac{3}{4}(1 - 2\nu)(3 - \sin \phi^{vp})^2 + 6(1 + \nu) \sin \phi^{vp^2}} \end{cases} \quad (57)$$

sendo

$$\Phi' = \frac{d\Phi}{d(F^{vp}/F_0)} = n(F^{vp}/F_0)^{n-1} \quad (58)$$

Tendo em vista que a viscoplasticidade é integrada através de uma regra semi-implícita, o incremento de deformação viscoplástico pode ser deduzido diretamente do incremento de deformação total na etapa de predição elástica do algoritmo de elastoplasticidade, uma vez que todas as incógnitas são calculadas com as variáveis conhecidas do subpasso anterior n . Demais informações sobre o modelo constitutivo elastoplástico-viscoplástico, a programação do algoritmo em FORTRAN na sub-rotina USERMAT, verificações e validações, bem como o fluxograma do algoritmo completo para integração das equações constitutivas na notação de Voigt, podem ser acessados em Quevedo (2021). Além disso, em Quevedo (2021) é possível encontrar uma verificação desta solução com uma solução particular analítica demonstrada por Piepi (1995).

5 VERIFICAÇÕES PRELIMINARES CONSIDERANDO TÚNEL PROFUNDO

A partir dos scripts desenvolvidos por Quevedo (2017, 2021), os quais pretende-se adequar para executar os estudos paramétricos dos túneis gêmeos com galerias, realizou-se alguns estudos paramétricos para túneis profundos, de modo a identificar alguns comportamentos da estrutura de túneis simples. Assim, serão apresentados abaixo alguns dos estudos realizados em axissimetria com as leis constitutivas elástica, elastoplástica e viscoplástica, conforme os parâmetros indicados.

Para as soluções numéricas em elasticidade e plasticidade sem revestimento a comparação dos resultados ocorreu com as soluções analíticas, que podem ser encontradas em Corbetta (1990) e Quevedo (2017). Para os demais casos, buscou-se a comparação de resultados com o *software* GEOMECH91, desenvolvido por Bernaud (1991).

Destaca-se que o script desenvolvido permite obter uma malha com facilidade de alteração, conveniente aos estudos de convergência de malha e análises paramétricas, sendo o domínio discretizado com o emprego do pré-processamento do *software* ANSYS 2022R1 por meio da linguagem APDL (*Ansys Parametric Design Language*). Essa linguagem possibilita controlar a discretização do domínio a partir de parâmetros que podem ser modificados facilmente, obtendo-se rapidamente uma nova malha para os estudos (QUEVEDO, 2021).

5.1 PARÂMETROS ADIMENSIONAIS

No contexto das soluções analíticas, o reconhecimento de parâmetros adimensionais que possibilitam extrapolar os valores de uma análise para outra equivalente, de modo adimensional, configura-se como um aspecto de extrema relevância na problemática de túneis, tendo em vista sua ampla empregabilidade na apresentação de resultados de trabalhos (QUEVEDO, 2021).

A partir de leis constitutivas elásticas para o maciço e para o revestimento, considerando soluções analíticas em estado plano de deformações, de acordo com Bernaud (1991), pode-se obter os seguintes parâmetros adimensionais:

$$P'_{\infty} = \frac{P_{\infty}}{E}; \quad K'_R = \frac{K_R}{E}; \quad d'_0 = \frac{d_0}{R_i} \quad (59)$$

onde E correspondente ao módulo de elasticidade do maciço, P_∞ a pressão geostática-hidroestática, K_R a rigidez equivalente do revestimento, d_0 a distância não revestida atrás da frente de escavação e R_i o raio externo da cavidade circular do túnel. Desse modo, conforme Panet (1995), a rigidez equivalente do revestimento, sendo $\frac{R_i}{e} \leq 10$, pode ser calculada com o emprego da seguinte expressão de tubos espessos:

$$K_R = \frac{E_R}{(1 + \nu_R)} \frac{R_i^2 - (R_i - e)^2}{[(1 - 2\nu_R)R_i^2 + (R_i - e)^2]} \quad (60)$$

sendo E_R o módulo de elasticidade do revestimento, ν_R o coeficiente de Poisson do revestimento, R_i o raio do túnel e e a espessura do revestimento. Caso a lei constitutiva elastoplástica de Tresca ou von-Mises seja adotada para o maciço, deve-se acrescentar mais um parâmetro adimensional:

$$C' = \frac{C}{E} \quad (61)$$

onde C corresponde à coesão do maciço.

Para o caso do maciço com lei constitutiva elastoviscoplasticidade perfeita com o modelo de Perzyna, em que há uma coesão viscoplasticidade de longo prazo C^{vp} , tem-se, de acordo com Bernaud (1991), cinco parâmetros adimensionais:

$$E' = \frac{E}{C^{vp}}; \quad P'_\infty = \frac{P_\infty}{C^{vp}}; \quad K'_R = \frac{K_R}{C^{vp}}; \quad d'_0 = \frac{d_0}{R_i}; \quad V' = \frac{\eta V_p}{R_i C^{vp}} \quad (62)$$

sendo η a constante de viscosidade dinâmica e V_p a velocidade do passo de escavação do túnel. Na condição do modelo elastoplástico-viscoplasticidade com critério de Tresca perfeito e associado acrescenta-se mais um parâmetro (PIEPI, 1995):

$$S' = \frac{C}{C^{vp}} \quad (63)$$

onde S' é um parâmetro relacionado com o maciço.

5.2 PARÂMETROS ADOTADOS PARA A REALIZAÇÃO DAS VERIFICAÇÕES

De modo a viabilizar os estudos, adotou-se o elemento finito PLANE182, caracterizado por ser um elemento bidimensional quadrilátero com 4 nós, sendo dois graus de liberdade por nó, e, portanto, com funções lineares de interpolação destinado para problemas em estado plano de deformações ou axissimétricos bidimensionais. Além disso, empregou-se os seguintes valores para os parâmetros do maciço, sendo módulo de Young 500 MPa (E); coesão de Tresca 1,5 MPa (C_{TR}); coeficiente de Poisson 0,4 (ν); pressão geostática de 4 MPa (P_∞); raio do túnel de 1,0 m (R_i); espessura do revestimento de 0,1 m (e) e passo de escavação de $1/3R_i$. Ademais, para o revestimento assumiu-se os valores de 300 MPa, 3000 MPa e 30000 MPa para o módulo de Young (E_R), que conduzem aos valores de 36 MPa, 360 MPa e 3600 MPa para a rigidez do revestimento (K_R), e o valor de 0,3 para o coeficiente de Poisson (ν_R).

Na Tabela 1, conforme representado na Figura 21, apresenta-se um resumo dos parâmetros relacionados à geometria do domínio, escavação e instalação do revestimento e discretização do domínio fornecidos como dados de entrada no *software* ANSYS para a realização das análises. Para cada passo de escavação realizado ($1 \leq i_p \leq n_p$) desativa-se os elementos até a cota da face de trabalho y_f e ativa-se os elementos do revestimento que estão defasados de d_0 , em relação a face, até a cota y_r . Nas análises axissimétricas, os efeitos diferidos ao longo da escavação do túnel são obtidos considerando o tempo transcorrido t_p durante cada passo de escavação, $t_p = \frac{L_p}{V_p}$, sendo V_p a velocidade do passo em metros/dias.

Em cada passo, o processo é subdividido em subpassos, onde as iterações de equilíbrio de Newton-Raphson são realizadas até que a convergência seja alcançada. Após a convergência em todos os subpassos, avança-se para o próximo passo. É importante notar que o incremento de tempo inicial para cada subpasso é definido como metade do tempo do passo correspondente. O *software* ANSYS pode ajustar esse incremento automaticamente se houver dificuldades na convergência das iterações de equilíbrio. Após a conclusão das etapas de escavação e instalação do revestimento, em modelos dependentes do tempo, a análise executa uma série de passos e subpassos adicionais sem escavação ou revestimento, a fim de capturar efeitos viscosos até que eles cessem.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada para as análises no ANSYS: estado axissimétrico

PARÂMETROS	ABREVIATURA	UNIDADE	VALORES			
GEOMETRIA						
Raio da interface entre o túnel e o maciço	Ri	m	1			
Espessura do revestimento (quando aplicável)	erev	m	0,1			
Raio total do domínio (dimensão da base do domínio)	Lx	m	20*Ri			
Raio da região de refinamento próxima ao túnel	R1	m	10*Ri			
Trecho do raio além da região próxima ao túnel	Lx1	m	Lx - R1			
Comprimento longitudinal do domínio	Ly	m	Ly1 + Ly2			
Comprimento do trecho escavado	Ly1	m	np*Lp			
Comprimento do trecho não escavado	Ly2	m	10*Ri			
ESCAVAÇÃO E COLOCAÇÃO DO REVESTIMENTO						
Número de passos de escavação	np	un	38			
Número de passos na primeira escavação	npi	un	3			
Tamanho do passo de escavação	Lp	m	1/3*Ri			
Dimensão não suportada (d0 = 0, quando não há revestimento)	d0	m	1*Lp	2*Lp	3*Lp	4*Lp
Cota da face do revestimento	yr	m	$(ip - 1)*Lp + npi*Lp - (Lp + d0)$			
Cota da face de escavação	yf	m	$(ip - 1)Lp + npi*Lp$			
DISCRETIZAÇÃO						
Elementos ao longo de Ri	nRi	un	10			
Elementos na espessura do revestimento	nrev	un	2			
Elementos ao longo de R1	nR1	un	15			
Razão primeiro e último elemento de R1	mR1	adm	15			
Elementos ao longo de Lx1	nLx1	un	5			
Razão entre o primeiro e último elemento em Lx1	mLx1	adm	1,2			
Elementos no passo escavado	nLp	un	1			
Número de elementos ao longo de Ly	nLy2	un	15			
Razão entre o primeiro e último elemento em Ly2	mLy2	adm	5			

Fonte: o autor (2023).

O ciclo construtivo de escavação e instalação do revestimento é simulado com o auxílio do recurso de ativação/desativação de elementos aplicado em cada passo da escavação. A desativação consiste, fundamentalmente, em três etapas:

- a) Substituição do módulo de elasticidade dos elementos por um valor bem pequeno (1E-12, por exemplo), de modo que esses elementos não contribuam na matriz de rigidez e no incremento de forças internas durante as iterações de equilíbrio, repassando as tensões para os elementos ativos na vizinhança;
- b) Iguala-se a zero as tensões internas nos pontos de Gauss do elemento, acumuladas em relação aos passos anteriores;

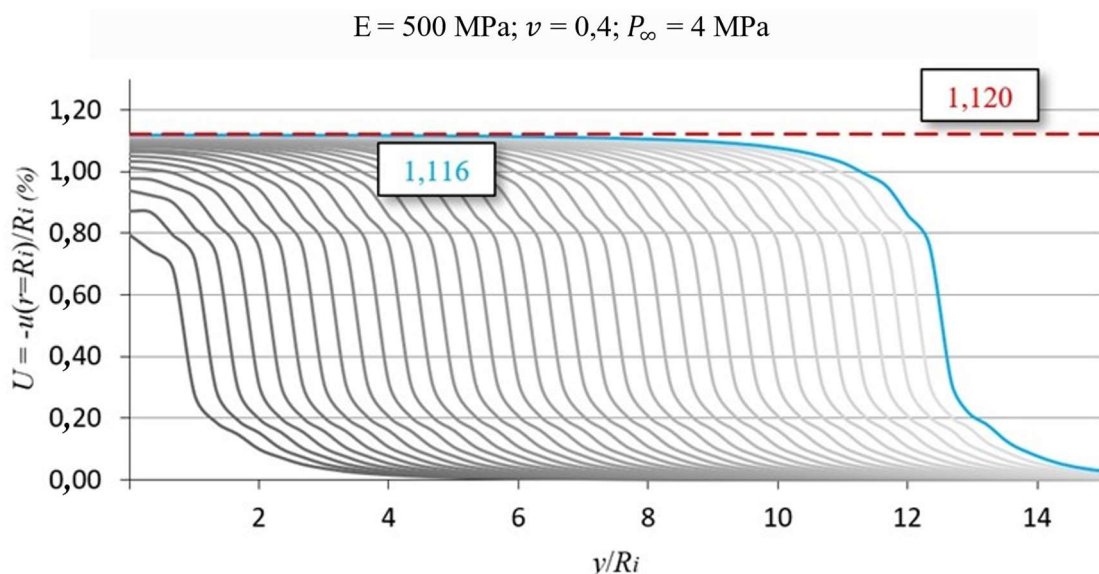
- c) Iguala-se a zero as forças externas, caso existam forças na fronteira desses elementos, para que não sejam considerados no cálculo do resíduo no método de Newton-Raphson.

5.3 VERIFICAÇÕES PRELIMINARES EM ELASTICIDADE E ELASTOPLASTICIDADE

De acordo com a Figura 31, inicialmente, efetuou-se a verificação do perfil de convergências para a lei de comportamento elástica sem revestimento, comparando a solução encontrada no *software* ANSYS com a solução analítica. Na sequência, demonstra-se na Figura 32 a mesma verificação, porém considerando a lei elastoplástica sem revestimento com superfície de plastificação de von-Mises (BISO) existente no ANSYS.

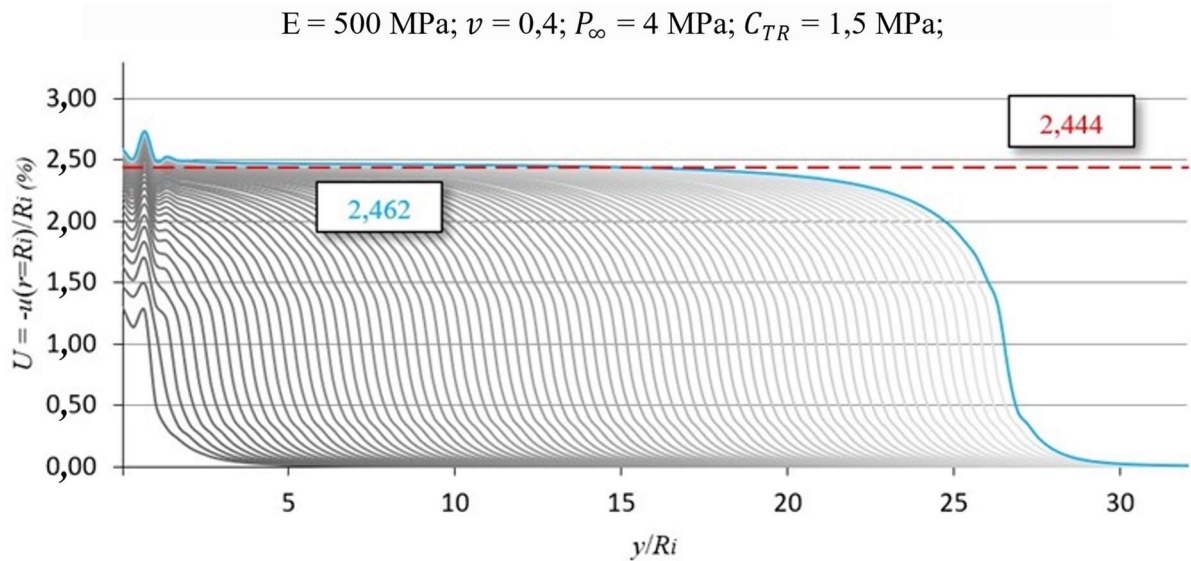
Destaca-se que nas figuras 31 e 32 a solução analítica está representada pela linha tracejada na cor vermelha e a solução numérica do ANSYS pela linha contínua na cor azul, equivalente ao último passo de escavação, pois as curvas cinzas consistem nos perfis de convergência de cada passo. É importante ressaltar, ainda, que os valores dos resultados indicados correspondem a $y/R_i = 6$ e que para a solução elastoplástica assume-se plasticidade perfeita com regra de fluxo associada com a superfície de escoamento de Tresca, sendo necessário aplicar a relação da Equação (20) apresentada anteriormente. Logo, tem-se o valor de aproximadamente 1,3 MPa para a coesão.

Figura 31 – Comparação soluções em elasticidade sem revestimento: analítica e numérica (ANSYS)



Fonte: o autor (2023).

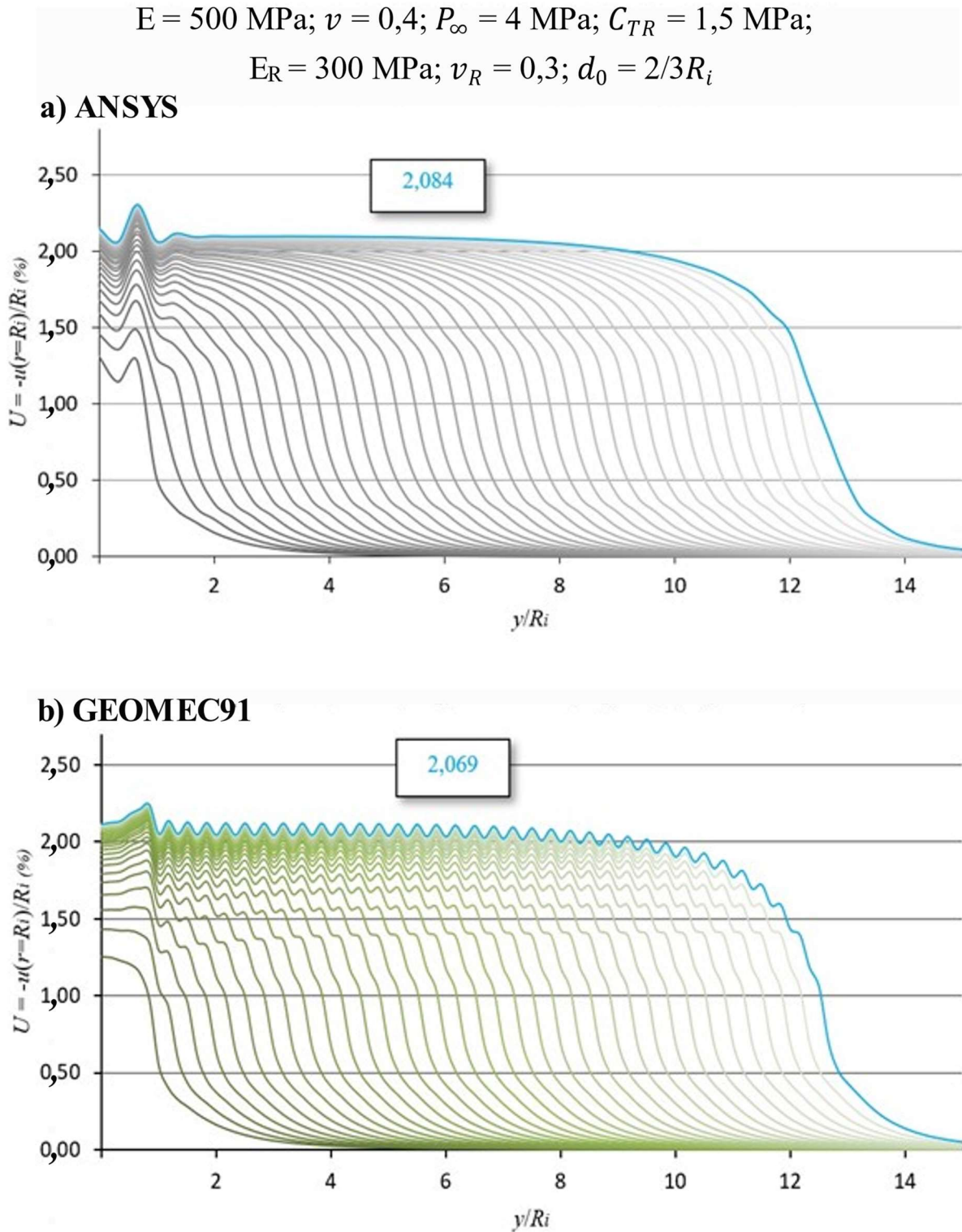
Figura 32 – Comparação soluções em plasticidade sem revestimento: analítica e numérica (ANSYS)



Fonte: o autor (2023).

Observa-se que os resultados numéricos encontrados no ANSYS apresentam uma diferença inferior a 1% em relação às soluções analíticas. Essa verificação demonstra que o programa desenvolvido demonstra boa confiabilidade. Em seguida, realiza-se a comparação das soluções obtidas no *software* ANSYS com o GEOMECH91 para a lei constitutiva elastoplástica com revestimento, mostrando os resultados obtidos nas figuras 33, 34 e 35, com a indicação dos respectivos parâmetros utilizados em cada análise. Nesse caso, os valores dos resultados indicados também correspondem a $y/R_i = 6$ e não há solução analítica, tendo em vista que há a ocorrência da interação maciço-revestimento.

Figura 33 – Comparação perfis de convergência em elastoplasticidade com revestimento para $K_R = 36$ MPa: ANSYS (a) e GEOMECC91 (b)



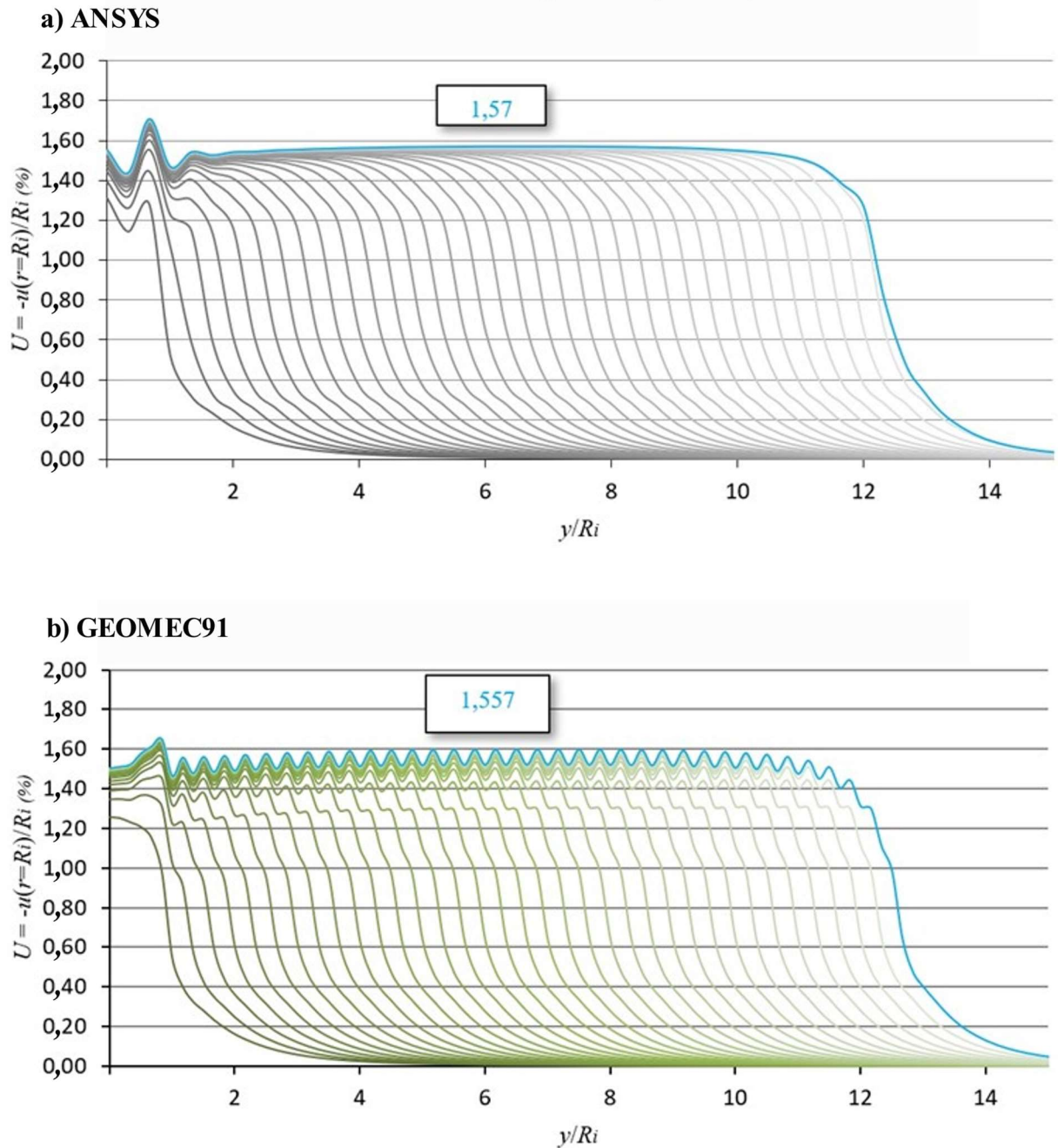
Fonte: o autor (2023).

Figura 34 – Comparação perfis de convergência em elastoplasticidade com revestimento para

$K_R = 360$ MPa: ANSYS (a) e GEOMEQ91 (b)

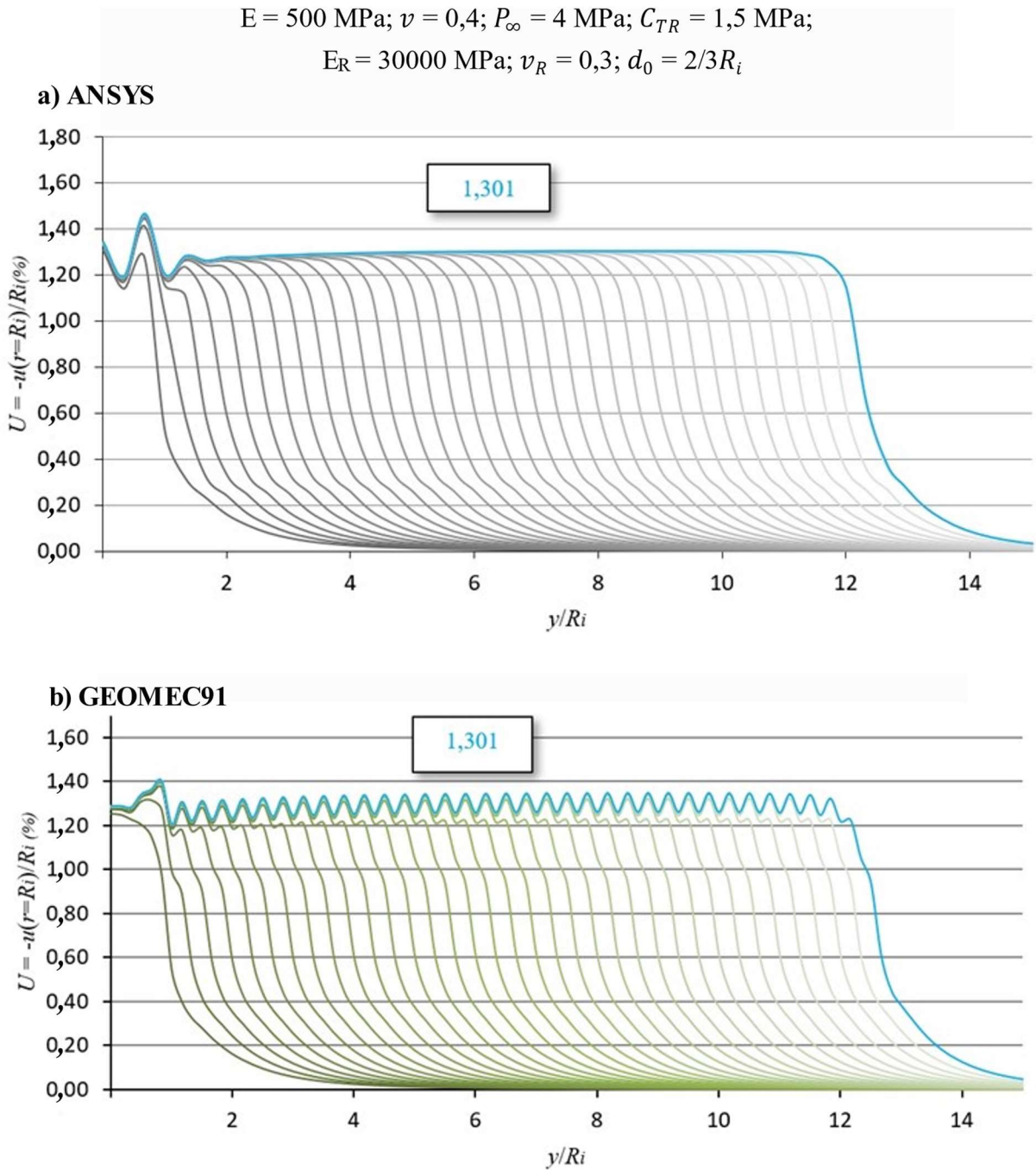
$E = 500$ MPa; $\nu = 0,4$; $P_\infty = 4$ MPa; $C_{TR} = 1,5$ MPa;

$E_R = 3000$ MPa; $\nu_R = 0,3$; $d_0 = 2/3R_i$



Fonte: o autor (2023).

Figura 35 – Comparação perfis de convergência em elastoplasticidade com revestimento para $K_R = 3600$ MPa: ANSYS (a) e GEOMECC91 (b)



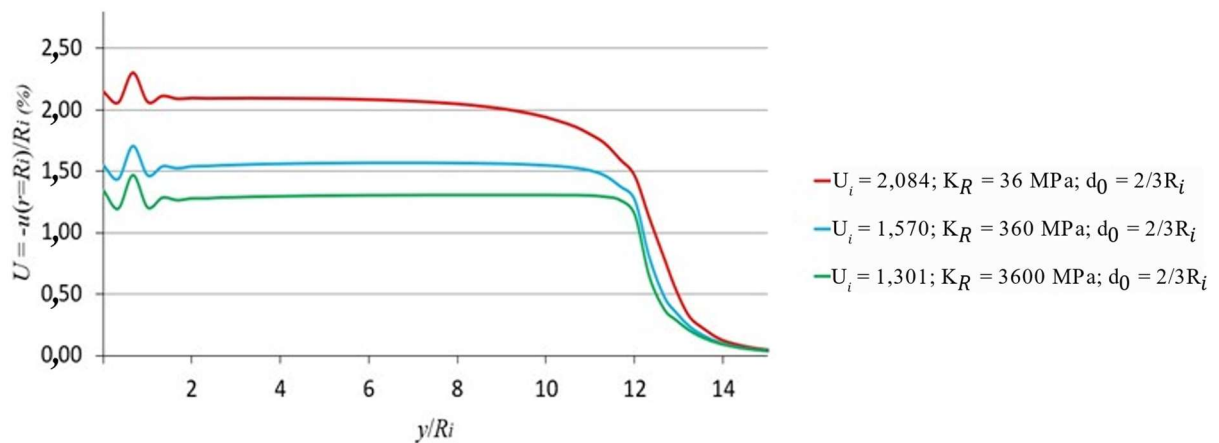
Fonte: o autor (2023).

Percebe-se nas figuras 33 a 35 que há pequenas oscilações no perfil de convergências do GEOMECC91 que não estão presentes no resultado do ANSYS. Essa diferença ocorre devido ao tipo de elemento finito utilizado, pois no GEOMECC91 emprega-se um elemento quadrático, que apresenta um nó intermediário. Ademais, observa-se um pico nas primeiras escavações,

proveniente da maior distância sem suporte na primeira escavação, quando comparado aos demais passos de escavação. Em relação aos resultados, observa-se uma diferença inferior a 1% entre os valores obtidos no ANSYS e no GEOMECC91.

Outra observação importante está relacionada ao efeito do revestimento sobre as deformações. Ao comparar-se os resultados obtidos nas figuras 33, 34 e 35 com a Figura 32 nota-se que há uma redução do perfil de convergências conforme aumenta-se o valor da rigidez do revestimento, mantendo-se a distância não revestida em relação à face de escavação (d_0). A instalação do revestimento tende a restringir o desenvolvimento da convergência, suportando a pressão que passará a ocorrer na interface maciço-revestimento. Essa abordagem fica mais evidente na comparação demonstrada na Figura 36.

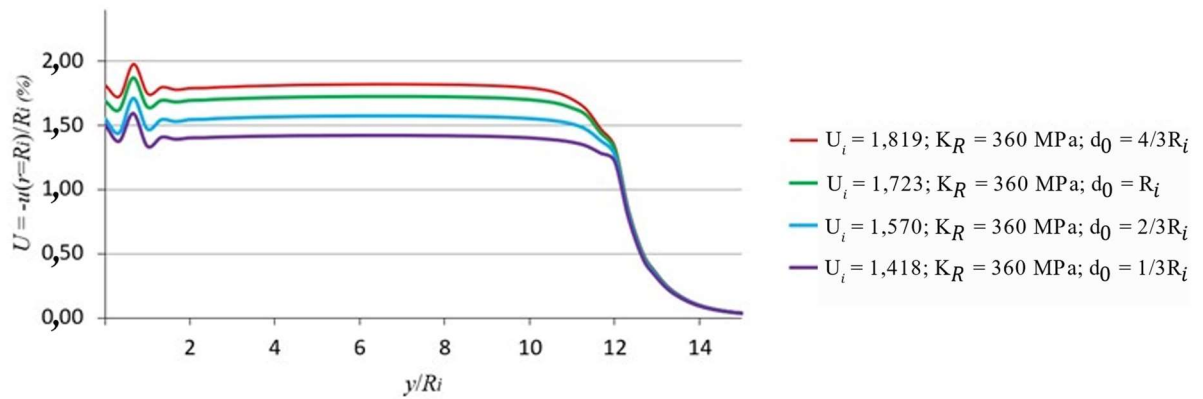
Figura 36 – Comparativo dos perfis de convergências em elastoplasticidade para diferentes rigidezes de revestimento (K_R)



Fonte: o autor (2023).

Outro parâmetro que influencia no comportamento da convergência refere-se à distância não revestida em relação à frente de escavação (d_0). Nesse caso, quanto maior a distância não revestida, maiores serão os valores do perfil de convergências, para um mesmo valor de rigidez do revestimento. Novamente, visualiza-se de maneira mais clara a ocorrência dessa variação na Figura 37.

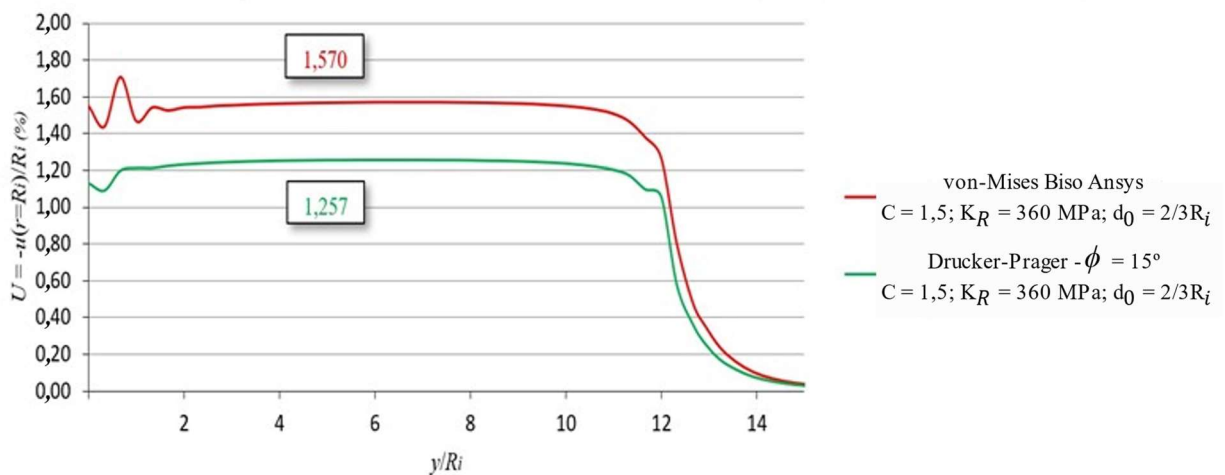
Figura 37 – Comparativo dos perfis de convergências em elastoplasticidade para diferentes valores de d_0



Fonte: o autor (2023).

De modo a evidenciar a variação de resultados no perfil de convergências quando se adota a plasticidade dependente da pressão e de forma não associada, realiza-se a análise comparativa em elastoplasticidade com revestimento, considerando um ângulo de atrito $\phi=15^\circ$ e um ângulo de dilatação $\Psi=0^\circ$, assumindo-se a superfície de plastificação de Drucker-Prager. Assim, verifica-se na Figura 38 o resultado obtido em relação à Figura 34.

Figura 38 – Resultado obtido em plasticidade não associada com o critério de Drucker-Prager



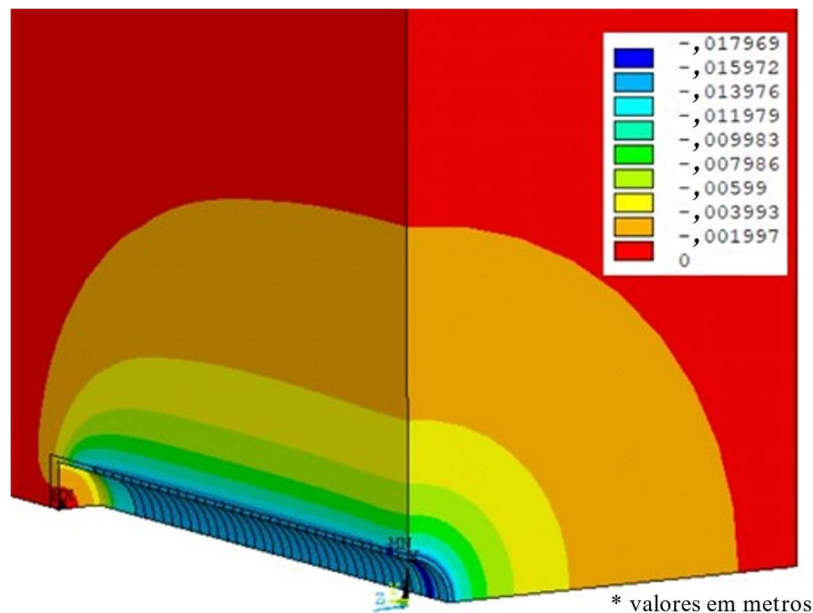
Fonte: o autor (2023).

Um aspecto importante dessa comparação é a sensibilidade da convergência em relação ao ângulo de atrito. Observa-se que a presença do ângulo de atrito $\phi=15^\circ$ implica uma redução considerável no perfil de convergências. Esse resultado é previsto, pois quanto maior o ângulo

de atrito, para uma determinada pressão hidrostática, mais afastada estará a superfície de plastificação em relação ao eixo hidrostático.

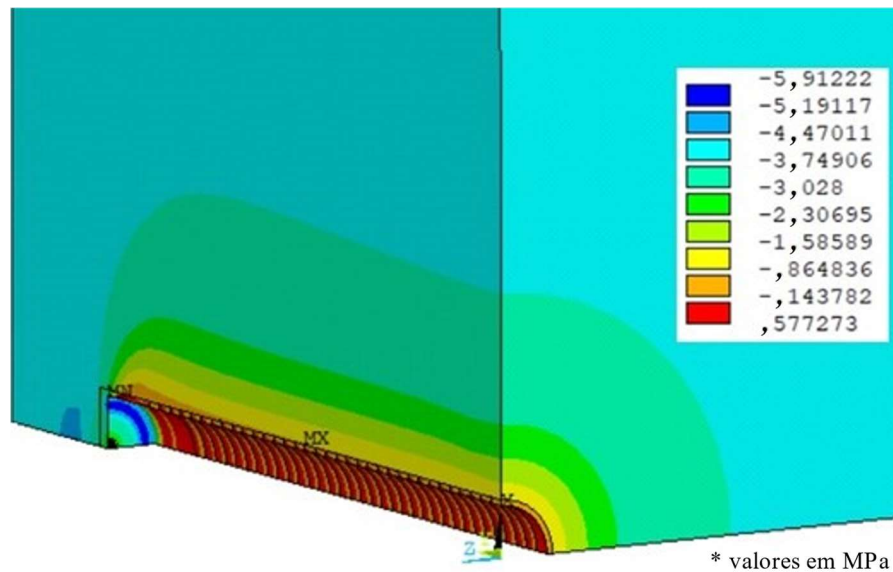
De modo a exemplificar os possíveis resultados que podem ser reproduzidos pelo *software* ANSYS, nas figuras 39 e 40 apresenta-se os campos de deslocamentos e de tensões, respectivamente, os quais no ANSYS correspondem ao eixo x , considerando coordenadas polares com o eixo y sendo o eixo axissimétrico. Assim, os resultados ilustrados correspondem à análise da Figura 34.

Figura 39 – Campo de deslocamentos radiais (m) em elastoplasticidade com revestimento considerando: $E_R = 3000\text{MPa}$; $E = 500\text{MPa}$; $d_0 = 2/3R_i$



Fonte: o autor (2023).

Figura 40 – Campo de tensões radiais (MPa) em elastoplasticidade com revestimento considerando: $E_R = 3000\text{MPa}$; $E = 500\text{MPa}$; $d_0 = 2/3R_i$

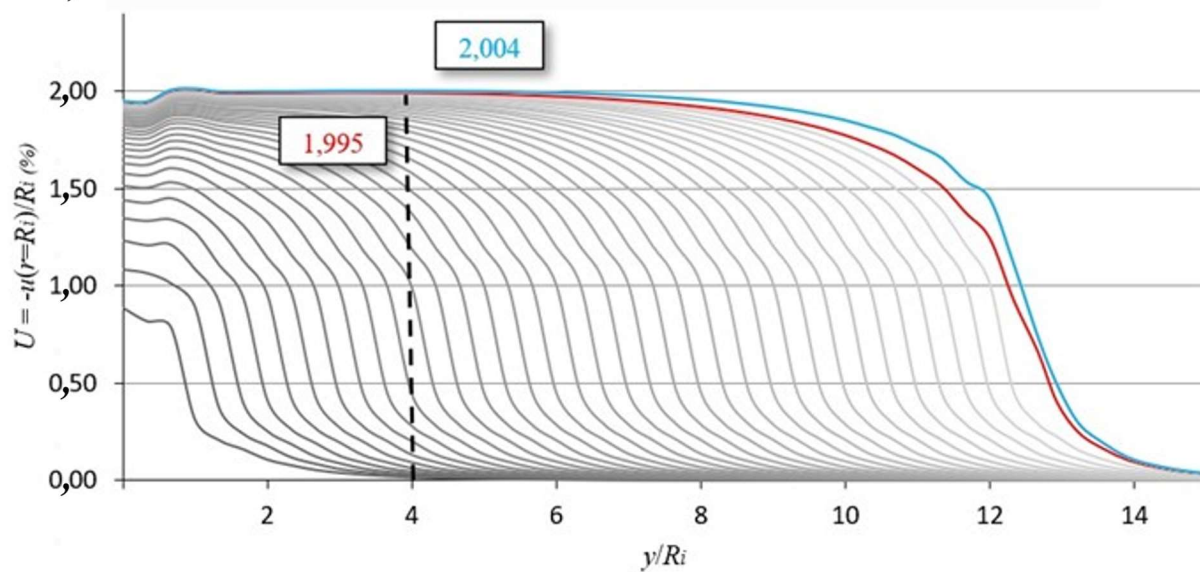
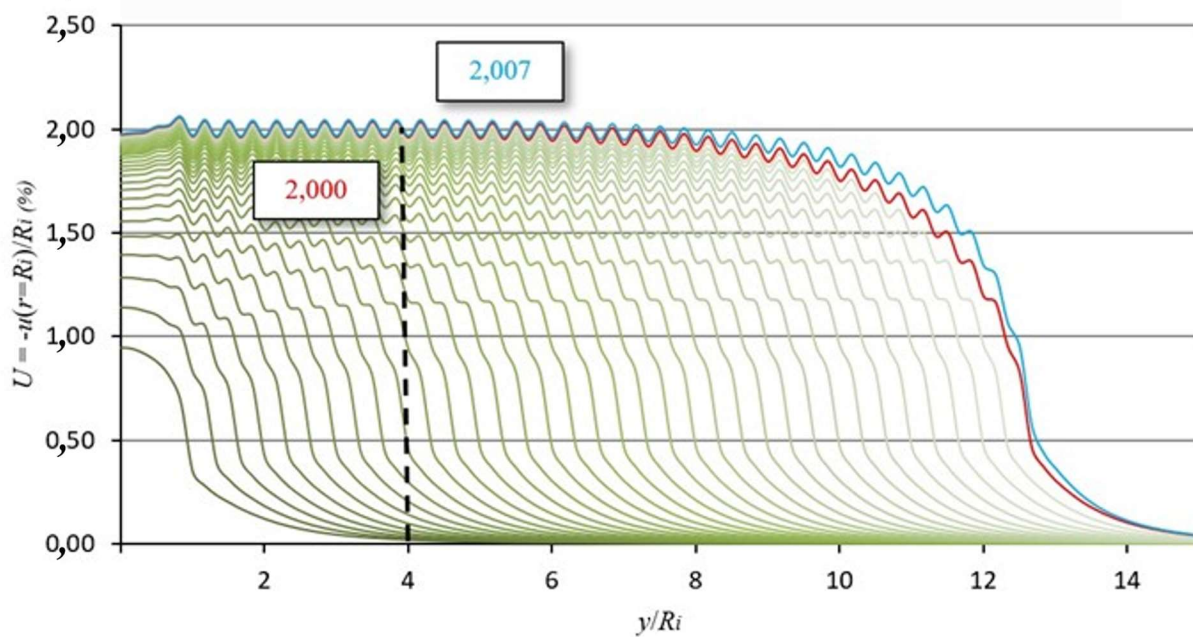


Fonte: o autor (2023).

5.4 VERIFICAÇÕES PRELIMINARES EM VISCOPLASTICIDADE

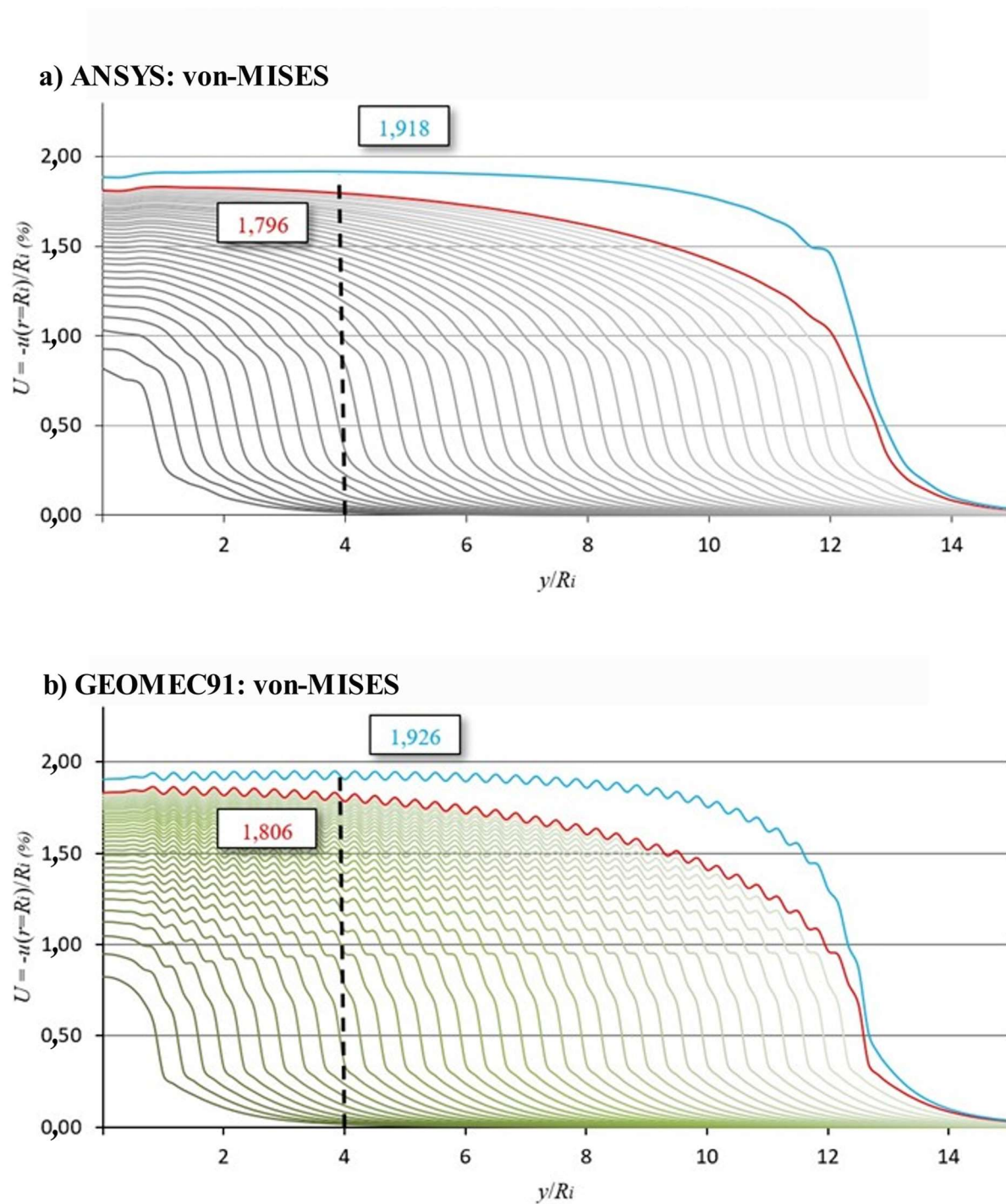
A próxima análise consiste na aplicação da lei constitutiva viscoplástica considerando a superfície de von-Mises. Nessa abordagem, fixou-se a rigidez do revestimento (K_R) em 36MPa , a distância sem revestimento em relação à face da escavação (d_0) em $2/3R_i$, a coesão $C^{vp} = 1,3$, a constante de viscosidade dinâmica $\eta = 10000000$ segundos ($115,74$ dias no caso do ANSYS), o valor de referência $F_0 = 1\text{MPa}$ e o expoente do modelo de Perzyna $n = 1$. Desse modo, buscou-se variar apenas os valores da velocidade de escavação (V_p) para verificar a influência nos perfis de convergência e o comportamento dos efeitos viscosos após o término da escavação e instalação do revestimento.

Nas figuras 41, 42 e 43, os perfis de convergência de cada passo de escavação estão representados pelas curvas cinzas abaixo da curva vermelha. O perfil de convergência correspondente à última etapa de escavação e conclusão da instalação do revestimento (final da construção do túnel – curto prazo) é descrito pela curva vermelha. A evolução dos efeitos viscosos para cada passo com intervalo de tempo de $\Delta t = 20$ dias é demonstrado pelo afastamento entre a curva vermelha e a azul. E, por fim, o perfil de convergência após o término dos efeitos viscosos (longo prazo) é retratado pela curva azul. É importante ressaltar, ainda, que os valores dos resultados indicados correspondem a $y/R_i = 4$.

Figura 41 – Perfil de convergências em viscoplasticidade com revestimento: $V = 1\text{m/dia}$ **a) ANSYS: von-MISES****b) GEOMECC91: von-MISES**

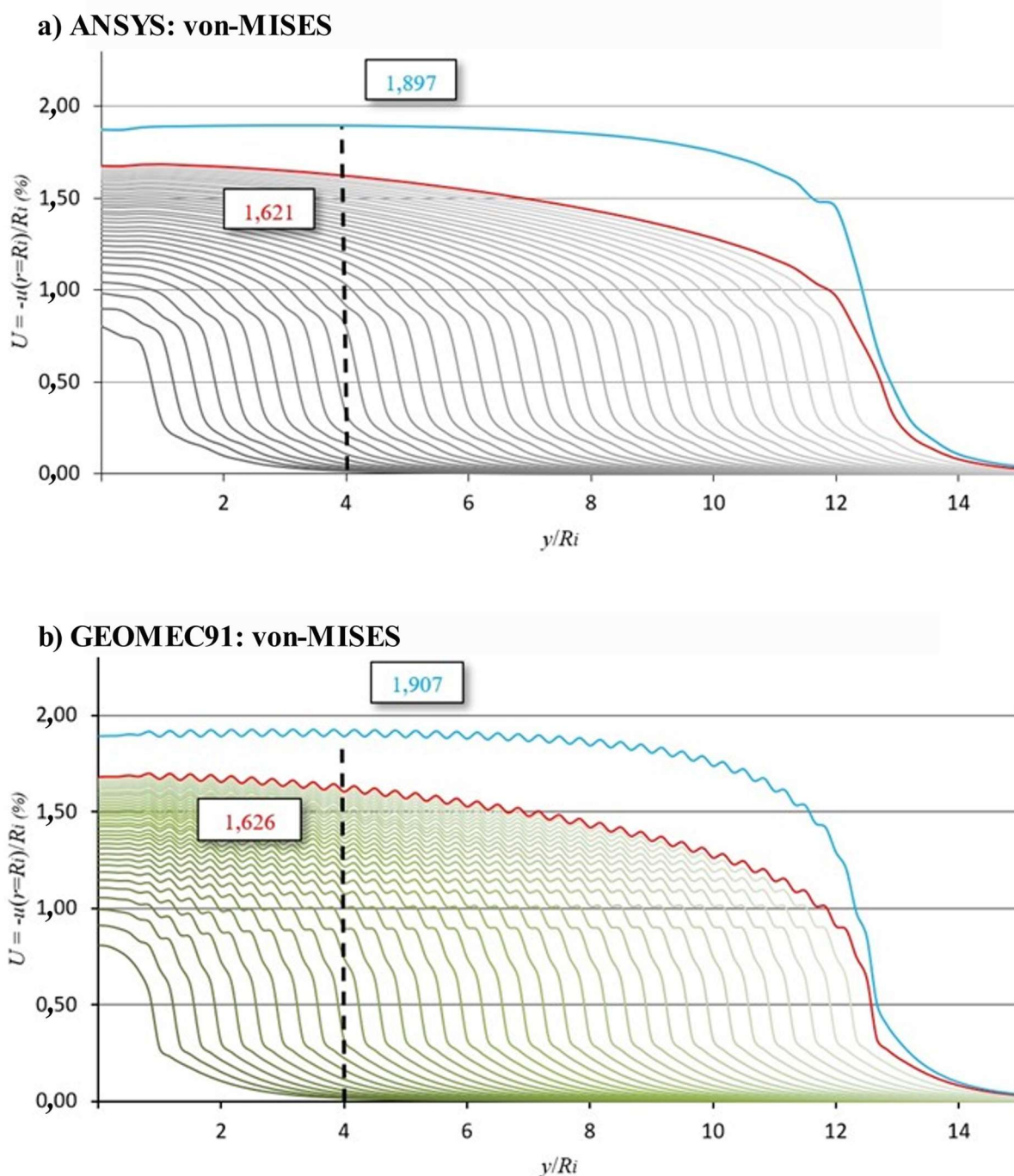
Fonte: o autor (2023).

Figura 42 – Perfil de convergências em viscoplasticidade com revestimento: $V = 5\text{m/dia}$



Fonte: o autor (2023).

Figura 43 – Perfil de convergências em viscoplasticidade com revestimento: $V = 10\text{m/dia}$



Fonte: o autor (2023).

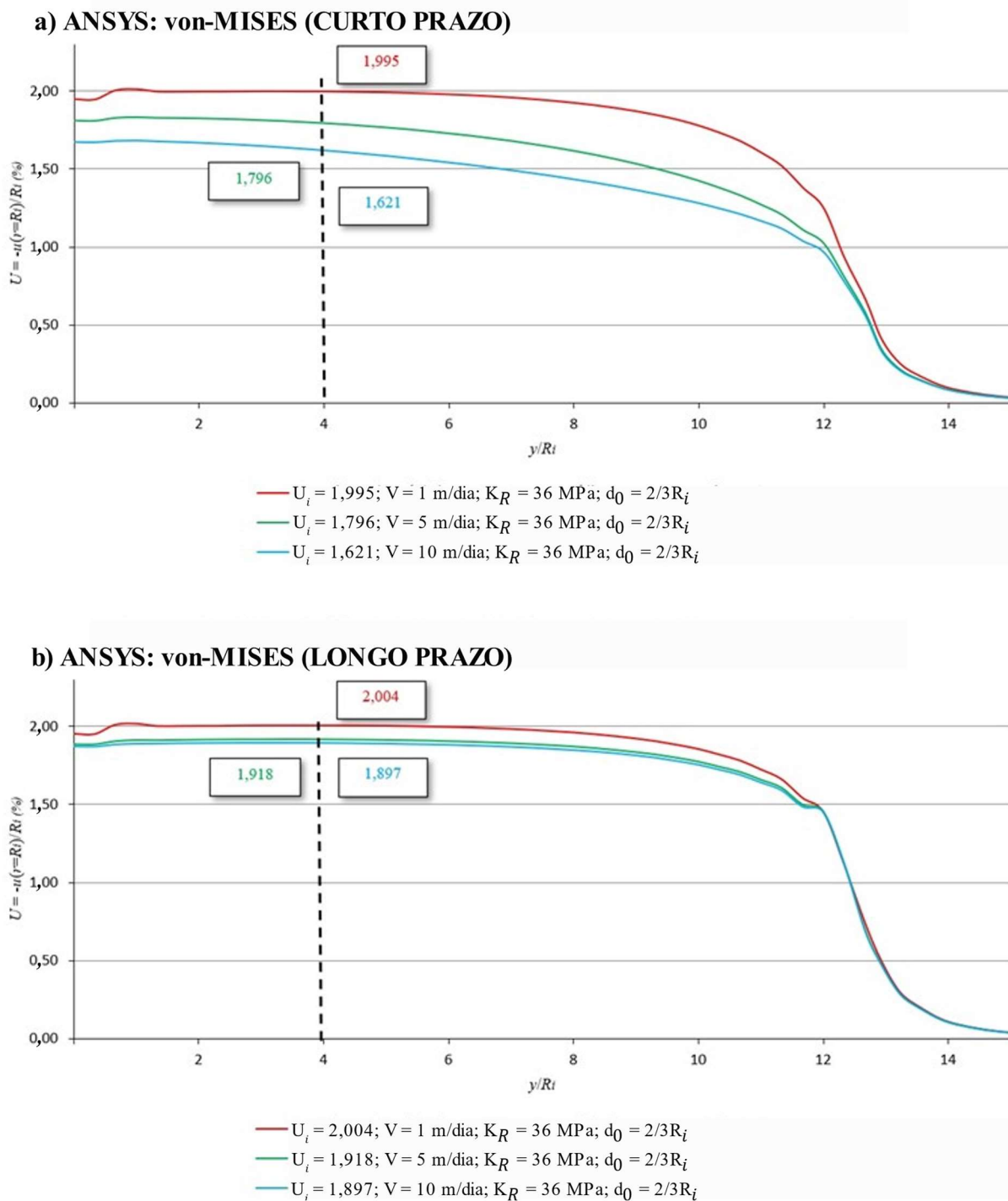
Depreende-se a partir das Figura 41, 42 e 43 que o perfil de convergência após o término dos efeitos viscosos (longo prazo), apresenta variação mais significativa em relação às velocidades de escavação de 1m/dia e de 5m/dia quando comparadas com a velocidade de 10m/dia . Por

outro lado, ao analisar o perfil de convergência ao final da construção do túnel (curto prazo), nota-se uma diferença relevante entre as velocidades analisadas, ou seja, conforme se aumenta a velocidade de escavação, se reduz o perfil de convergência.

Por outro lado, há um aumento das pressões suportadas pelo revestimento, quando se aplica maiores velocidades de escavação, uma vez que, ao restringir a evolução das deformações iniciais, suportará uma amplitude maior das pressões que tendem a diminuir ao longo do tempo conforme a deformação vai aumentando.

De maneira a evidenciar a distinção nos perfis de convergências a curto e a longo prazo, conforme varia-se a velocidade de escavação e mantém-se a rigidez do revestimento e a distância de instalação deste em relação à face da escavação, apresenta-se a Figura 44. Observa-se que neste caso há uma influência da velocidade de escavação sobre os perfis de convergências.

Figura 44 – Comparativo dos perfis de convergências no curto (a) e no longo prazo (b) em viscoplasticidade com revestimento para diferentes valores de velocidade de escavação



Fonte: o autor (2023).

6 ESTUDO DA CONVERGÊNCIA DE MALHA E VERIFICAÇÕES COM SOLUÇÕES ANALÍTICAS EM TÚNEIS GÊMEOS PROFUNDOS

As verificações que serão apresentadas nos itens 6.2 e 6.3 levam em consideração a aplicação da malha (Figura 49 e 52) definida e adotada para a análise paramétrica de túneis gêmeos com galeria transversal que será apresentada no item 7, configurando-se como alternativas de verificação parcial para o presente trabalho, pois consideram túneis gêmeos profundos sem a escavação de galerias transversais enquanto domínio de estudo. Além disso, levam em consideração modelos constitutivos mais simples, sendo em elasticidade e elastoplasticidade, respectivamente.

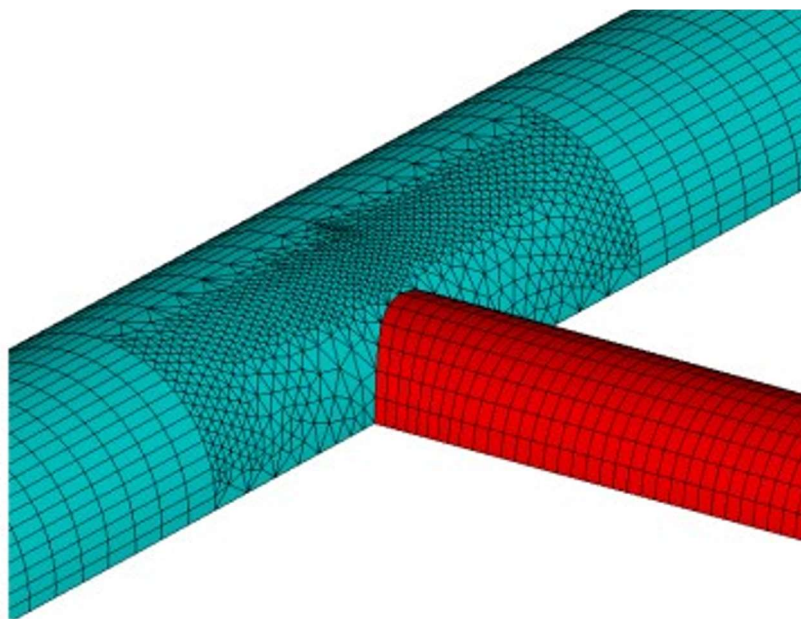
Esta condição se justifica devido à dificuldade de encontrar estudos destinados a túneis gêmeos profundos com galerias transversais, bem como a existência de pesquisas que considerem modelos constitutivos mais complexos neste tipo de domínio como, por exemplo, modelos que dependem da influência do tempo (efeitos viscosos). Entretanto, embora as verificações utilizadas tenham caráter mais simples, se tratando de domínio e modelos constitutivos, são de extrema importância para a confiabilidade do presente trabalho.

6.1 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO

De acordo com a discretização apresentada nas Figura 46 e 47, Quevedo (2017) empregou o elemento finito SOLID186 para a realização de análises de túneis gêmeos com galerias, porém considerando apenas o revestimento elástico e o maciço viscoplástico. Logo, a partir da referência das malhas aplicadas por Quevedo (2017), realizou-se a melhoria da discretização espacial do domínio, apresentando-se os resultados alcançados no presente trabalho nas Figura 49 a 52.

De modo análogo ao realizado por Quevedo (2017), fez-se uso da simetria nas condições de contorno, visando a redução do sistema de equações. Conforme Dada (2020), na região da galeria tentou-se utilizar elementos hexaédricos, no interior da galeria e na região do seu revestimento, juntamente com elementos tetraédricos na região do seu entorno (Figura 45). No entanto, a suavidade do campo de tensões em elasticidade ficou muito prejudicada.

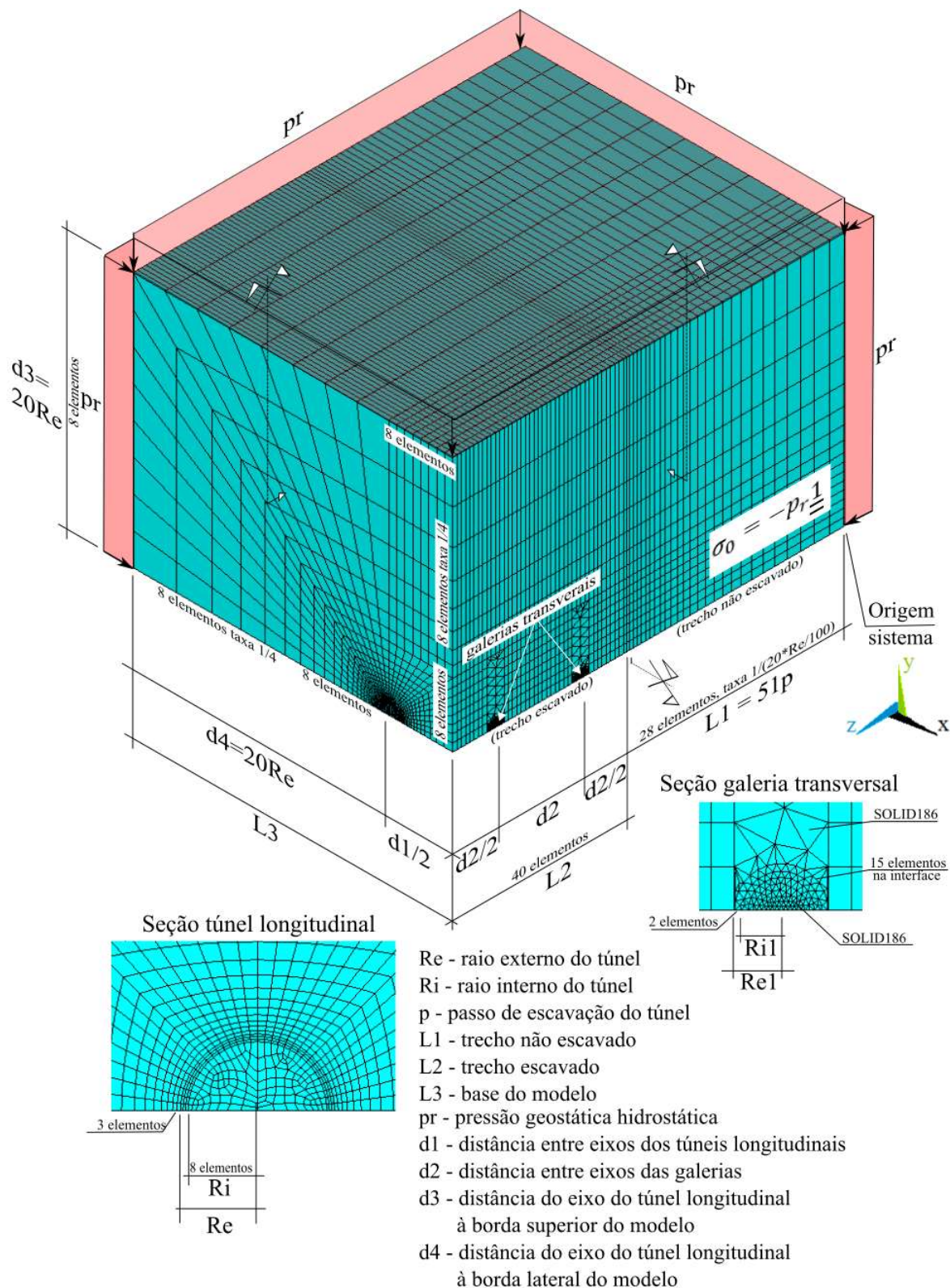
Figura 45 – Detalhe do encontro do revestimento da galeria transversal (elementos hexaédricos) com o revestimento do túnel longitudinal (elementos tetraédricos)



Fonte: o autor (2023).

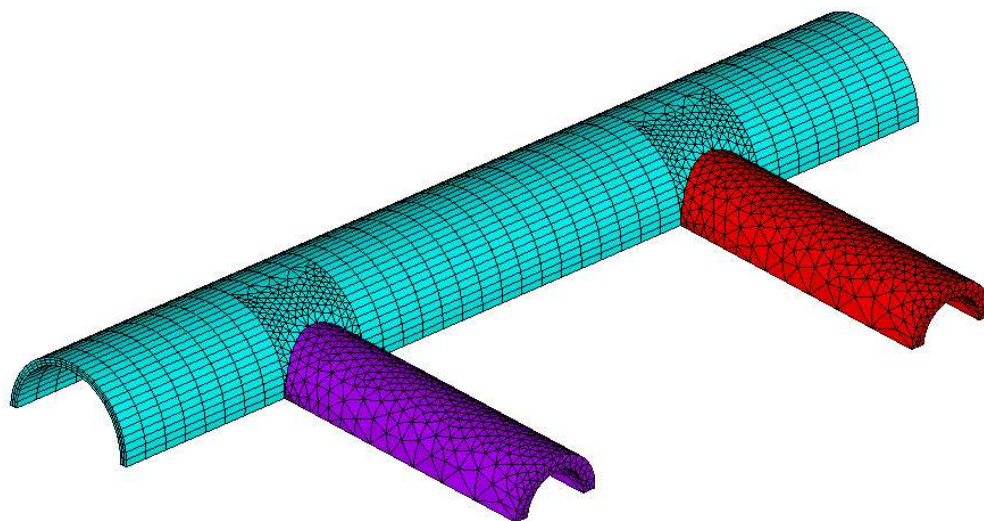
Tendo em vista este problema da suavidade, optou-se por retornar aos elementos tetraédricos em toda a região, porém, diferentemente de Quevedo (2017), atentando-se para que seus domínios fossem compatíveis com os passos de escavação. A malha final parametrizada pode ser vista nas Figura 49 a 52.

Figura 46 – Exemplo de malha, dimensões e condições de contorno do modelo 3D de túneis gêmeos com galerias transversais.



Fonte: QUEVEDO (2017).

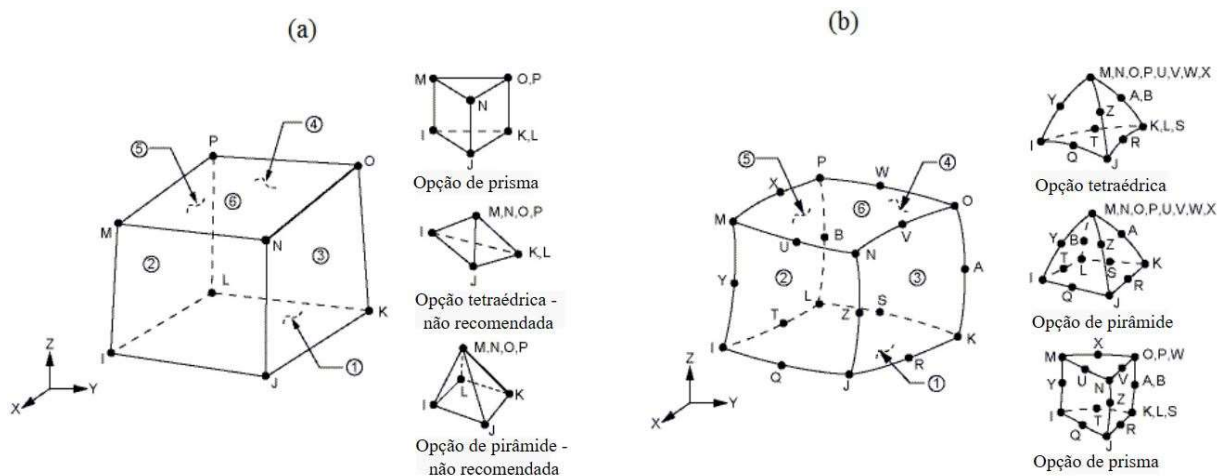
Figura 47 – Exemplo de detalhe do encontro do revestimento da galeria transversal com o túnel longitudinal.



Fonte: QUEVEDO (2017).

Para a região que não compreende a galeria foi utilizado o elemento SOLID185. Este elemento configura-se como um hexaedro trilinear de 8 nós com 8 pontos de integração. Por outro lado, na região da galeria foi utilizado o elemento SOLID186 quadrático com 20 nós, porém, na sua forma colapsada em tetraedro, conforme Figura 48. Em ambos os elementos foi utilizada a opção de integração completa. Vale ressaltar, ainda, que ambos os elementos apresentam recursos para lidarem com travamento (*Locking*) e modos espúrios (*Hourglass*), contudo, no presente trabalho foi feito uso do refinamento da malha para evitar estes problemas.

Figura 48 – Elementos tridimensionais: SOLID185 (a) e SOLID186 (b)



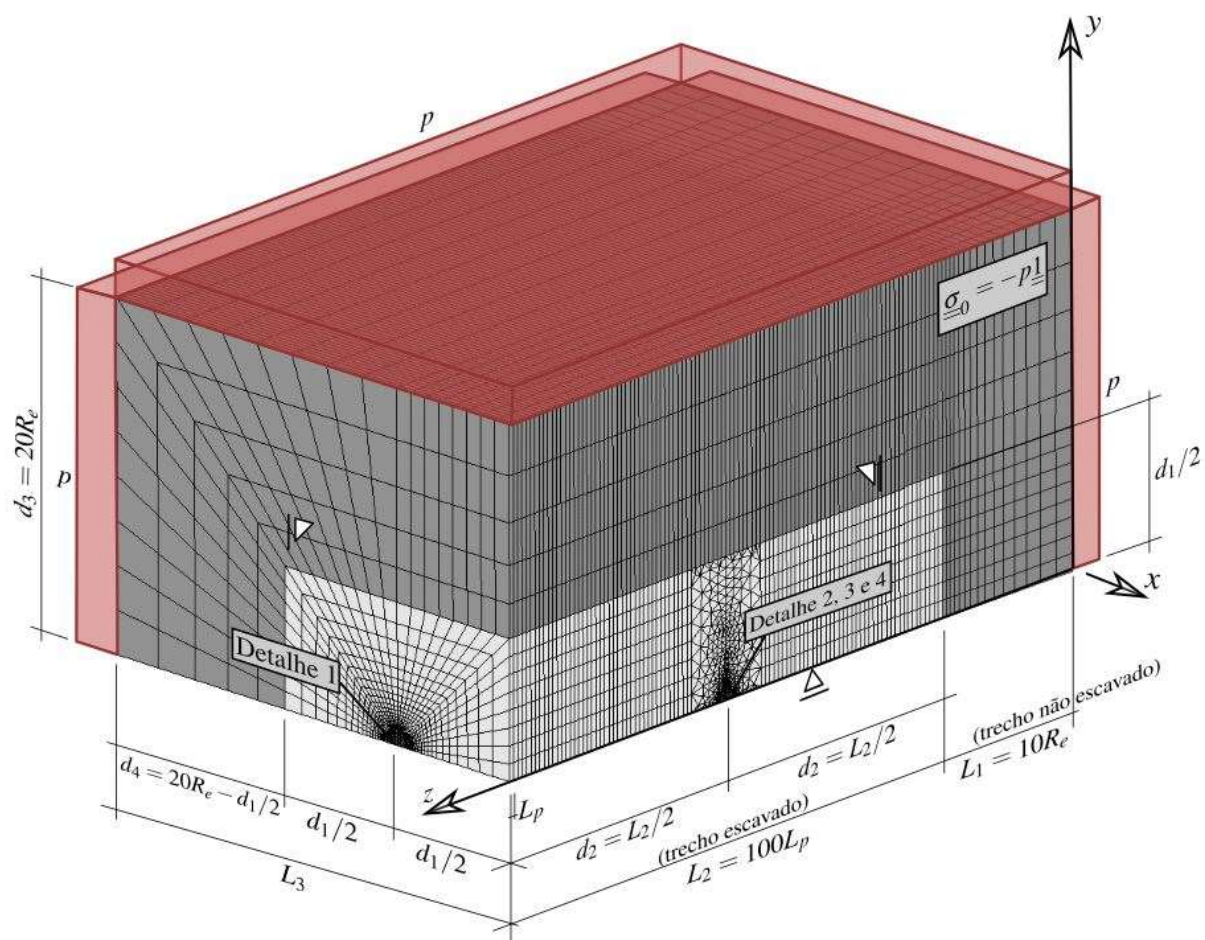
Fonte: adaptado de ANSYS (2022).

Os modelos constitutivos adotados já estavam escritos em Fortran por Quevedo (2017, 2021). Assim, no presente trabalho estes foram introduzidos na sub-rotina USERMAT, que se configura como recurso disponível para que o usuário possa customizar o ANSYS.

Com o auxílio do estudo da convergência de malha e através da implementação da linguagem APDL, pode-se melhorar o domínio tridimensional ilustrado nas Figura 46 e 47. Ademais, conforme observado na pesquisa direcionada aos casos reais de aplicação e execução de túneis gêmeos profundos como, por exemplo, o *Gotthard Base Tunnel* (GBT) e o *Brenner Base Tunnel* (BBT), identificou-se que o afastamento entre os eixos das galerias transversais é significativamente grande, na ordem de centenas de metros. Logo, a partir das análises executadas no presente trabalho identificou-se que a zona de influência da presença da galeria na convergência dos túneis longitudinais apresenta-se na ordem de dezenas de metros, ou seja, em uma região pequena quando comparada ao comprimento do túnel. A identificação desta região afetada pela presença da galeria permitiu a remoção da segunda galeria transversal existente no domínio adotado por Quevedo (2017). Assim, visando a redução do tempo de processamento da solução, adotou-se apenas uma galeria transversal na construção do domínio do presente trabalho, conforme mostrado na Figura 49.

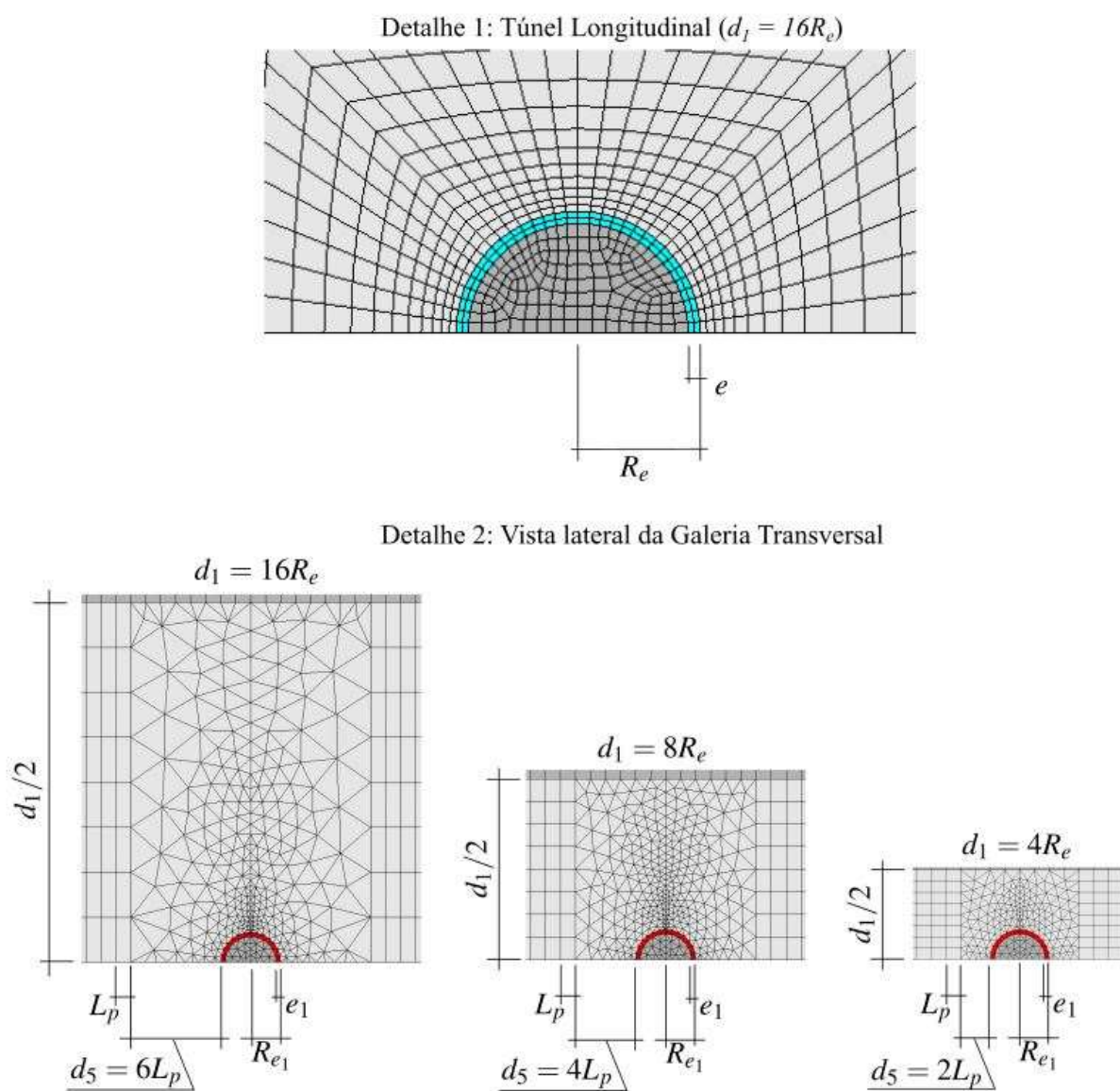
Outro ponto relevante relacionado ao domínio refere-se à realização do estudo da malha no entorno da galeria, em relação aos elementos tetraédricos. Neste caso, objetivando o aprimoramento na suavidade da solução, observou-se a necessidade de implementação de uma zona maior de transição entre os elementos tetraédricos e hexaédricos, indicado na Figura 51 como o parâmetro d_5 .

Figura 49 – Malha, dimensões e condições de contorno do modelo 3D de túneis gêmeos com galeria transversal desenvolvido na pesquisa.



Fonte: o autor (2023).

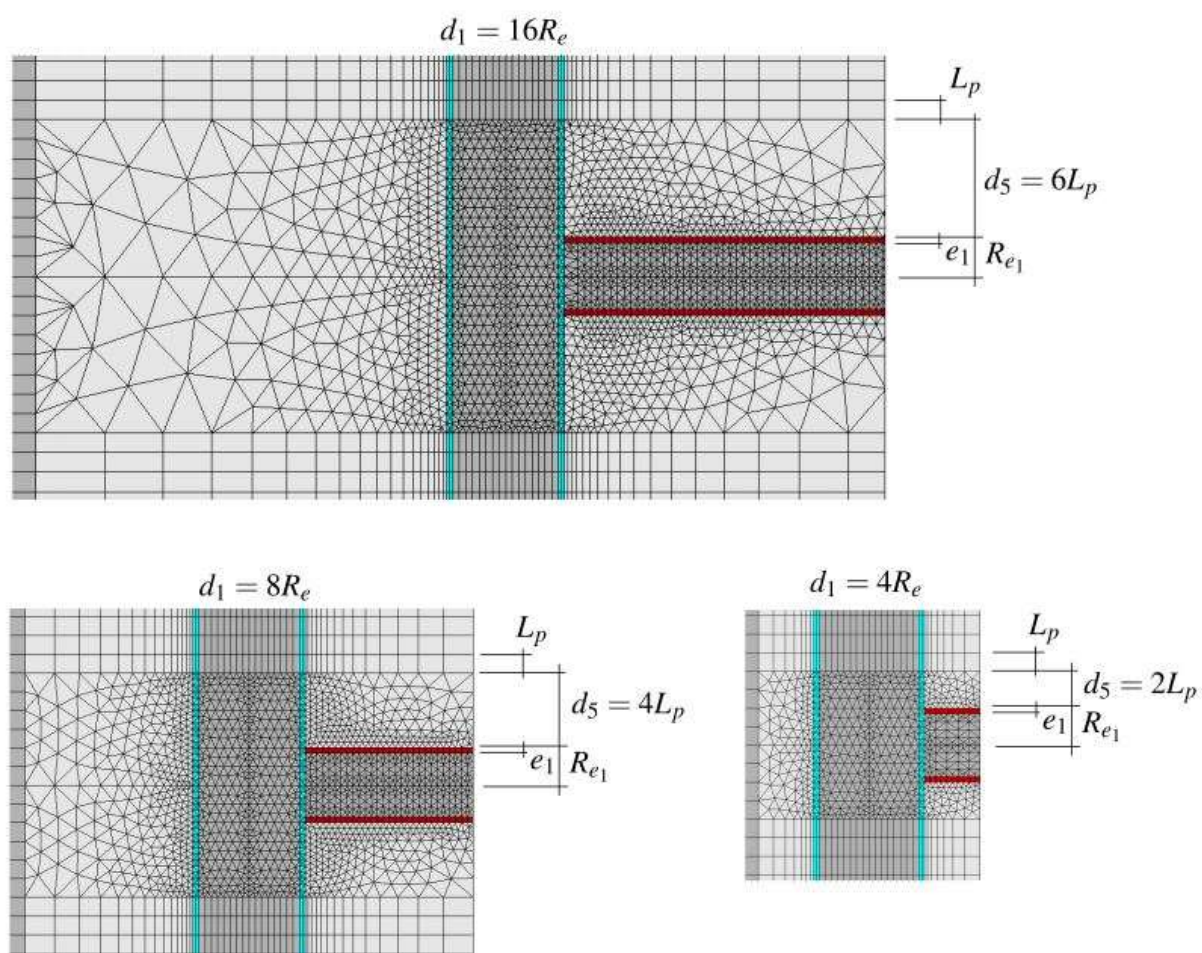
Figura 50 – Detalhes 1 e 2 da malha e dimensões para o modelo 3D de túneis gêmeos com galeria transversal.



Fonte: o autor (2023).

Figura 51 – Detalhe 3 da malha e dimensões para o modelo 3D de túneis gêmeos com galeria transversal.

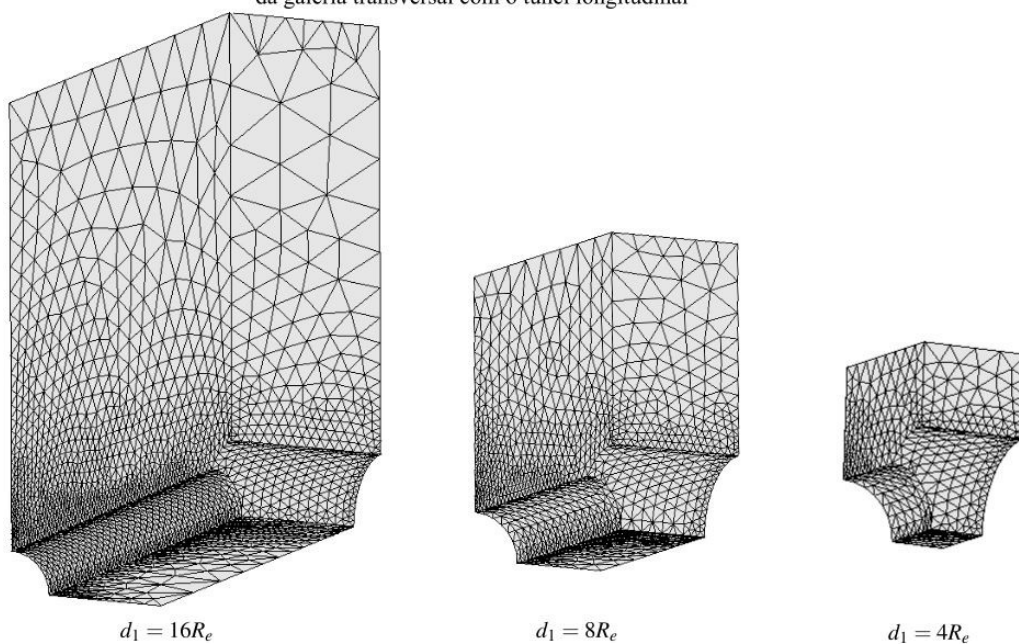
Detalhe 3: Vista inferior do encontro da galeria transversal com o túnel longitudinal



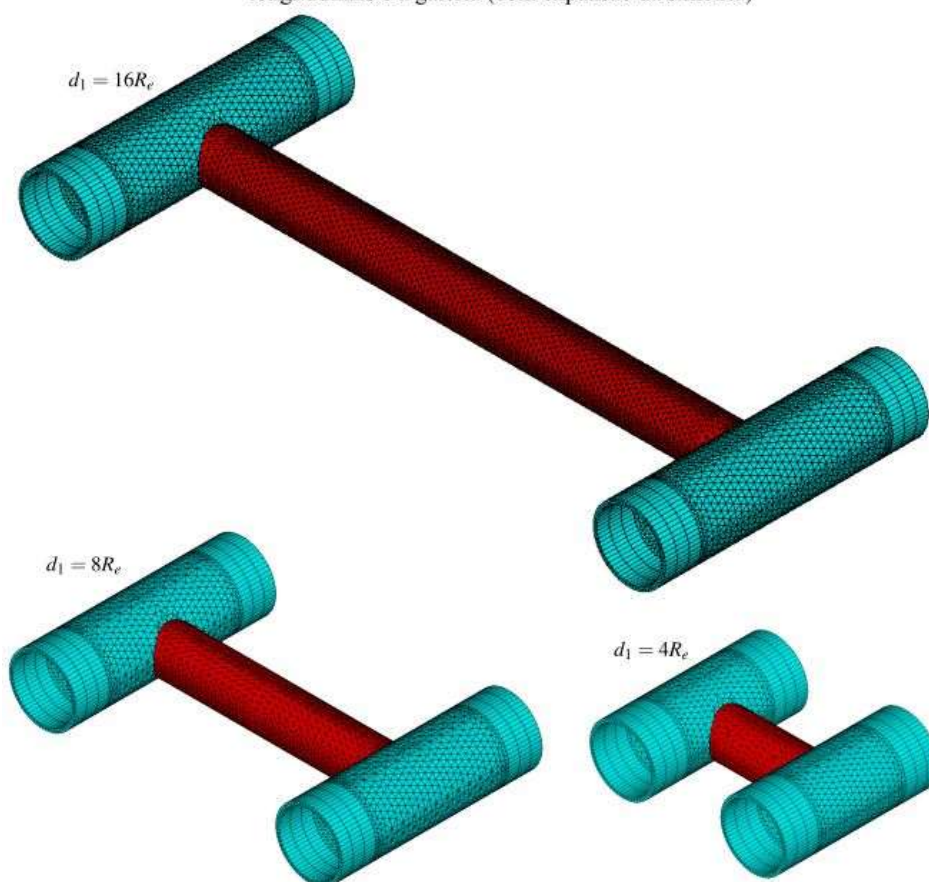
Fonte: o autor (2023).

Figura 52 – Detalhes 4 e 5 do encontro entre a galeria transversal e o túnel longitudinal.

Detalhe 4: Vista isométrica da malha de tetraédros da região de encontro da galeria transversal com o túnel longitudinal



Detalhe 5: Vista isométrica da região de encontro entre os túneis longitudinais e a galeria (com expansão da simetria)



Fonte: o autor (2023).

O custo computacional de modelos como o deste trabalho é influenciado por vários fatores, sendo o tamanho do sistema de equações a ser resolvido um dos mais significativos. Esse tamanho é determinado pelo número de nós e quantidade de graus de liberdade ativos por nó. Atualmente, os algoritmos de resolução conseguem lidar rapidamente com sistemas contendo alguns milhões de graus de liberdade. No entanto, o que torna o cálculo extremamente demorado é o fato de que, em problemas não lineares, como a interação entre o maciço e o suporte com efeitos de longo prazo, esse sistema precisa ser resolvido várias vezes (durante as iterações de equilíbrio) para cada incremento de tempo (subpasso).

Desse modo, apresenta-se a tabela comparativa entre a malha desenvolvida por Quevedo (2017) e a malha empregada no estudo deste trabalho para o domínio dos túneis gêmeos com galeria transversal.

Tabela 2 – Comparativo da malha adotada com a malha de Quevedo (2017) para túneis gêmeos com galeria transversal

MALHA TÚNEIS GÊMEOS COM GALERIA				
DOMÍNIO	d1 = 4Re			
	SOLID 185	SOLID 186	TOTAL ELEMENTOS	NÓS
MALHA QUEVEDO (2017)	61556	20228	81784	94736
MALHA ATUAL (2023)	85339	32886	118225	125126
d1 = 8Re				
	SOLID 185	SOLID 186	TOTAL ELEMENTOS	NÓS
MALHA QUEVEDO (2017)	61556	25299	86855	99217
MALHA ATUAL (2023)	106217	76572	182789	203425
d1 = 16Re				
	SOLID 185	SOLID 186	TOTAL ELEMENTOS	NÓS
MALHA QUEVEDO (2017)	61556	20228	81784	94736
MALHA ATUAL (2023)	96693	124414	221107	251203

Fonte: o autor (2023).

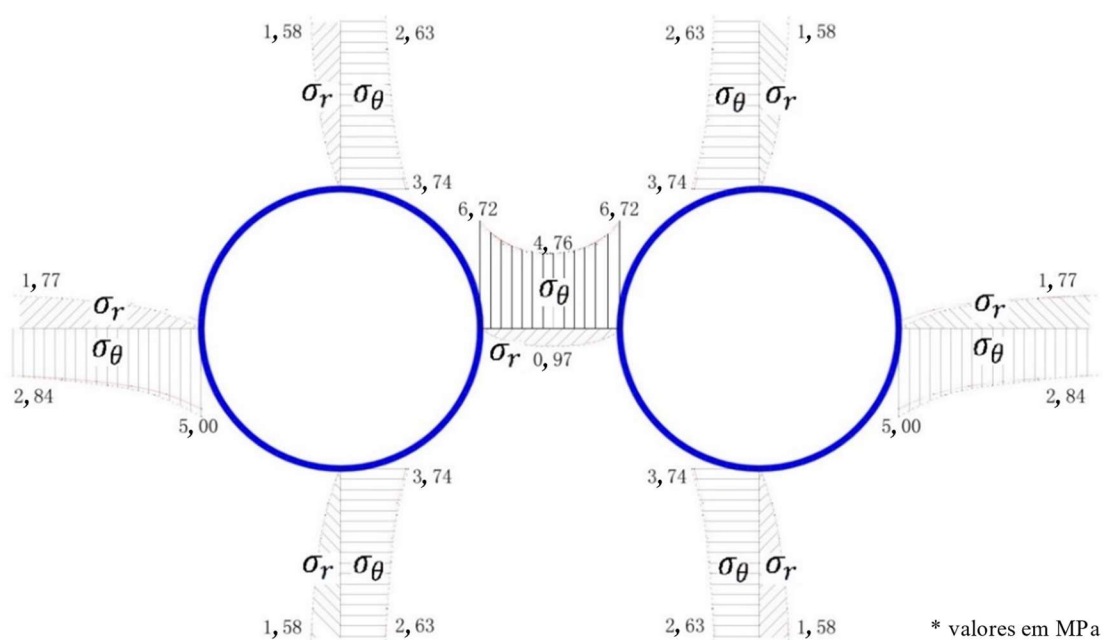
Embora tenha sido removida uma das galerias transversais do domínio, observa-se que a malha utilizada neste trabalho apresenta um maior número de elementos e de nós, quando comparada à malha desenvolvida por Quevedo (2017). Esta condição se dá devido ao aumento do comprimento do trecho escavado nos túneis longitudinais e ao maior refinamento da malha, principalmente na região de intersecção entre a galeria transversal e o túnel longitudinal.

6.2 VERIFICAÇÃO COM SOLUÇÃO ANALÍTICA EM ELASTICIDADE

Com a finalidade de apresentar uma solução analítica em elasticidade para a distribuição das tensões radiais e tangenciais em túneis gêmeos profundos com seção circular, Guo, Liu e Zhu (2021) realizaram a comparação dos resultados analíticos com os resultados obtidos na solução numérica, demonstrando coerência no comparativo entre os métodos. Além disso, identificaram que a presença de uma pressão interna (simulando o suporte) no valor de 0,33 MPa ocasiona o aumento dos valores das tensões radiais e a diminuição dos valores das tensões tangenciais, quando comparado ao caso sem consideração de pressão interna.

Outro ponto importante destacado pelos referidos autores relaciona-se ao fator de concentração de tensões tangenciais entre os túneis, o qual tende a aumentar com a redução da distância entre os túneis gêmeos e com a diminuição da pressão interna. Conforme pode ser observado na Figura 53, considerando a pressão interna nula e a distância máxima de afastamento equivalente a um raio do túnel a partir do limite da seção, quanto mais próximo do contorno da seção do túnel (borda), maior será o valor da tensão tangencial, tendendo a reduzir, conforme se afasta do limite da seção. Por outro lado, quanto mais afastado do contorno da seção do túnel, maior será o valor da tensão radial, tendendo a alcançar o valor da pressão hidrostática correspondente a 2,2 MPa, enquanto no limite da seção do túnel o valor será nulo.

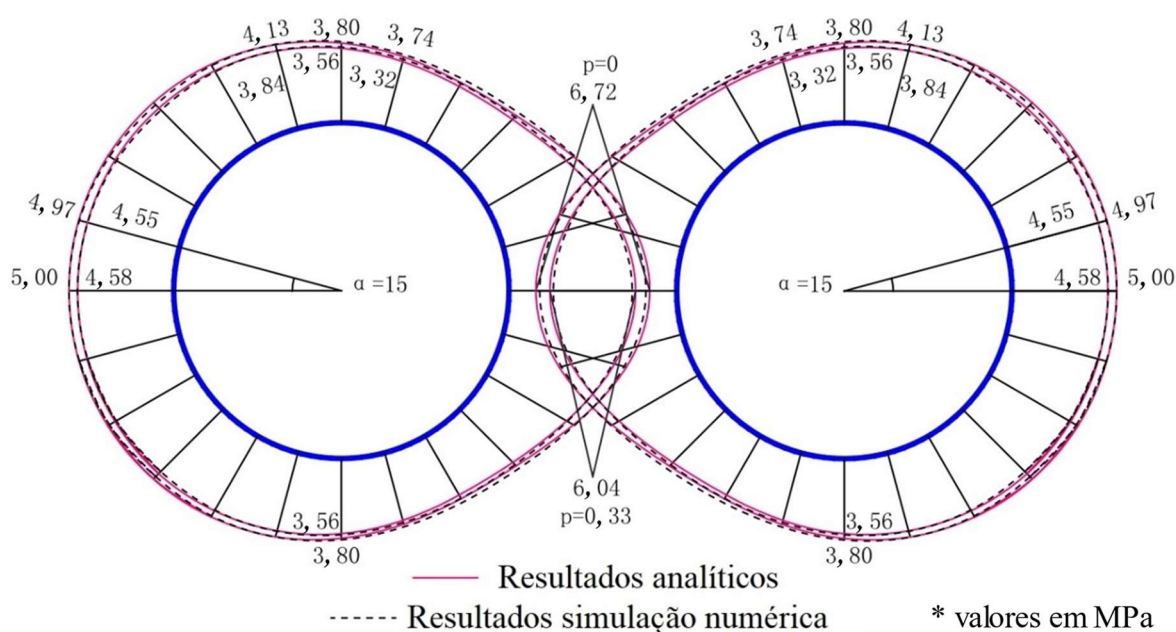
Figura 53 – Distribuição de tensões tangenciais (σ_θ) e radiais (σ_r) em MPa para os túneis gêmeos sem pressão de apoio



Fonte: adaptado de GUO, LIU E ZHU (2021).

Pode-se observar, ainda, que a tensão tangencial máxima ocorre na região do maciço localizada entre os túneis gêmeos. Desse modo, a distribuição das tensões tangenciais no entorno dos limites dos túneis, considerando pressão interna nula e pressão interna de 0,33 MPa, pode ser visualizada na Figura 54, estando os limites dos túneis divididos em 24 partes com ângulo de 15° cada. Como esperado, as tensões tangenciais são maiores quando a pressão interna é zero, sendo o valor máximo de 6,72 MPa neste caso e o valor de 6,04 MPa quando a pressão interna é 0,33 MPa.

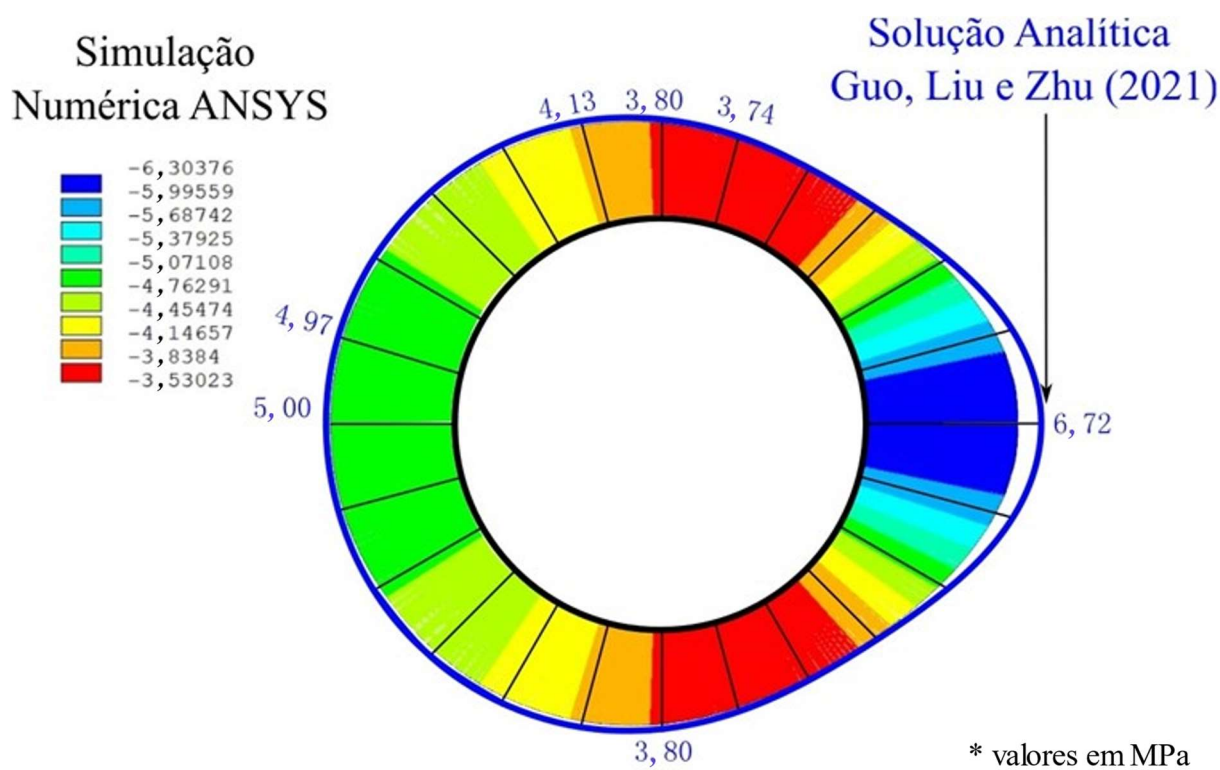
Figura 54 – Distribuição das tensões tangenciais (σ_θ) em MPa ao redor da seção do túnel



Fonte: adaptado de GUO, LIU E ZHU (2021).

De modo a garantir a confiabilidade do modelo numérico desenvolvido no presente trabalho, buscou-se a verificação com os resultados analíticos em elasticidade encontrados por Guo, Liu e Zhu (2021) através da implementação dos parâmetros geométricos dos túneis gêmeos e dos parâmetros do maciço utilizados no estudo desenvolvido pelos referidos autores. Assim, na Figura 55, apresentam-se os resultados encontrados na simulação numérica realizada no *software* ANSYS com a aplicação do domínio e da malha desenvolvidos no presente trabalho para os túneis gêmeos profundos com galerias (figuras 49 a 52) e do modelo constitutivo elástico disponibilizado pelo próprio *software*.

Figura 55 – Verificação de resultados das tensões ortorradiais em MPa: Simulação numérica ANSYS x Solução Analítica Guo, Liu e Zhu (2021)

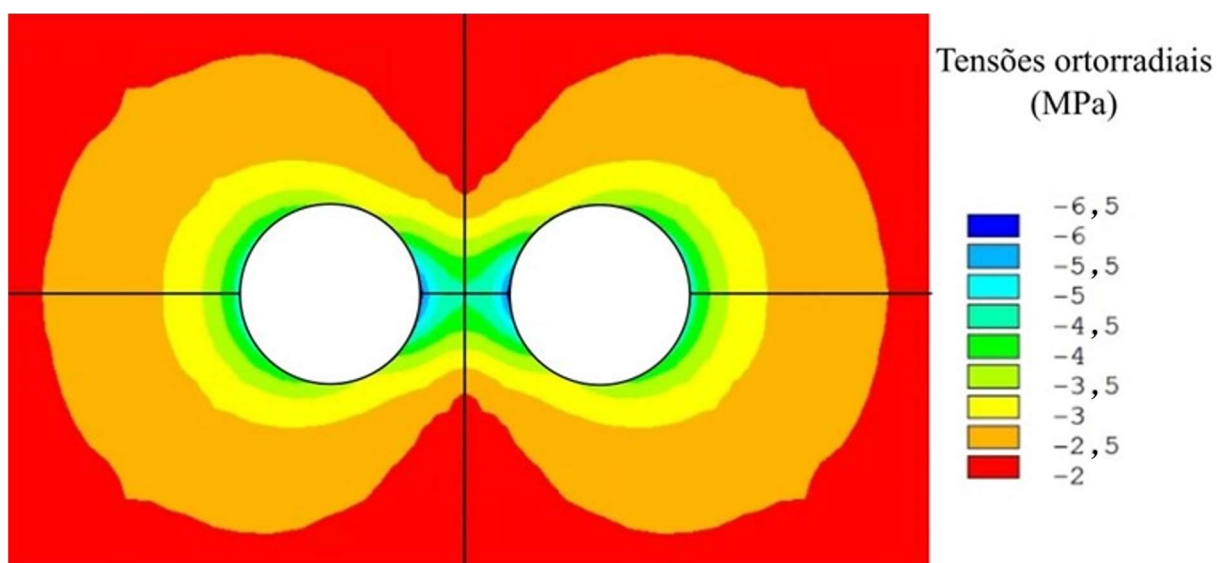


Fonte: o autor (2023).

Diante do resultado apresentado na Figura 55, pode-se observar que os valores obtidos para as tensões tangenciais no *software* ANSYS, diante dos resultados analíticos encontrados por Guo, Liu e Zhu (2021), possuem certa proximidade, sendo o valor máximo de 6,72 MPa na solução analítica e o valor máximo de aproximadamente 6,30 MPa na solução numérica do ANSYS, retratando uma diferença admissível de 6,25%. Levando em consideração as peculiaridades do domínio e da discretização da malha do presente trabalho, bem como a pequena diferença resultante do comparativo diante de valores de referência provenientes de solução analítica, pode-se concluir que a verificação foi satisfatória do ponto de vista numérico, pois a nível de tensão, espera-se uma certa divergência de resultados entre a solução analítica e a numérica.

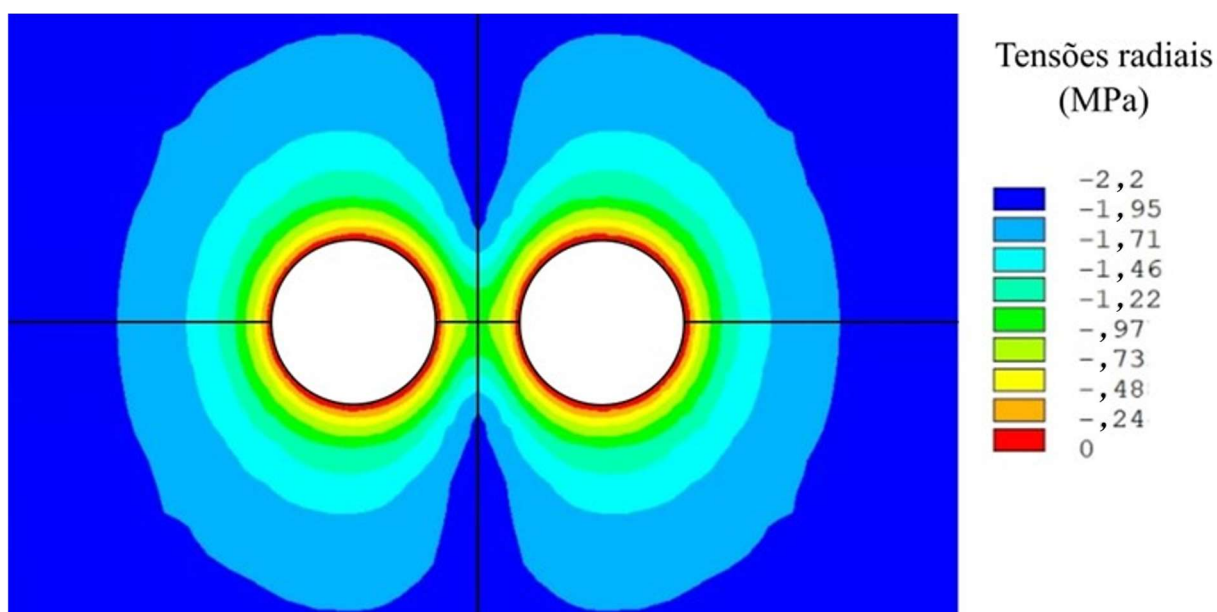
De acordo com Guo, Liu e Zhu (2021), os valores das tensões tangenciais tenderão a ser maiores na região próxima do contorno da seção do túnel, reduzindo conforme se afasta do limite da seção. Esta afirmação pode ser constatada na Figura 56. Além disso, de acordo com a Figura 57, as tensões radiais equivalem a zero no limite da seção do túnel e tendem a aumentar conforme se afastam até alcançarem o valor da pressão hidrostática, ratificando o estudo dos referidos autores.

Figura 56 – Campo de tensões ortorradiais obtido a partir dos parâmetros de Gui, Liu e Zhu (2021)



Fonte: o autor (2023).

Figura 57 – Campo de tensões radiais obtido a partir dos parâmetros de Gui, Liu e Zhu (2021)

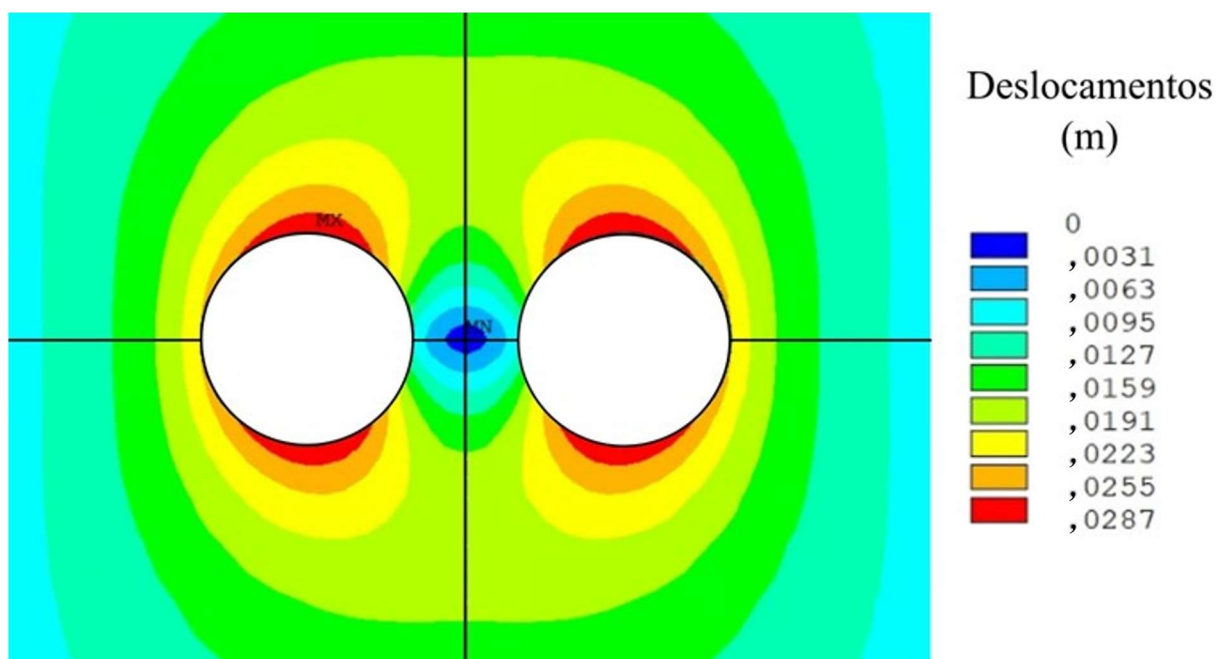


Fonte: o autor (2023).

Embora não seja objeto do estudo desenvolvido por Guo, Liu e Zhu (2021), aproveitou-se a verificação realizada no *software* ANSYS para gerar os resultados em termos dos deslocamentos totais do referido trabalho de referência para a realização da análise de convergência de malha. Observa-se nas Figura 58 e 59, uma suavidade coerente na delimitação

de cada região atribuída às faixas de deslocamentos, o que expressa boa discretização do domínio através do refinamento da malha empregado, mesmo havendo a transição entre diferentes elementos finitos na região da galeria transversal no domínio adotado. Esta condição de razoabilidade pode ser conferida pela reprodução dos resultados da solução analítica apresentados anteriormente.

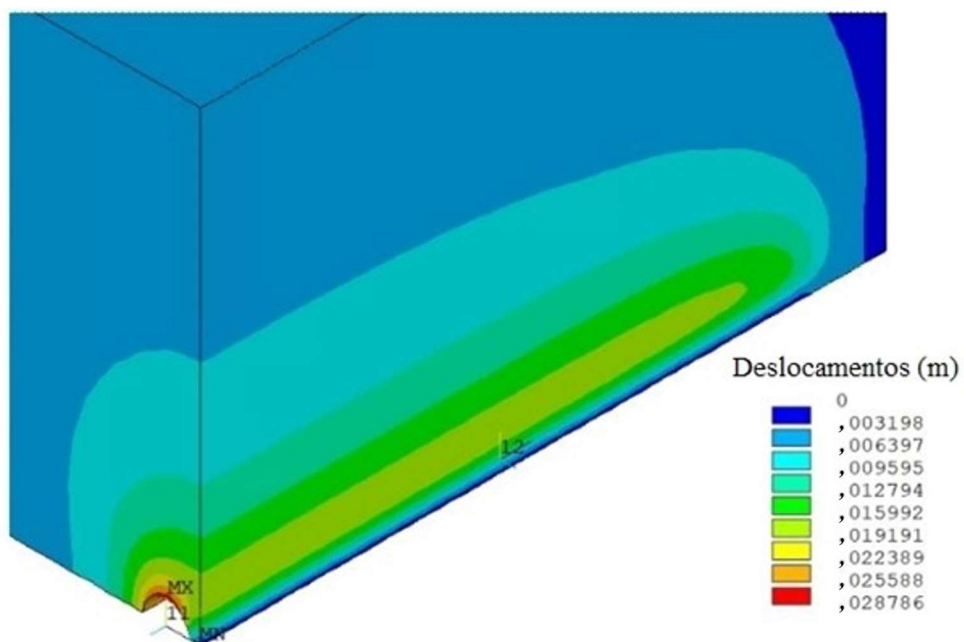
Figura 58 – Deslocamentos totais obtidos a partir dos parâmetros de Gui, Liu e Zhu (2021)



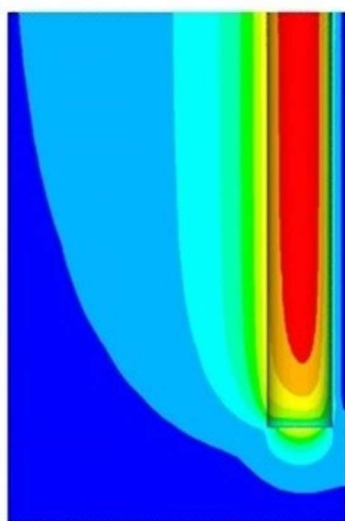
Fonte: o autor (2023).

Na Figura 58 percebe-se que os maiores deslocamentos ocorrem próximos aos limites das seções, mais precisamente no trecho superior e inferior da cavidade. Levando em consideração que o diâmetro da seção corresponde a 8 m, que o raio interno é 4 m e que o valor do maior deslocamento equivale a aproximadamente 2,87 cm, pode-se constatar uma convergência admissível de aproximadamente 0,7175%, conforme demonstrado na Figura 60, referente ao perfil de convergência gerado pelo *software* ANSYS.

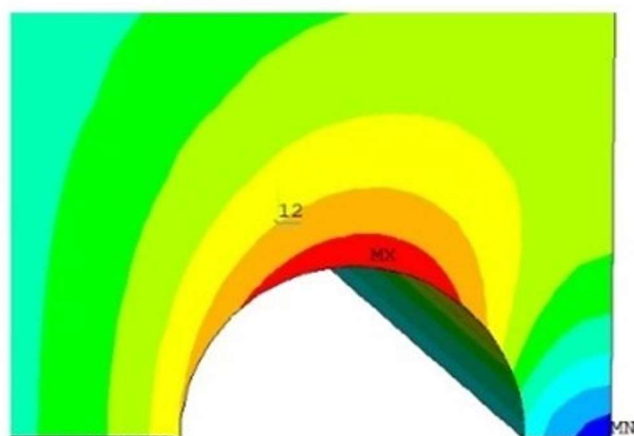
Figura 59 - Deslocamentos totais obtidos a partir dos parâmetros de Gui, Liu e Zhu (2021)



Deslocamentos ao longo do comprimento do túnel (trecho escavado)



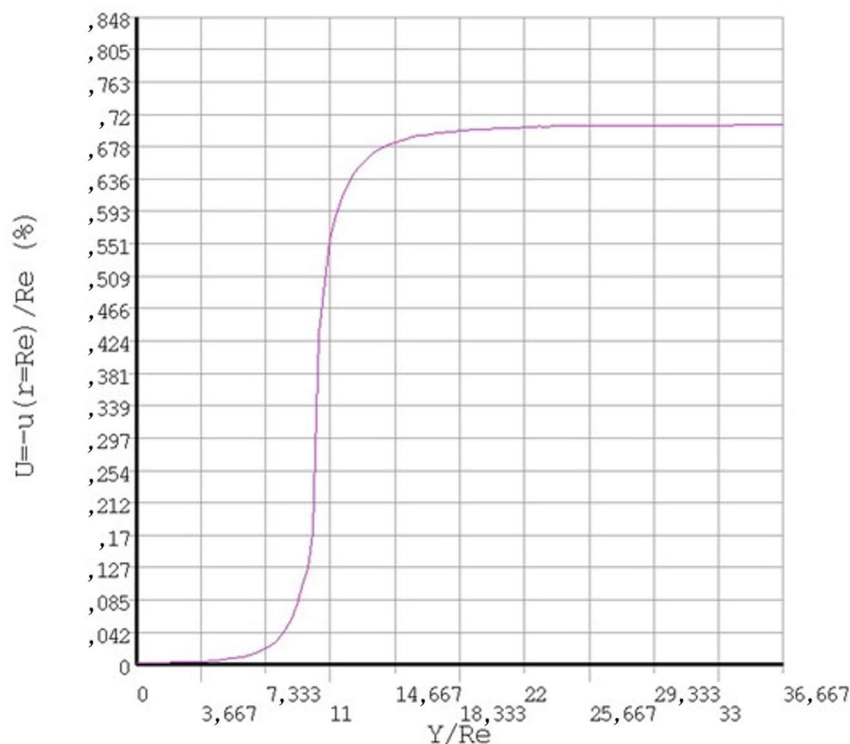
Deslocamentos próximos da face de escavação



Deslocamentos ao redor da cavidade do túnel

Fonte: o autor (2023).

Figura 60 – Perfil de convergência obtido a partir dos parâmetros de Guo, Liu e Zhu (2021)



Fonte: o autor (2023).

6.3 VERIFICAÇÃO COM SOLUÇÃO ANALÍTICA EM ELASTOPLASTICIDADE

Outro estudo considerado para a realização da verificação do modelo computacional desenvolvido no presente trabalho relaciona-se à comparação com os resultados da solução analítica desenvolvida por Ma *et al.* (2020). Estes autores propuseram um método analítico, verificado por solução numérica com o emprego do *software* FLAC3D, para a determinação das zonas de plastificação ao redor de túneis gêmeos circulares profundos sem revestimento, restringindo-se ao caso que não há sobreposição entre as duas zonas plásticas.

Neste caso, adotaram o modelo constitutivo elástico perfeitamente plástico para o maciço homogêneo e isotrópico, com o critério de Mohr-Coulomb para a superfície de escoamento. Além disso, realizaram estudos paramétricos para a compreensão da influência do afastamento entre os túneis gêmeos, da coesão, do ângulo de atrito interno e das tensões verticais e horizontais atuantes na forma e profundidade das zonas plásticas.

De acordo com Ma *et al.* (2020), o reconhecimento da zona plástica ao redor do túnel fornece um embasamento teórico relevante para a definição e concepção do suporte. Ademais, mencionam que uma zona plastificada excessiva afeta significativamente a estabilidade e a

funcionalidade de um túnel. Logo, a delimitação da zona plástica no entorno de túneis é de grande importância para o desenvolvimento dos projetos.

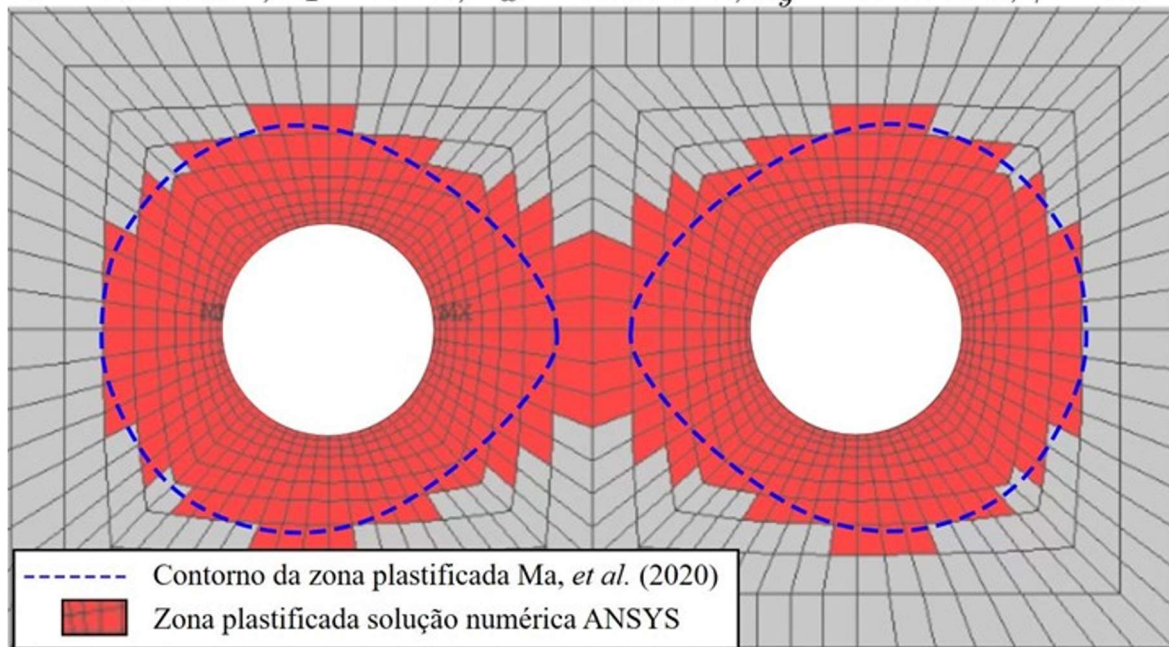
Na solução analítica desenvolvida por Ma *et al.* (2020) são adotadas algumas hipóteses simplificativas, que são: deformação plana em um domínio infinito, a tensão normal σ_z ao longo do eixo do túnel é considerada a tensão principal média, a tensão tangencial (σ_θ) é considerada a tensão principal máxima, a tensão radial (σ_r) é considerada a tensão principal mínima e a tensão de cisalhamento na zona plástica é igual a zero.

Diante das análises paramétricas realizadas por Ma *et al.* (2020), pode-se concluir que a influência do afastamento entre os túneis se concentra principalmente na região do maciço entre estes. No caso de tensões horizontais e verticais iguais, as zonas plásticas tendem ao formato circular, conforme a distância entre os túneis aumenta. Entretanto, para tensões desiguais, as regiões plásticas se aproximam mais de uma forma oval, tendendo a se tocarem, conforme o afastamento entre os túneis reduz. Logo, quanto maior for o afastamento entre os túneis, mais distantes estarão uma zona plástica da outra.

Em relação à coesão, Ma *et al.* (2020) destacam que quanto menor for este valor, maior será a dimensão das zonas plásticas. Caso o valor da coesão seja muito pequeno, as zonas plastificadas ficaram unidas (Figura 61). Por outro lado, para valor de coesão excessivamente grande, a delimitação da região plástica praticamente equivale ao limite da seção do túnel (contorno), aproximando-se de uma forma circular (Figura 62).

Figura 61 – Comparativo de resultados de zonas plásticas: presente trabalho x Ma *et al.* (2020)

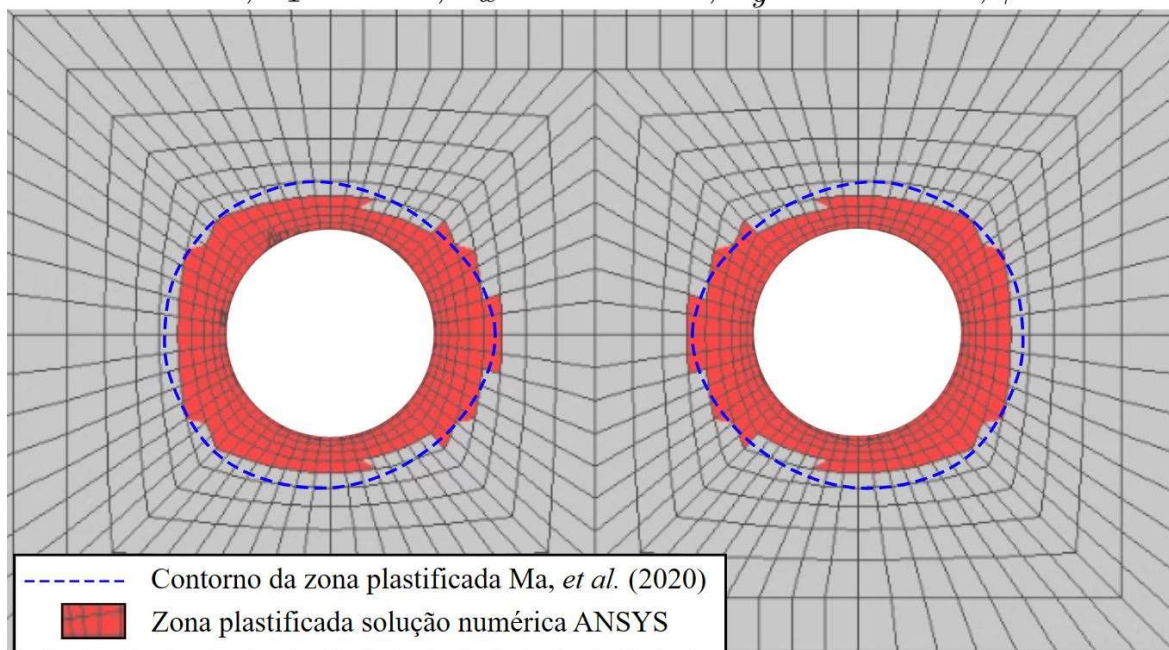
$$c = 2,5 \text{ MPa}, d_1 = 5 \text{ m}, \sigma_x = 30 \text{ MPa}, \sigma_y = 30 \text{ MPa}, \phi = 30^\circ$$



Fonte: o autor (2023).

Figura 62 – Comparativo de resultados de zonas plásticas: presente trabalho x Ma *et al.* (2020)

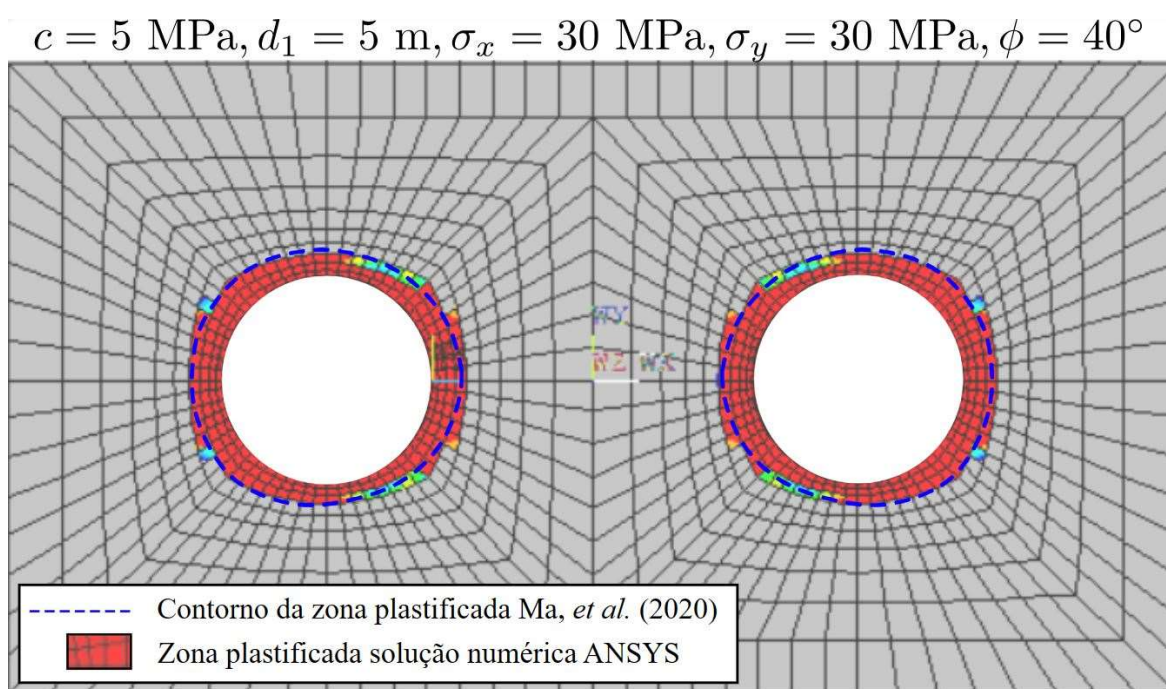
$$c = 5 \text{ MPa}, d_1 = 5 \text{ m}, \sigma_x = 30 \text{ MPa}, \sigma_y = 30 \text{ MPa}, \phi = 30^\circ$$



Fonte: o autor (2023).

Quando se referem ao ângulo de atrito interno, Ma *et al.* (2020) destacam a existência de zonas plásticas maiores quando o valor do ângulo de atrito é menor, ou seja, as zonas tendem a se aproximar e ficar unidas (Figura 62). Porém, quanto maior for o ângulo de atrito, menores serão as zonas plásticas e estas tendem ao formato circular (Figura 63). Logo, percebe-se que a influência do ângulo de atrito nas zonas plásticas dos túneis é semelhante ao caso da coesão.

Figura 63 – Comparativo de resultados de zonas plásticas: presente trabalho x Ma *et al.* (2020)

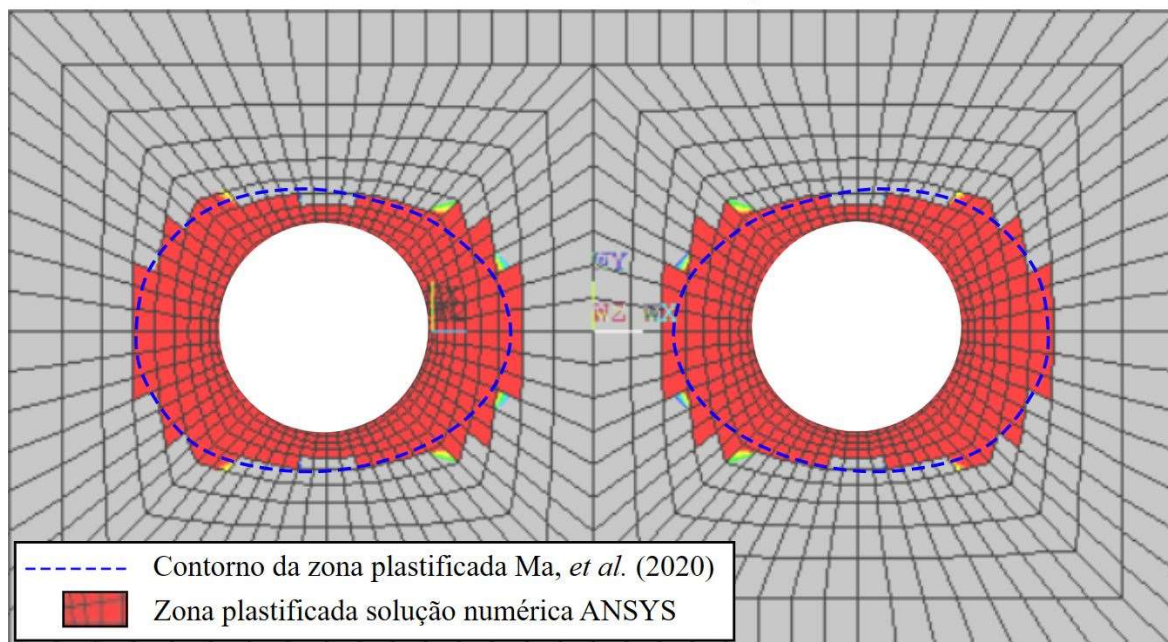


Fonte: o autor (2023).

Outra análise relevante refere-se às tensões horizontais e verticais. Mantendo-se a tensão horizontal σ_x constante (30 MPa) e variando a tensão vertical σ_y , percebe-se que ao aumentar σ_y as zonas plásticas encolhem na direção vertical e se expandem ao longo da direção horizontal, ocorrendo a aproximação entre as zonas plásticas na região do maciço entre os túneis (Figura 64). Entretanto, no caso em que a tensão vertical σ_y se mantém constante (30 MPa) e a tensão horizontal σ_x sofre variação, observa-se que, conforme se aumenta o valor de σ_x , as zonas plastificadas tendem a aumentar na direção vertical, enquanto as laterais relacionadas às extremidades externas dos túneis tendem a se aproximar das bordas de cada túnel e as laterais da região do maciço entre os túneis tendem a se afastar das bordas, conforme Figura 65 (MA *et al.*, 2020).

Figura 64 – Comparativo de resultados de zonas plásticas: presente trabalho x Ma *et al.* (2020)

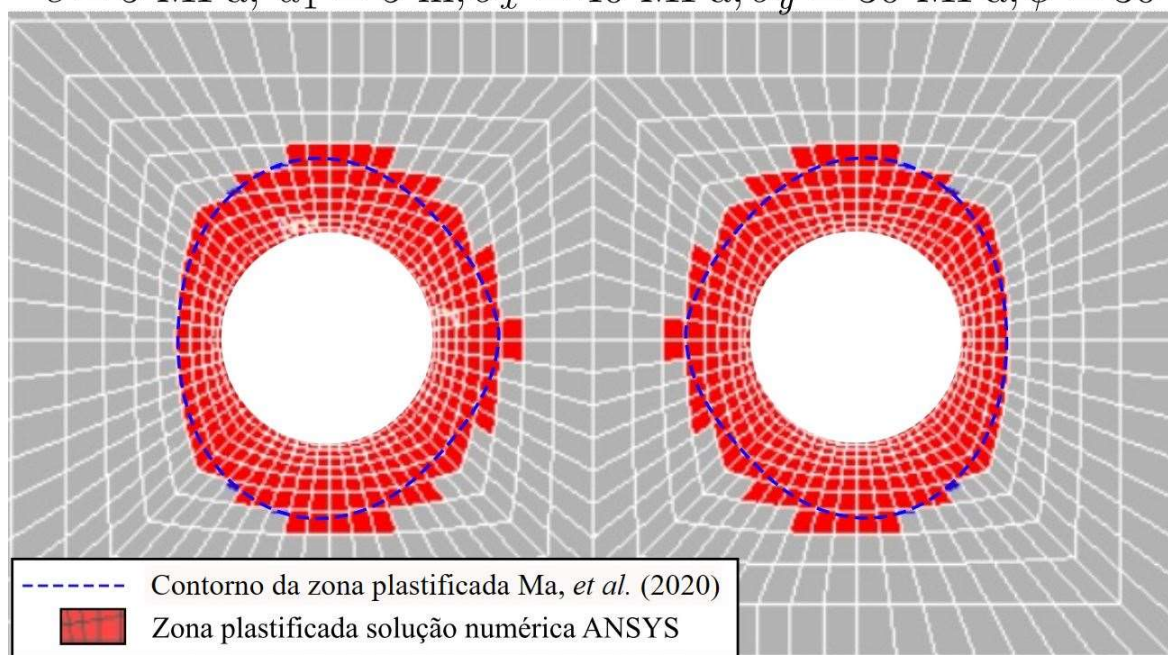
$$c = 5 \text{ MPa}, d_1 = 5 \text{ m}, \sigma_x = 30 \text{ MPa}, \sigma_y = 40 \text{ MPa}, \phi = 30^\circ$$



Fonte: o autor (2023).

Figura 65 – Comparativo de resultados de zonas plásticas: presente trabalho x Ma *et al.* (2020)

$$c = 5 \text{ MPa}, d_1 = 5 \text{ m}, \sigma_x = 40 \text{ MPa}, \sigma_y = 30 \text{ MPa}, \phi = 30^\circ$$

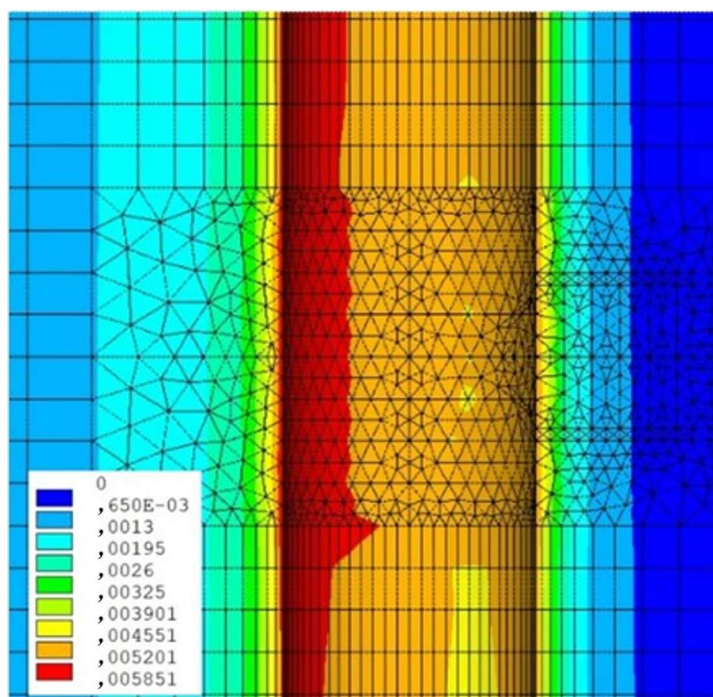


Fonte: o autor (2023).

Portanto, a relação de magnitude entre as tensões horizontais σ_x e as tensões verticais σ_y possuem influência relevante sobre o formato das zonas plásticas. Quando $\sigma_y > \sigma_x$, a forma da região plastificada se aproxima de uma elipse com dimensões diferentes ao longo da direção horizontal (Figura 64). Entretanto, quando $\sigma_x > \sigma_y$, a forma se aproxima a de um triângulo de arestas curvas com três saliências (Figura 65) (MA *et al.*, 2020).

Mesmo que Ma *et al.* (2020) não tenham avaliado os resultados em termos dos deslocamentos totais, levando em consideração a verificação realizada no *software* ANSYS para gerar os resultados das zonas plastificadas para comparação com o trabalho de referência, optou-se por analisar o resultado da convergência de malha diante do domínio discretizado para a referida pesquisa de túneis gêmeos profundos com galerias transversais. Logo, a partir da Figura 66, relacionada a uma vista inferior do túnel longitudinal, observa-se que o campo de deslocamentos segue a tendência sem apresentar distorções significativas, embora haja a mudança do tipo de elementos finitos aplicados na região da galeria transversal prevista no domínio desenvolvido.

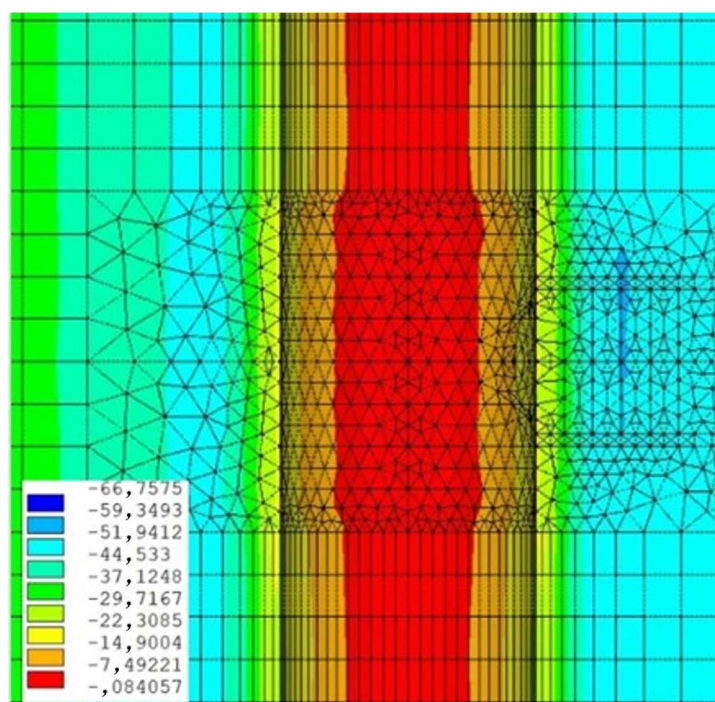
Figura 66 – Somatório de deslocamentos em metros obtido a partir dos parâmetros de Ma *et al.* (2020)



Fonte: o autor (2023).

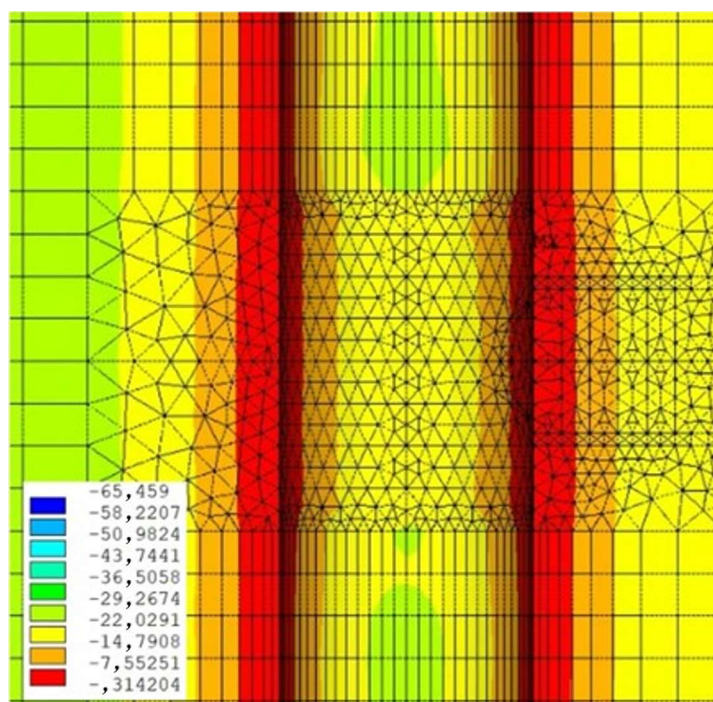
Além disso, constata-se nas Figuras 67 a 69, uma suavidade coerente na delimitação de cada região atribuída às faixas de tensões, o que expressa boa discretização do domínio através do refinamento da malha empregado, mesmo havendo a transição entre diferentes elementos finitos na região da galeria transversal no domínio adotado. Desse modo, não se percebe grandes distorções nos campos de tensões capazes de comprometer os resultados. Esta condição de admissibilidade pode ser confirmada pelos bons resultados obtidos na reprodução das zonas plastificadas pelo método numérico desenvolvido no presente trabalho quando em comparação com os resultados da solução analítica desenvolvida por Ma *et al.* (2020).

Figura 67 – Campo de tensões ortorradiais em MPa obtido a partir dos parâmetros de Ma *et al.* (2020)



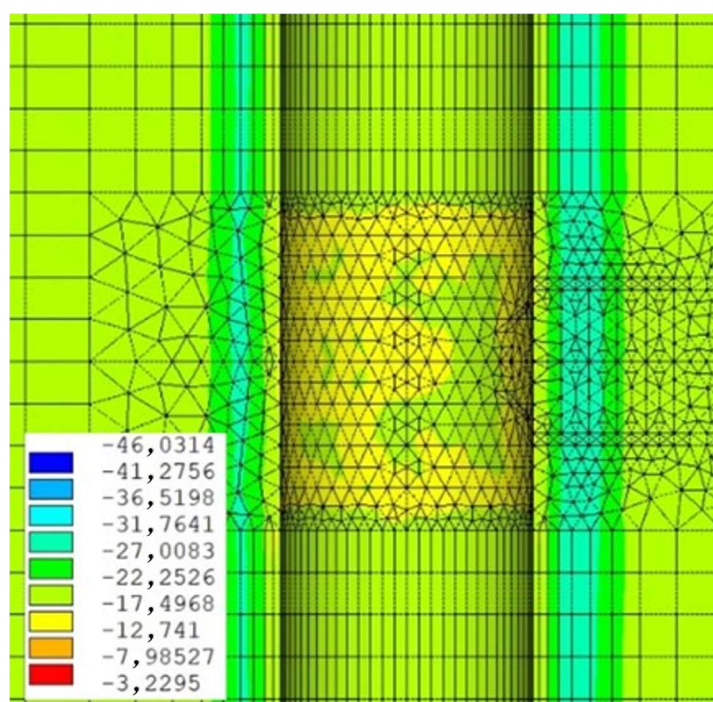
Fonte: o autor (2023).

Figura 68 – Campo de tensões radiais em MPa obtido a partir dos parâmetros de Ma *et al.* (2020)



Fonte: o autor (2023).

Figura 69 – Campo de tensões na direção z em MPa obtido a partir dos parâmetros de Ma *et al.* (2020)



Fonte: o autor (2023).

7 ANÁLISES PARAMÉTRICAS COM DIVERSAS LEIS CONSTITUTIVAS

No seguinte estudo, serão considerados para o maciço os modelos constitutivos elástico, elastoplástico, viscoplástico e elastoplástico-viscoplástico. Para a componente elastoplástica será considerado o modelo de von-Mises inscrito em Tresca com regra de fluxo associada sem endurecimento/amolecimento e para a componente viscoplástica é considerado o modelo de Perzyna com a mesma superfície da elastoplasticidade.

Para o revestimento serão empregados os modelos constitutivos elástico e viscoelástico. De acordo com Quevedo *et al.* (2018), os parâmetros viscoelásticos são ajustados às formulações do CEB-FIP MC90 (CEB, 1993) a partir da Teoria da Solidificação de Bazant e Prasannan (1989a, 1989b). Embora os fenômenos de fluência e de retração do concreto sejam subordinados ao histórico de umidade e de temperatura do revestimento ao longo do tempo, neste estudo assume-se umidade e temperatura constantes. Além disso, vale destacar que a formulação de CEB-FIP MC90 (CEB, 1993) estabelece um limite de 40% da resistência média à compressão do concreto para as tensões no revestimento, assegurando a validade da hipótese do princípio da superposição dos efeitos. Apesar desta ressalva, não serão feitas análises de tensões no interior do revestimento.

A partir de estudos realizados com modelos axissimétricos buscou-se a identificação do incremento de tempo fundamental para os modelos constitutivos viscosos, que dependem do tempo, de modo a alcançar a convergência e a precisão da solução numérica. Nas análises dependentes do tempo, adotou-se o esquema de integração semi-implícito. Com esse esquema de integração constatou-se que o incremento de tempo máximo recomendado por Corneau (1975) e adotado por Quevedo (2021) (ver equações 57 e 58) poderia ser maior sem comprometer a convergência e precisão da solução. Portanto, foi adotado um incremento de tempo máximo (Δt_{lim}) de 50 dias.

Análises em axissimetria também ajudaram a estabelecer o tempo limite no longo prazo, a partir do qual os efeitos viscosos têm pouca relevância. Esse tempo foi calculado como sendo aquele em que o incremento de deslocamento entre intervalos de tempo fosse menor que 1×10^{-8} . Após esses cálculos viu-se que um tempo limite no longo prazo de 3000 dias após a escavação do túnel seria mais que suficiente para todas as análises. A rigor, esse tempo característico dependerá dos parâmetros do maciço e do revestimento.

Os resultados obtidos, juntamente com os parâmetros adotados, serão apresentados na sequência. Neste estudo paramétrico, utilizou-se diferentes modelos constitutivos com propriedades constantes, variando a distância entre os túneis longitudinais. Assim, são apresentados os resultados mais relevantes relacionados à amplitude e à extensão da perturbação no perfil de convergência do túnel longitudinal devido à intersecção com a galeria. Os tempos de processamento de todas as análises realizadas estão apresentados no Apêndice A.

7.1 PARÂMETROS ADOTADOS PARA A REALIZAÇÃO DAS ANÁLISES

Para o desenvolvimento das análises do presente estudo, emprega-se alguns dos parâmetros adotados no trabalho realizado por Piepi (1995), conforme indicado na Tabela 3. Trata-se de parâmetros relacionados principalmente ao maciço, que permitem a devida implementação dos diferentes modelos constitutivos, incluindo as propostas em elasticidade, elastoplasticidade, viscoplasticidade e plasticidade-viscoplasticidade.

Tabela 3 – Parâmetros constitutivos do maciço e condições de contorno

	PARÂMETROS	ABREVIATURA	UNIDADE	VALORES
MACIÇO	Módulo de Elasticidade do maciço	E1	MPa	1500
	Coefficiente de Poisson do maciço	nu1	adm	0,498
	Coesão	c	MPa	$4 * \frac{\sqrt{3}}{2}$
	Coesão viscoplástica	cvp	MPa	$2 * \frac{\sqrt{3}}{2}$
	Expoente do modelo de Perzyna	n1	adm	1
	Constante de viscosidade dinâmica	eta	dia	4*10000
	Valor de referência	f0	MPa	1
CONDIÇÕES DE CONTORNO				
	Tensões geostáticas-hidroestáticas		MPa	9

Fonte: o autor (2023).

Além dos parâmetros provenientes de Piepi (1995), identifica-se, na Tabela 4, os valores relativos à geometria do domínio, definidos a partir do estudo da convergência de malha e da discretização do domínio realizados previamente. Também são apresentados os parâmetros relacionados à escavação e à instalação do revestimento, levando em consideração os túneis longitudinais e a galeria transversal.

Tabela 4 – Parâmetros relacionados à geometria do domínio, à escavação e à instalação do revestimento

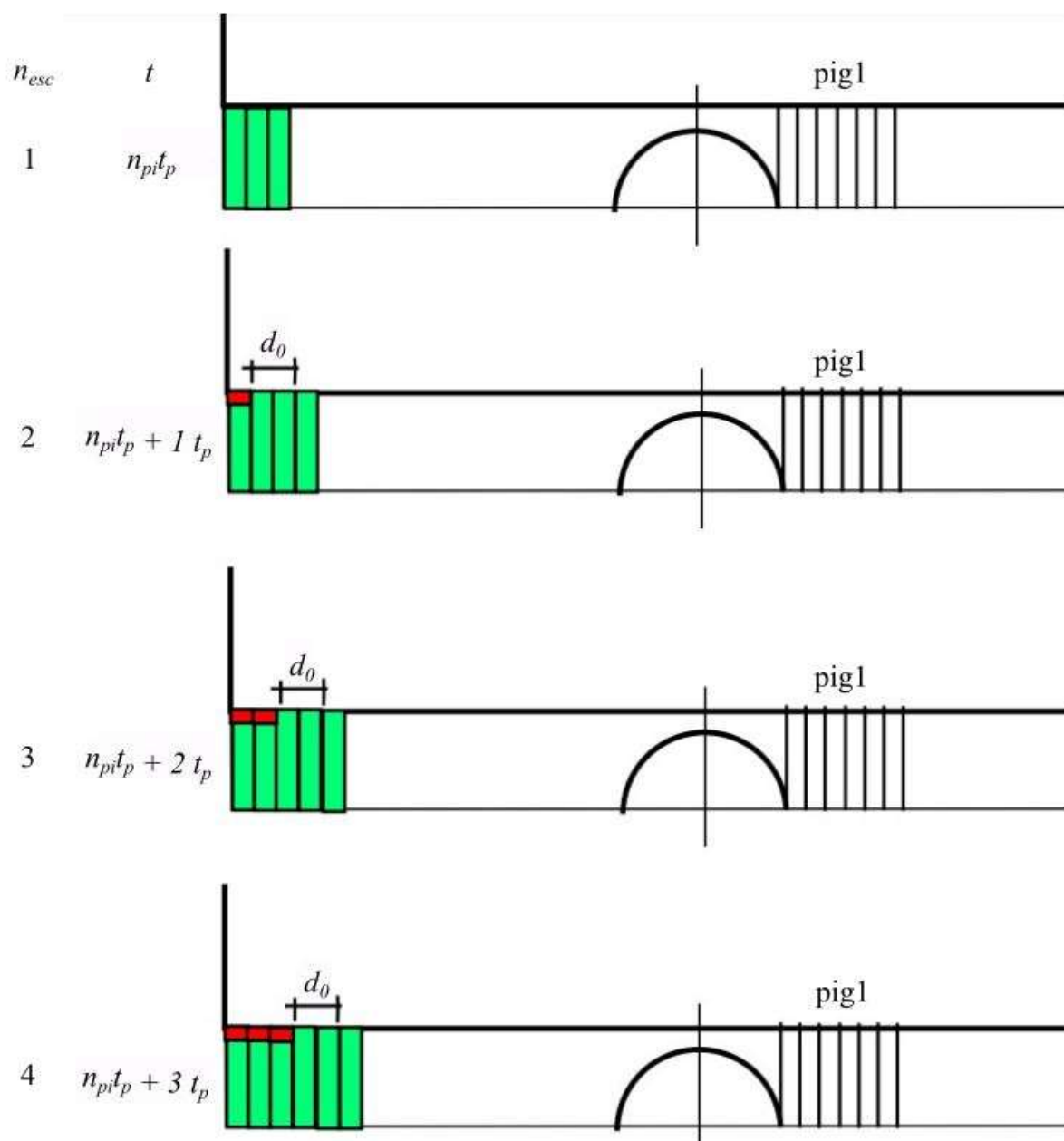
	PARÂMETROS	ABREVIATURA	UNIDADE	VALORES		
	PARÂMETROS GEOMÉTRICOS					
túneis longitudinais	Raio da interface entre o túnel e o maciço	Re	m	1		
	Espessura do revestimento (quando aplicável)	esp	m	0,1		
	Comprimento do passo de escavação	Lp	m	1/3*Re		
	Número de passos que representam a dimensão não suportada	nd0	Lp	2		
	Número de passos escavados na primeira escavação	npi	Lp	3		
	Velocidade do passo de escavação	Vp	m/dia	12,5		
	Tempo para fazer um passo de escavação nos tuneis longitudinais	tp	dia	$\frac{Lp}{Vp}$		
galerias	Raio externo da galeria (múltiplo de Lp)	Re1	m	2*Lp		
	Espessura do revestimento	esp1	m	0,1		
	Passo de escavação das galerias transversais*	Lp1	m	0,3Re1	0,3214Re1	0,3387Re1
	Dimensão não suportada	nd01	Lp1	2		
	Número de passos escavados na primeira escavação	np1	un	3		
	Velocidade do passo de escavação	Vp1	m/dia	12,5		
	Nº passos de escavação após a galeria p/ iniciar a escavação da galeria	pig1	Lp	15		
domínio	Comprimento do trecho não escavado	l1	Re	10		
	Comprimento do trecho escavado	l2	Lp	100		
	Altura do domínio	d3	Re	20		
	Distância das bordas laterais do domínio até o eixo do túnel longitudinal	d4	Re	20		
	Distância entre os eixos dos túneis longitudinais	d1	Re	4	8	16
	distância do revestimento instalado em relação à frente de escavação	d0	Lp	2		

***Lp1 deve ter uma medida que se tenha n passos inteiros em d1-2*Re**

Fonte: o autor (2023).

Assim, a Figura 70 ilustra a representação da evolução do processo de avanço da frente de escavação (elementos hachurados em verde) e da instalação do revestimento (elementos hachurados em vermelho). Vale destacar que n_{esc} representa o número da escavação, t o tempo da análise e $pig1$ representa um valor adotado de $15Lp$, para todas as análises, escolhido de modo que a frente de escavação do túnel longitudinal tivesse uma influência pequena sobre a galeria.

Figura 70 – Diagrama representativo do processo de avanço da frente de escavação e da instalação do revestimento



Fonte: o autor (2023).

Por fim, na Tabela 5, expressa-se os parâmetros do revestimento empregado nas análises, contemplando os valores a serem utilizados nos modelos elástico e viscoelástico, de acordo com as características e definições da análise proposta.

Tabela 5 – Parâmetros constitutivos do revestimento

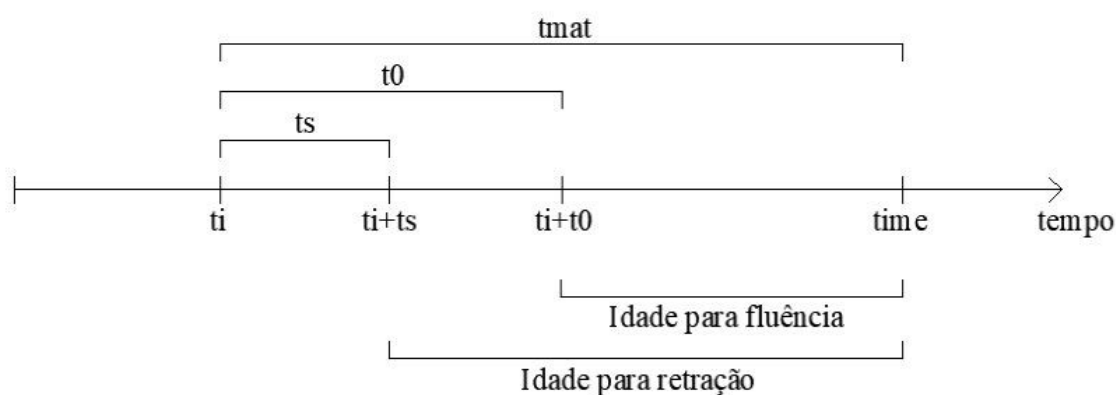
	PARÂMETROS	ABREVIATURA	UNIDADE	VALORES
PARÂMETROS DO REVESTIMENTO				
elasticidade	Resistência característica do concreto à compressão	fck	MPa	20
	Resistência média do concreto à compressão	fcm	MPa	fck + 8
	Módulo de Elasticidade aos 28 dias*	E2	MPa	$21500 * \left(\frac{fcm}{10}\right)^{\frac{1}{3}} = 30.303$
	Coefficiente de Poisson	nu2	adm	0,3
viscoelasticidade	Resistência característica do concreto à compressão	fck	MPa	20
	Coefficiente que depende do tipo de concreto	s	adm	0,2
	Tempo da análise a partir do qual o revestimento passa a existir	ti	dias	variável
	Umidade relativa do ambiente	rh	%	70
	Espessura ficticia (QUEVEDO, 2017)	hf	m	$\frac{(R_e^2 - (R_e - esp)^2)}{(R_e - esp)}$
	Espessura ficticia da galeria (QUEVEDO, 2017)	hf1	m	$\frac{(R_{e1}^2 - (R_{e1} - esp1)^2)}{(R_{e1} - esp1)}$
	Idade do concreto no início da secagem	ts	dias	7
	Idade do concreto no início do carregamento	t0	dias	1
	Tempo final da análise	tin	dias	3000
	Coefficiente que depende do tipo de cimento	betasc	adm	8
Temperatura	temperatura	°C	20	
Efeito do tipo de cimento durante a cura	alpha	adm	1	

*Valor módulo de elasticidade do revestimento se altera no tempo nos modelos viscoelástico conforme CEB-FIP MC90

Fonte: o autor (2023).

Logo, t_i é o tempo da análise a partir da qual o revestimento passa a existir. Através deste tempo, conforme a análise avança no tempo, calcula-se as idades referentes ao fenômeno da fluência e retração, conforme a Figura 71, sendo t_{mat} a idade do material.

Figura 71 – Diagrama de tempo das idades do material para o modelo viscoelástico



Fonte: RACHINHAS (2020).

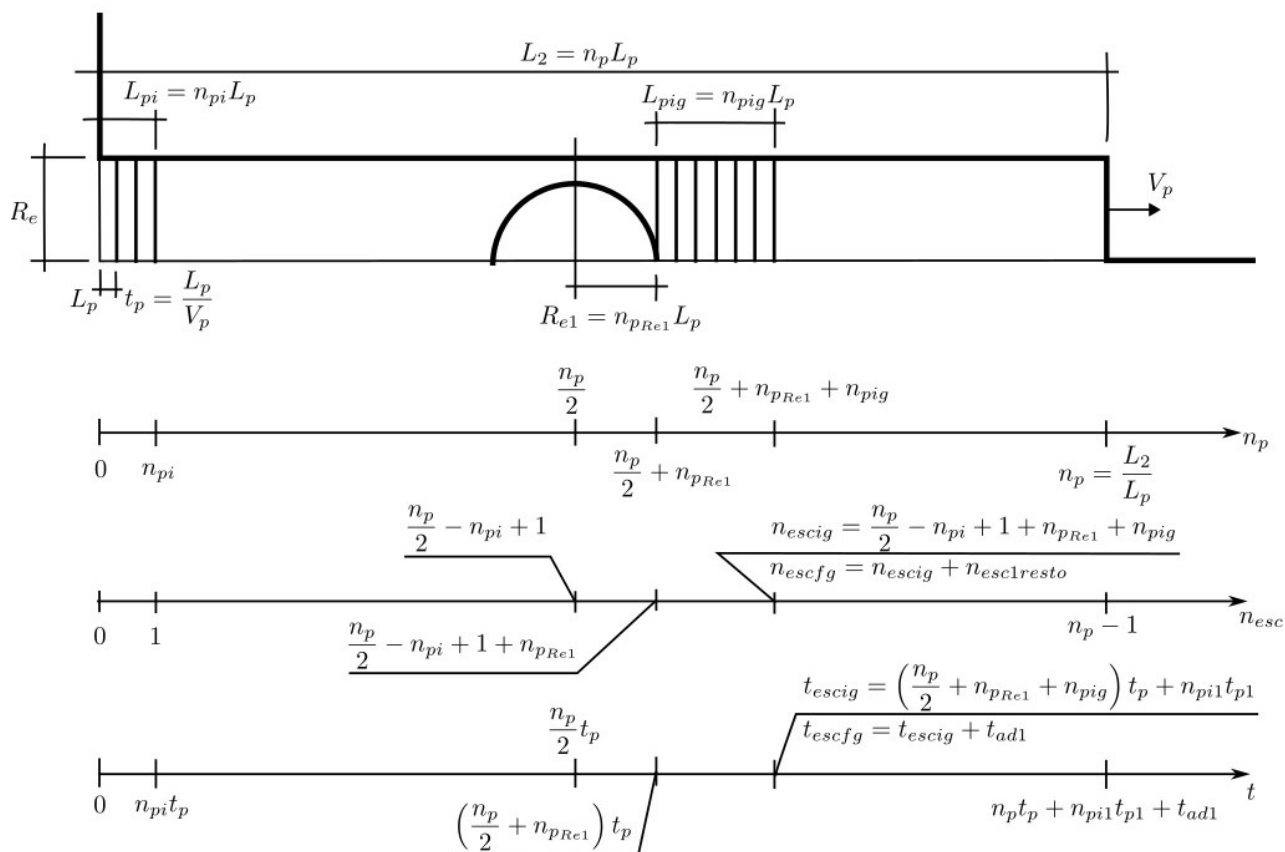
De modo a auxiliar a compreensão do procedimento referente ao avanço da frente de escavação e de instalação do revestimento no túnel longitudinal e na galeria, conforme consta no *script* utilizado nas análises executadas no *software* ANSYS, para que seja possível identificar o tempo relacionado com o respectivo passo de escavação e o número de escavações realizado em cada momento da solução numérica, apresenta-se a Figura 72 e a Figura 73, associadas aos túneis longitudinais e à galeria transversal respectivamente. Além disso, mostra-se na Tabela 6 os parâmetros envolvidos nos referidos diagramas.

Tabela 6 – Parâmetros dos diagramas representativos do número de passos de escavação, número de escavações e tempos relacionados

	PARÂMETROS	ABREVIATURA
PASSO	Número de passos de escavação no túnel	np
	Número de passos de escavação na galeria	np1
	Número de passos escavados na primeira escavação do túnel	mpi
	Número de passos escavados na primeira escavação da galeria	mpi1
	Número de passos de escavação no túnel em relação a região correspondente ao raio da galeria	npRe1
	Número de passos escavados no túnel após a galeria para o início da escavação da galeria	npig
	Comprimento do passo de escavação no túnel	Lp
	Comprimento do passo de escavação na galeria	Lp1
	Comprimento do passo de escavação na primeira escavação do túnel	Lpi
	Comprimento escavado no túnel após a galeria para o início da escavação da galeria	Lpig
ESCAVAÇÃO	Total de escavações ao longo do eixo do tunel longitudinal	nesc
	Total de escavações ao longo do eixo da galeria	nesc1
	Número da escavação correspondente ao início da galeria	nescig
	Número da escavação correspondente ao final da galeria	nescfg
	Números de escavações restantes para concluir a escavação da galeria	nesc1resto
TEMPO	Tempo de escavação	t
	Tempo para fazer um passo de escavação nos tuneis longitudinais	tp
	Tempo para fazer um passo de escavação na galeria transversal	tp1
	Tempo correspondente na escavação referente ao início da galeria	tescig
	Tempo correspondente na escavação referente ao final da galeria	tescfg
	Tempo adicional correspondente ao tempo de escavação da galeria deduzido o tempo da 1ª escavação	tad1
GEOMETRIA	Raio da interface entre o túnel e o maciço	Re
	Raio externo da galeria	Re1
	Comprimento do trecho escavado no túnel	L2
	Comprimento do trecho escavado na galeria	L2g
	Velocidade do passo de escavação no túnel	Vp
	Velocidade do passo de escavação na galeria	Vp1
	Distância entre eixos dos túneis longitudinais	d1

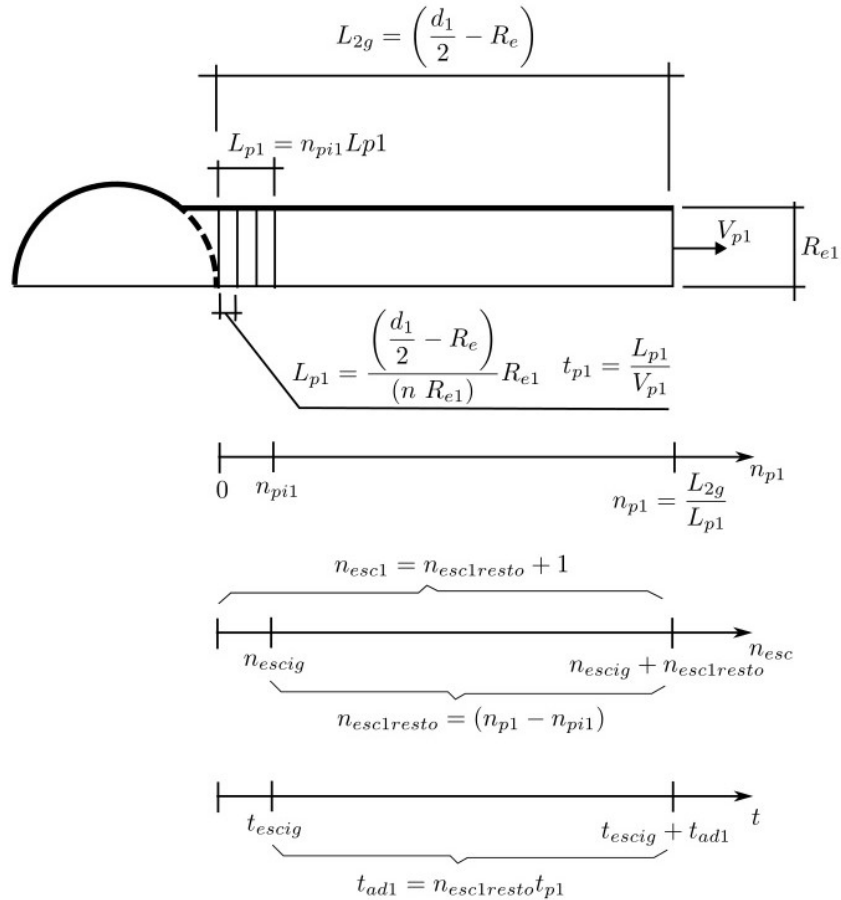
Fonte: o autor (2023).

Figura 72 – Diagrama representativo do número de passos de escavação, número de escavações e tempos relacionados: túneis longitudinais



Fonte: o autor (2023).

Figura 73 – Diagrama representativo do número de passos de escavação, número de escavações e tempos relacionados: galeria transversal



Fonte: o autor (2023).

Para a apresentação das análises do presente estudo destaca-se que U_{eq} indicado nas legendas das figuras 81 a 86 e das figuras 88 a 95 refere-se ao valor da convergência no patamar do perfil de convergências fora da região de influência da galeria, correspondendo a $x/R_e = -25$, e o maior valor de convergência da região da galeria (U_{pico}) encontra-se indicado no próprio perfil. Além disso, faz-se necessário o destaque de alguns pontos importantes, conforme indicado abaixo.

- **Observação 1:** *Monitoramento da convergência do túnel*

Todos os resultados apresentados nas análises a seguir referem-se ao ponto localizado no topo da seção do túnel (coroa), cuja convergência será acompanhada ao longo do processo de escavação. Esse ponto está indicado na Figura 74. Da mesma forma, apenas a convergência do ponto localizado na coroa da galeria será analisada.

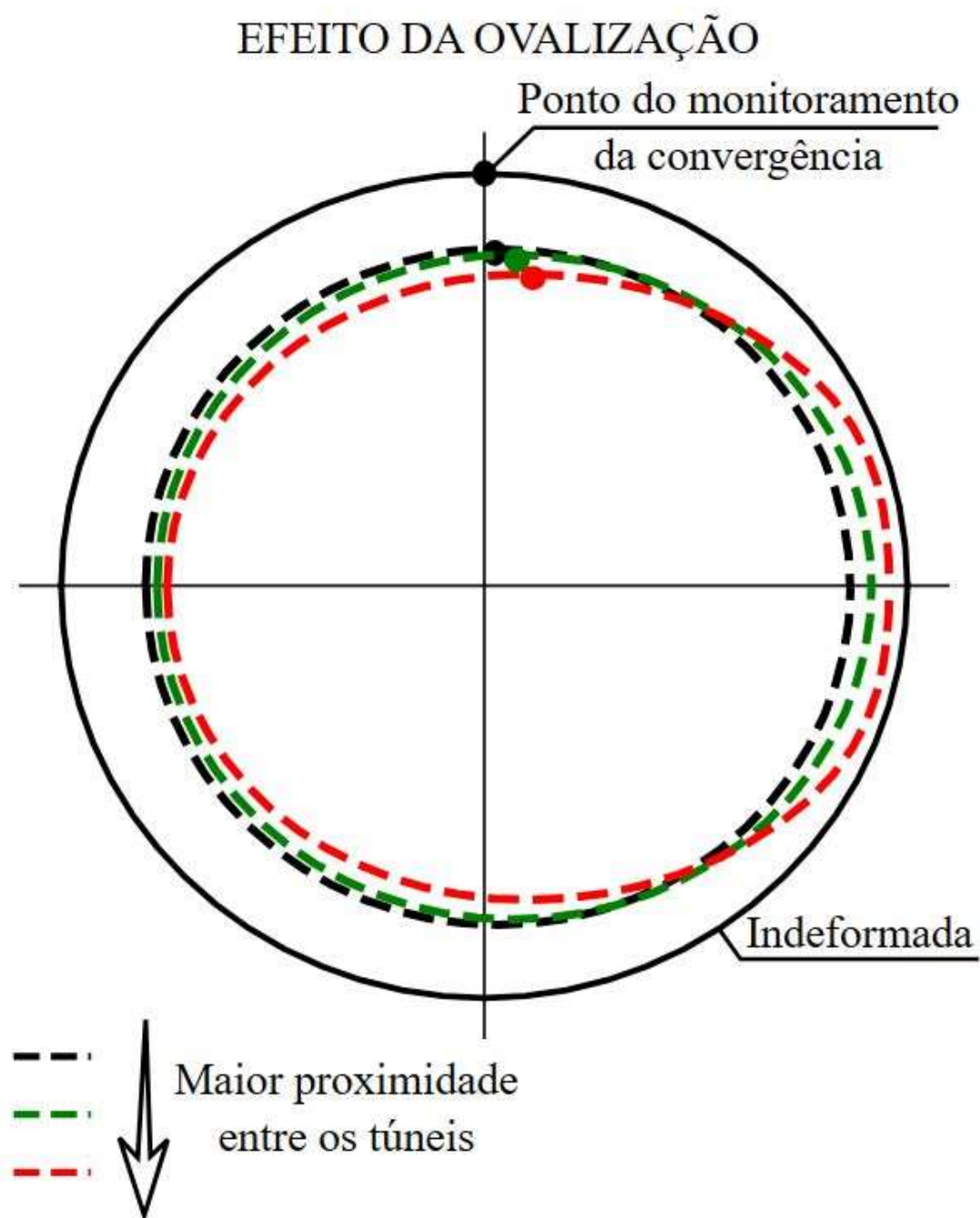
- **Observação 2:** *Ovalização da seção do túnel*

Nas condições de isotropia material e do estado de tensões iniciais, a simetria da parede do túnel é preservada ao longo do processo de escavação. Assim, a parede do túnel deformado permanece circular. Por outro lado, um dos efeitos da interação mútua induzida pela proximidade dos túneis é a perda de simetria da deformada da parede do túnel, como ilustrado na Figura 74. Neste contexto, o ponto escolhido para acompanhar as convergências (na coroa) não é representativo de toda a deformação da parede do túnel.

- **Observação 3:** *Configuração das deformações no maciço*

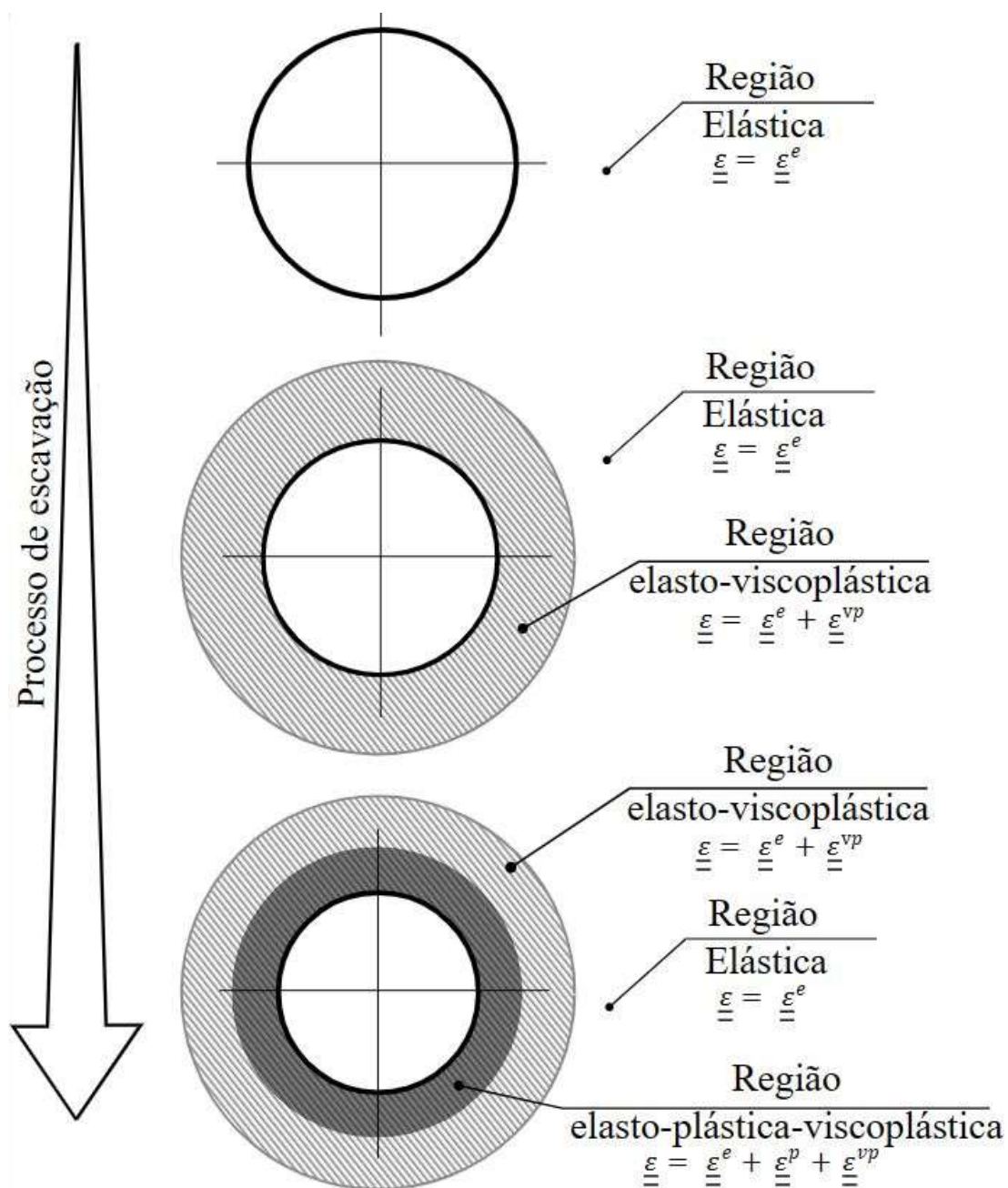
Referindo-se às propriedades materiais indicadas na Tabela 3, o valor adotado para a coesão plástica (c) é superior ao valor da coesão viscoplástica (c_{vp}): $c > c_{vp}$. Isto implica que no regime das deformações irreversíveis, a viscoplasticidade do material será ativada primeiro. Ao longo do processo de escavação, deformações viscoplásticas aparecerão sem plastificação do maciço. As configurações genéricas das zonas em deformação do maciço ao longo do processo de escavação estão ilustradas na Figura 75.

Figura 74 – Ilustração da localização do ponto do monitoramento da convergência na seção transversal e representação do fenômeno de ovalização



Fonte: o autor (2023).

Figura 75 – Configurações esperadas para as zonas com deformações irreversíveis no maciço

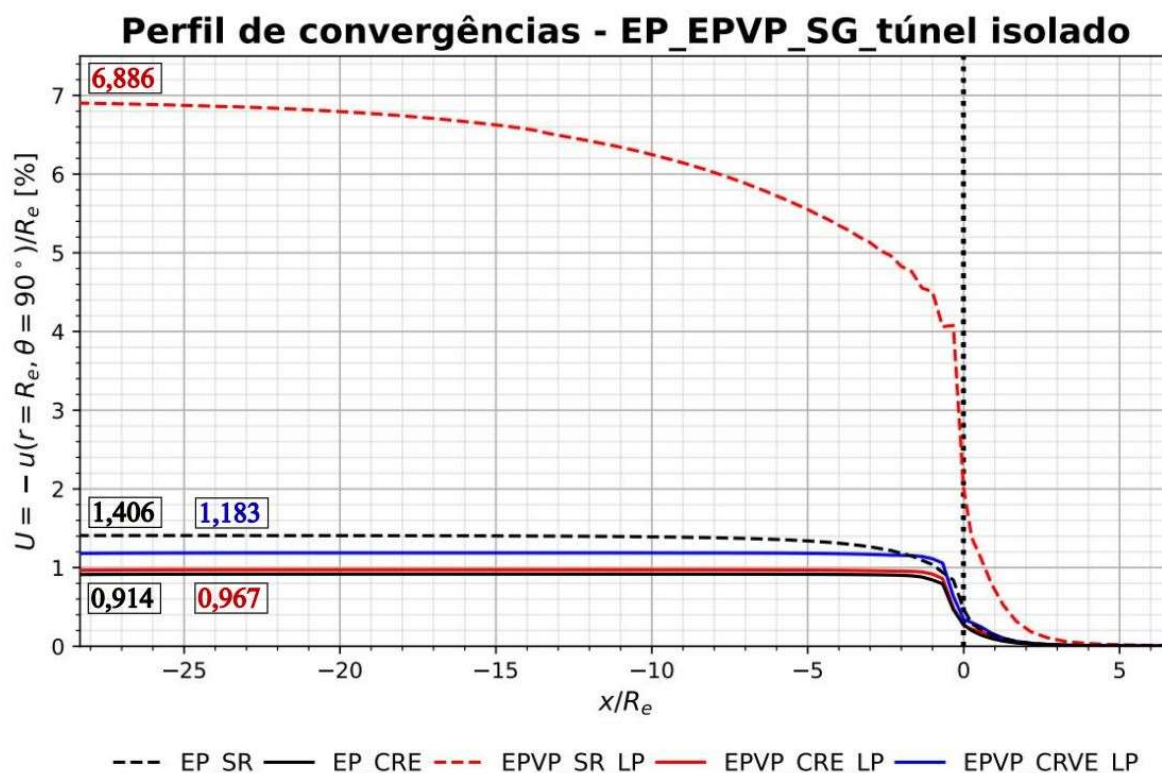


Fonte: o autor (2023).

7.2 ANÁLISES DO PERFIL DE CONVERGÊNCIA COMPARANDO COM TÚNEL ISOLADO

Esse primeiro estudo procura evidenciar o comportamento dos efeitos físicos na estrutura do túnel isolado, sem a presença de túnel paralelo (gêmeo) e de galeria transversal, considerando a ausência de revestimento de forma intencional para destacar, exclusivamente, os efeitos exacerbados no perfil de convergências do túnel que são atenuados pelo desempenho do revestimento, quando adotado, mais especificamente pela sua rigidez. Desse modo, apresenta-se na Figura 76 as comparações para os casos com maciço elastoplástico (EP) sem revestimento (SR) e com revestimento elástico (CRE), além do maciço elastoplástico-viscoplástico (EPVP) sem revestimento (SR) e com revestimentos elástico (CRE) e viscoelástico (CRVE), todos considerando a condição no final dos efeitos viscosos (longo prazo - LP).

Figura 76 – Perfil de convergências do túnel isolado sem galeria transversal: comparativo sem revestimento e com revestimentos elástico e viscoelástico



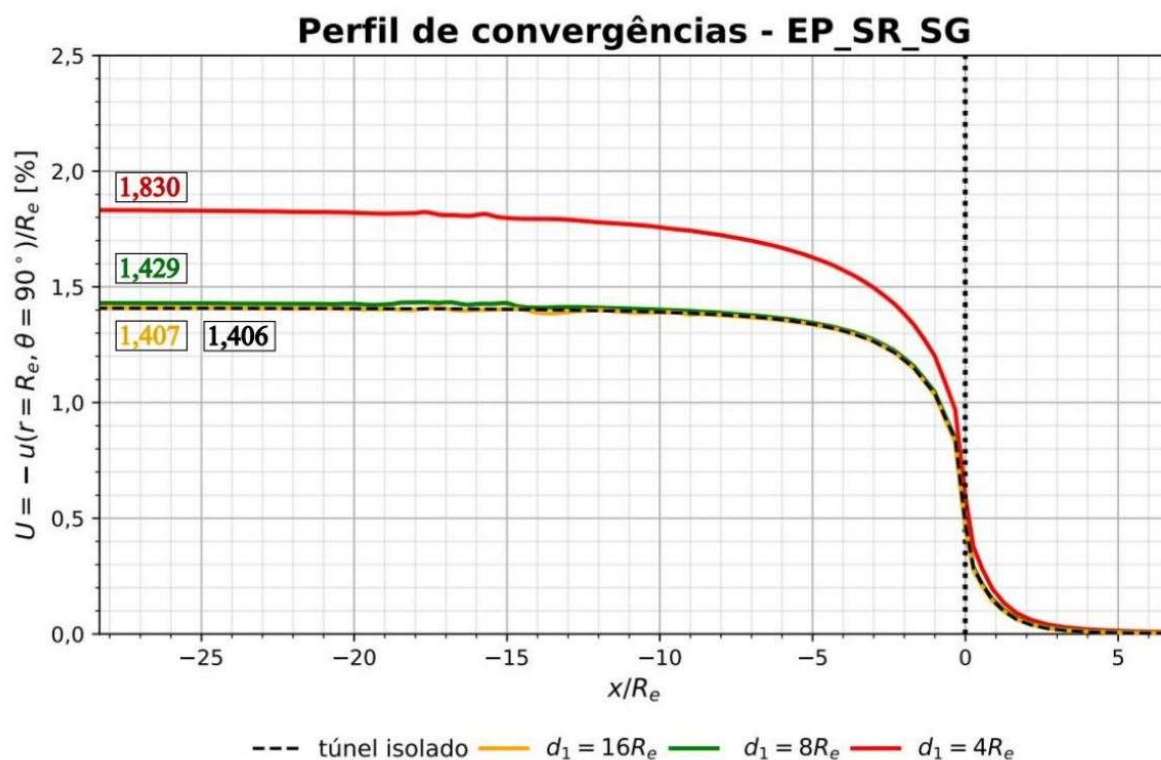
Fonte: o autor (2023).

Observa-se que a presença de revestimento de rigidez relativamente alta, como é o caso deste estudo (conforme Equação 60), tende a atenuar significativamente o desenvolvimento da

convergência, resultando em uma redução de aproximadamente 35%, quando se aplica o revestimento elástico no maciço elastoplástico (EP) sem revestimento (SR). Do mesmo modo, há uma redução próxima de 86% e de 83%, quando se aplica o revestimento elástico (CRE) e o revestimento viscoelástico (CRVE), respectivamente, no maciço elastoplástico-viscoplástico (EPVP) sem revestimento (SR). Logo, pode-se inferir, a partir da Figura 76, que o revestimento, dependendo do valor de rigidez adotado, influencia de forma considerável no perfil de convergências. Além disso, percebe-se que os efeitos viscosos provenientes do revestimento viscoelástico (CRVE) permitem o desenvolvimento da convergência, embora haja a restrição da presença do revestimento, devido a sua rigidez. Assim, o revestimento viscoelástico (CRVE) implica em um acréscimo de aproximadamente 22%, quando comparado ao revestimento elástico (CRE).

Outra abordagem inicial relevante, que precisa ser destacada, relaciona-se à interferência da distância entre os túneis longitudinais (d_1), de eixo a eixo da seção circular, no perfil de convergências. Para isso, considera-se o estudo aplicado sem revestimento (SR) e sem a presença de galeria transversal (SG), exemplificado pelo maciço elastoplástico (EP), de modo a evidenciar, puramente, o efeito da proximidade entre os túneis longitudinais, tomando-se como referência o túnel isolado. Assim, apresenta-se na Figura 77 a comparação do perfil de convergências em diferentes cenários, assumindo-se distâncias de afastamento equivalentes a 16 raios, 8 raios e 4 raios, onde o raio refere-se à seção circular do túnel longitudinal.

Figura 77 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos sem revestimento e sem galeria transversal: comparativo de distância entre os túneis para maciço elastoplástico



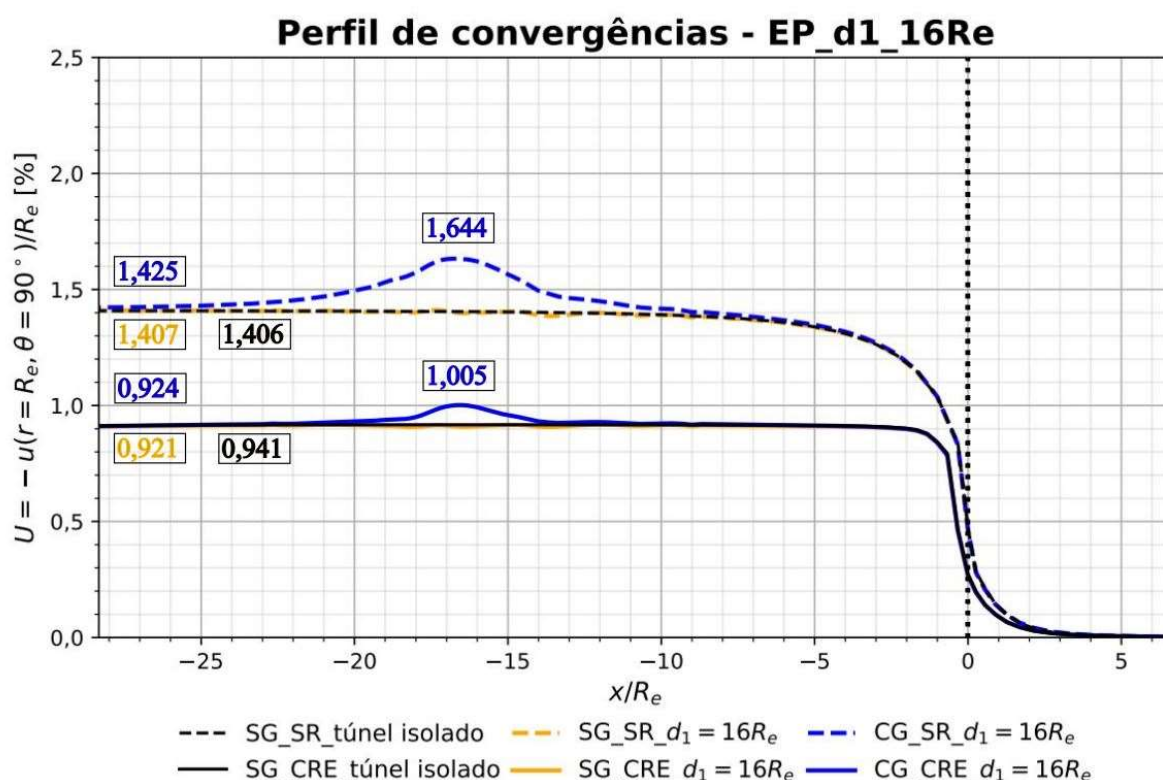
Fonte: o autor (2023).

Verifica-se, na Figura 77, que há um efeito expressivo da interação da proximidade entre os túneis longitudinais no perfil de convergências a partir de 4 raios de distância, que, muitas vezes, pode ser discreto ou imperceptível devido a atuação da presença de um revestimento de elevada rigidez. Portanto, a análise sem a consideração de revestimento (SR) permite identificar um acréscimo de 30,15% no perfil de convergência quando se compara o caso de túnel isolado com o de túneis gêmeos afastados 4 raios entre si, de eixo a eixo da seção circular. Ademais, percebe-se que o afastamento de 16 raios equivale à condição de túnel isolado e que há pouca influência nos valores das convergências, cerca de 1,64%, no caso de 8 raios de distância.

Após o entendimento fundamental, de forma isolada, da importância do parâmetro geométrico d_1 e da presença do revestimento, condicionado pela rigidez equivalente adotada, sobre o perfil de convergências, procura-se evidenciar o comportamento dos efeitos físicos na estrutura dos túneis gêmeos com e sem a presença da galeria transversal (CG e SG, respectivamente), assumindo-se o maciço com comportamento elastoplástico (EP) na ausência de revestimento e com a aplicação de revestimento elástico (SR e CRE, respectivamente).

Assim, com o intuito de avaliar o comportamento dos perfis de convergências, fixa-se o túnel isolado sem revestimento (SR) e com revestimento elástico (CRE) como referência para o critério de comparação e assume-se os túneis gêmeos nos cenários com e sem galeria transversal (CG e SG), considerando os modelos constitutivos elastoplástico (EP) para o maciço e elástico para o revestimento (CRE), aplicando-se o estudo para diferentes distâncias de afastamento entre os túneis longitudinais (d_1), contemplando 16 raios, 8 raios e 4 raios de distância.

Figura 78 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos para maciço elastoplástico: $d_1 = 16R_e$



Fonte: o autor (2023).

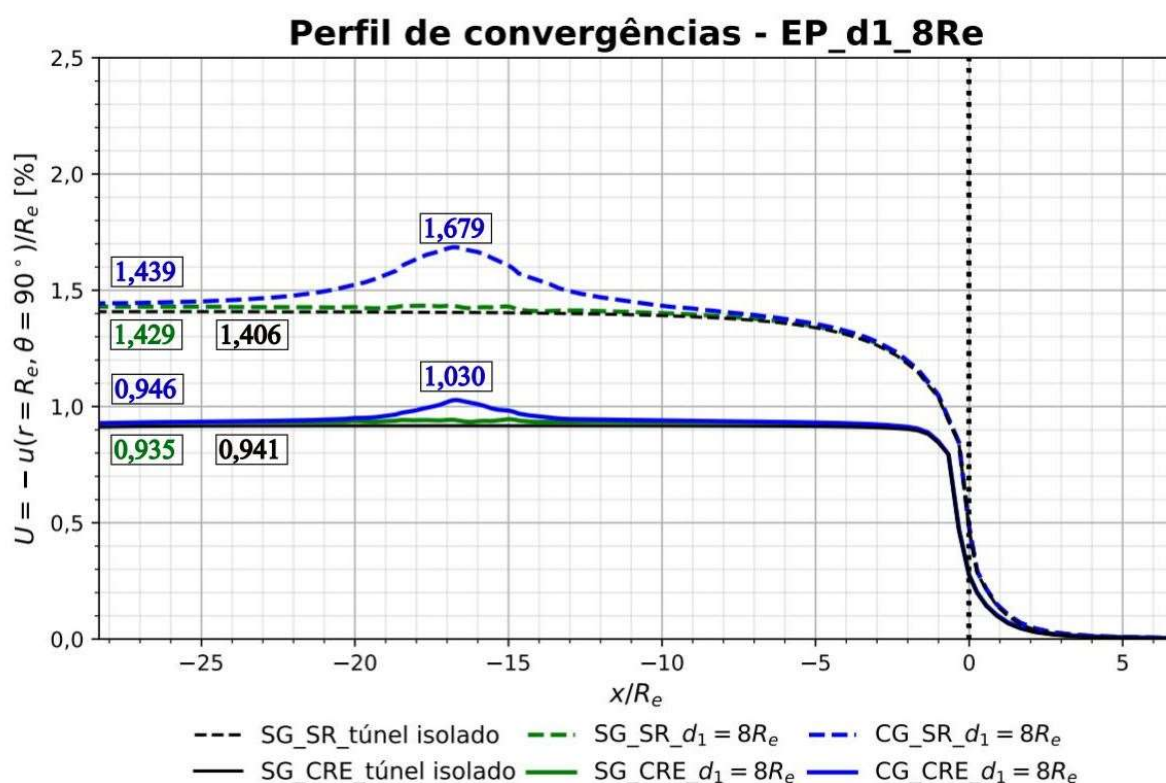
O afastamento de 16 raios (Figura 78) evidencia a equivalência do perfil de convergências dos túneis gêmeos em relação ao túnel isolado, tanto para o caso sem revestimento (SR), quanto para o exemplo com revestimento elástico (CRE). Logo, pode-se inferir que neste caso a distância entre os túneis pouco contribui nos resultados. Entretanto, nota-se a nítida influência da presença do revestimento elástico (CRE) na atenuação dos valores de convergência, implicando uma redução que varia de 33% no caso do túnel isolado e de aproximadamente 35% para os túneis gêmeos com e sem galeria transversal (CG e SG).

A interferência mais significativa, denotada na Figura 78, relaciona-se à presença da galeria transversal (CG), indicando uma região afetada bem pronunciada ao longo do perfil de

convergências do túnel longitudinal. Trata-se de uma zona bem demarcada a partir do ponto de intersecção da galeria com o túnel longitudinal, visivelmente destacada quando em comparação com os perfis dos túneis isolados e sem galeria (SG). Contudo, mais uma vez pode-se identificar a contribuição da rigidez do revestimento restringindo o efeito físico da convergência, pois o valor de pico na região da galeria sofre uma redução de aproximadamente 39%, além da redução de sua abrangência ao longo do túnel longitudinal.

O afastamento de 8 raios (Figura 79) é bem semelhante ao caso de 16 raios, implicando em variações na ordem de 2% nos valores encontrados, quando comparados com os resultados da Figura 78.

Figura 79 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos para maciço elastoplástico: $d_1 = 8R_e$



Fonte: o autor (2023).

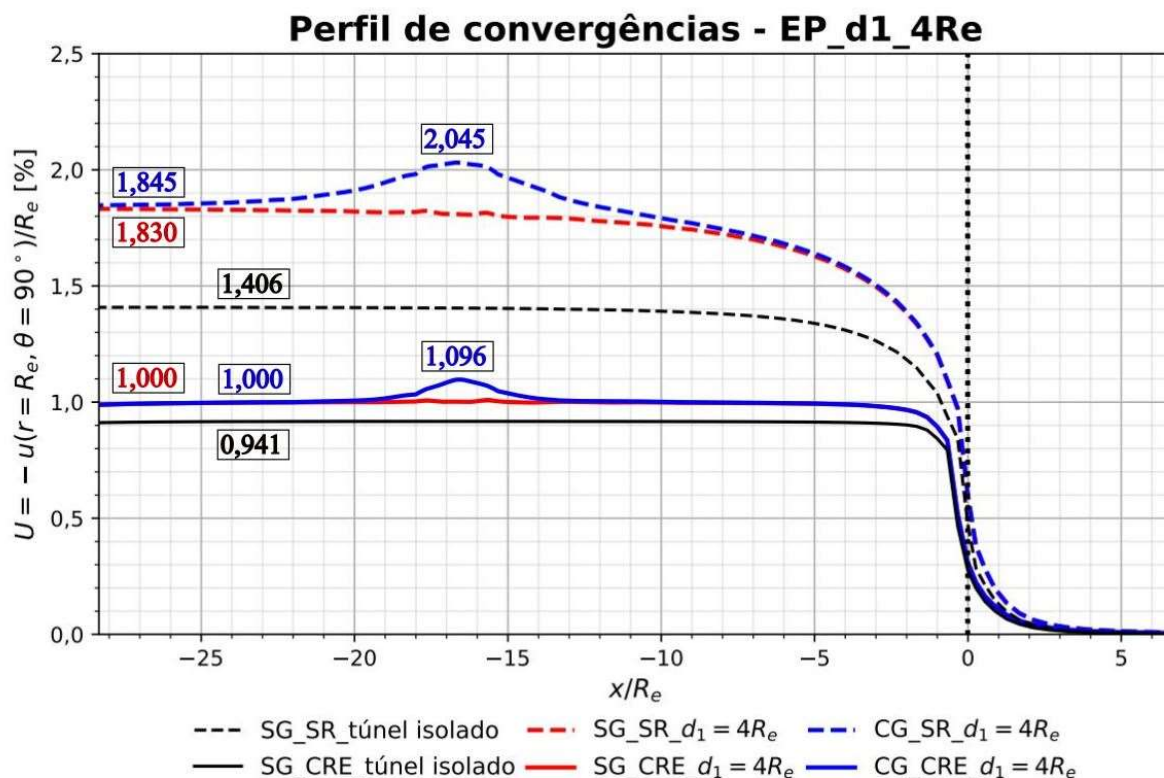
Desse modo, observa-se que a presença do revestimento praticamente não ocasiona nenhuma alteração nos perfis de convergências dos túneis gêmeos, quando comparados com o caso de 16 raios, ou seja, mantém a contribuição na restrição do desenvolvimento da convergência. Por outro lado, o destaque mais significativo deve-se à presença da galeria (CG), uma vez que a região influenciada pela intersecção apresenta uma leve amplificação, possivelmente em decorrência da maior proximidade entre os túneis, mesmo que de forma diminuta, pois na

própria comparação do perfil do túnel isolado sem revestimento (SR) em relação ao perfil dos túneis gêmeos sem galeria (SG) e sem revestimento (SR) se nota uma diferença de aproximadamente 1,6%.

Por fim, o terceiro cenário (Figura 80) leva em consideração o afastamento de 4 raios entre os túneis gêmeos. Neste caso, denota-se a maior contribuição no perfil de convergências em decorrência da proximidade entre os túneis. Ao comparar os resultados da condição dos túneis gêmeos sem galeria (SG), com e sem revestimento (CRE e SR, respectivamente), com as referências do túnel isolado, com e sem revestimento (CRE e SR, respectivamente), verifica-se um aumento na ordem de 6% e de 30%, respectivamente, nos valores dos perfis de convergências.

A seguir, com a finalidade de compreender melhor a parcela de contribuição da existência do revestimento elástico (CRE), da distância entre os túneis gêmeos e da presença da galeria transversal (CG), realiza-se a comparação de três situações na Figura 80. A primeira corresponde aos túneis isolados (linhas pretas), com e sem revestimento (linhas contínua e tracejada, respectivamente), a segunda aos túneis gêmeos sem galeria (SG) (linhas vermelhas), com e sem revestimento (CRE representado pela linha contínua e SR representado pela linha tracejada), e a terceira aos túneis gêmeos com galeria (CG) (linhas azuis), com e sem revestimento (CRE equivale à linha contínua e SR equivale à linha tracejada).

Figura 80 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos para maciço elastoplástico: $d_1 = 4R_e$



Fonte: o autor (2023).

Ao analisar o túnel isolado (representado pelas linhas pretas), observa-se uma disparidade próxima de 49% ao introduzir um revestimento elástico em comparação com a ausência do mesmo. Isso evidencia a notável influência da rigidez. Ao comparar a proximidade entre túneis sem revestimento (linhas tracejadas preta e vermelha), a diferença foi de 30%. Com a aplicação do revestimento (linhas vermelha e preta contínuas), essa diferença diminuiu para 6%. Em relação à influência da galeria na posição de conexão, a comparação entre as linhas azuis e vermelhas mostra uma diferença de 12% sem revestimento (linhas tracejadas) e 10% com revestimento (linhas contínuas). Além disso, percebe-se que a abrangência da influência da galeria sobre o perfil de convergências é mais significativa na ausência de revestimento, transformando-se em um efeito mais localizado quando este está presente.

Depreende-se, assim, das análises realizadas que as maiores parcelas de contribuições nos valores dos perfis de convergências dos túneis são condicionadas pela presença de revestimento e pela distância entre os túneis gêmeos. No caso do revestimento, a aplicação de uma rigidez relativamente elevada ocasiona a restrição do avanço do efeito físico das convergências, podendo, inclusive, inibir sua manifestação. Em relação à distância entre os túneis gêmeos,

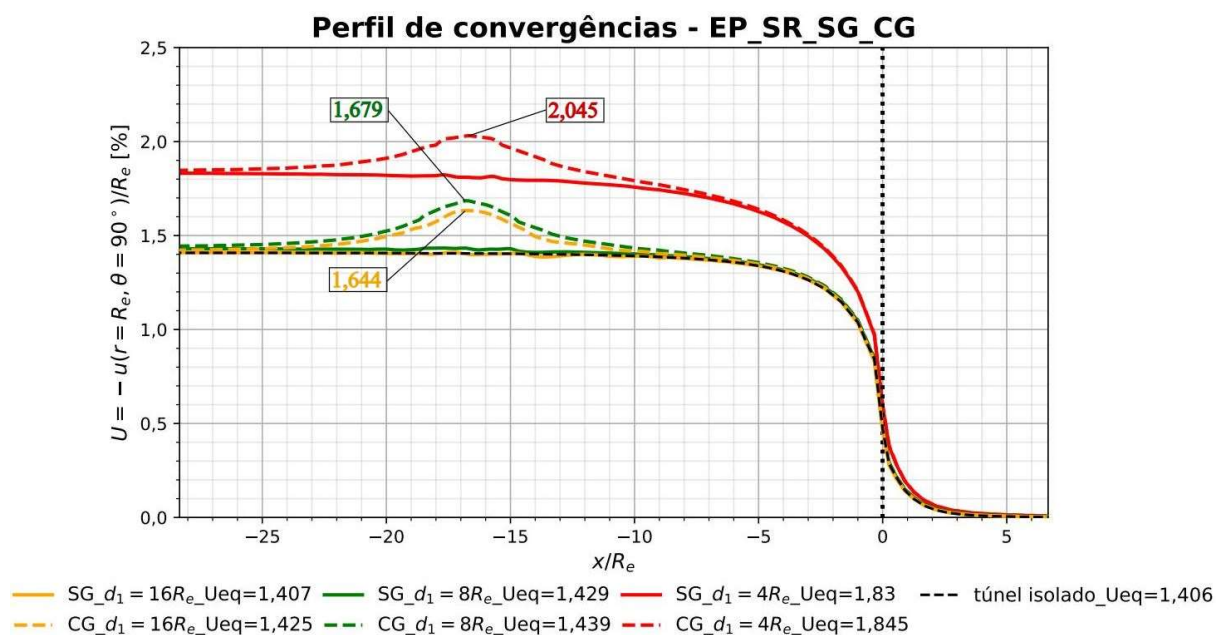
nota-se uma maior preponderância a partir de 4 raios, quando os valores dos perfis de convergências são significativamente maiores e relevantes. Contudo, no que tange a presença das galerias transversais (CG), nos modelos onde há revestimento, avalia-se que a influência do efeito da galeria é altamente localizada, não apresentando impacto substancial no restante do perfil, exceto na região da intersecção.

7.3 ANÁLISES DO PERFIL DE CONVERGÊNCIA DE TÚNEIS GÊMEOS CONSIDERANDO DIVERSOS MODELOS CONSTITUTIVOS

Nesta subseção, avança-se para as investigações dos modelos direcionados ao estudo de túneis gêmeos com galerias transversais. Logo, o processo de análise começa por modelos constitutivos de menor complexidade, progredindo até alcançar o modelo acoplado elastoplástico-viscoplástico para o maciço e o modelo viscoelástico para o revestimento de concreto.

A primeira análise (Figura 81) apresenta a comparação de túneis gêmeos com e sem galeria, empregando o modelo constitutivo elastoplástico para o maciço na condição sem revestimento. Agrupa-se os perfis de convergências das diferentes distâncias entre os túneis gêmeos ($d_1 = 4R_e$, $8R_e$ e $16R_e$) para que seja possível retomar os conceitos discutidos anteriormente e visualizar, nitidamente, a importância da influência da proximidade dos túneis nos resultados e o efeito localizado da galeria.

Figura 81 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos para maciço elastoplástico sem revestimento: condição com e sem galeria transversal

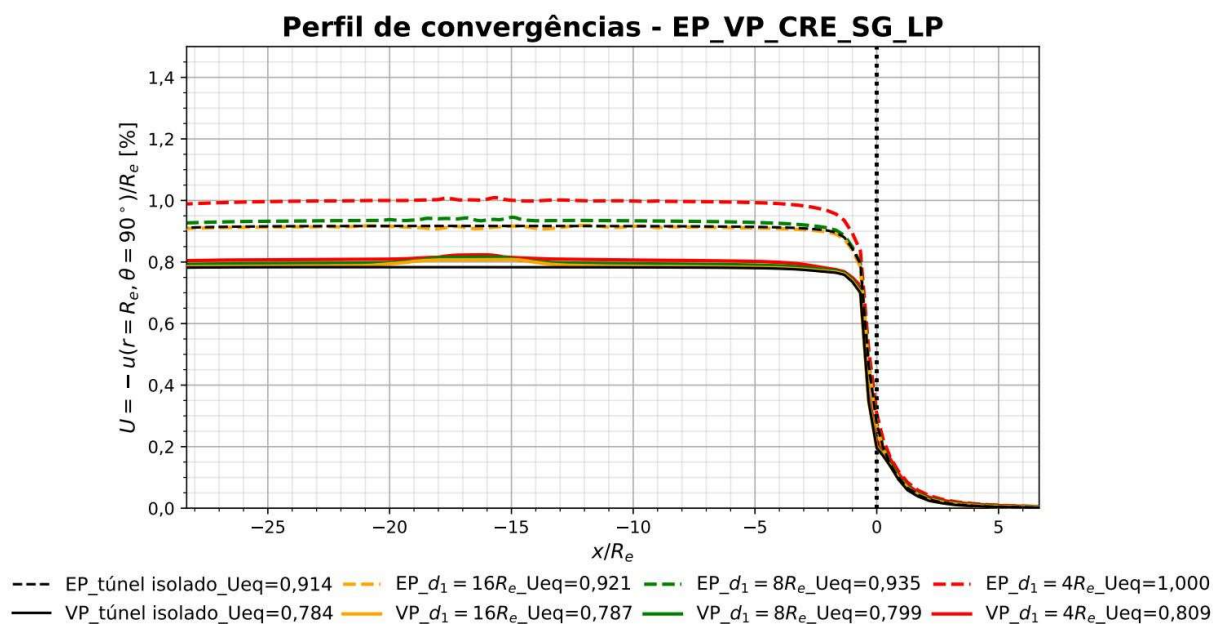


Fonte: o autor (2023).

Observa-se que a presença da galeria, quando não há revestimento, tem um efeito abrangente sobre o perfil de convergências do túnel longitudinal. Contudo, como visto nas figuras 78, 79 e 80, o revestimento tem um efeito de limitar essa abrangência.

A próxima análise consiste na comparação entre os modelos constitutivos elastoplástico (EP) e viscoplástico (VP) para o maciço no longo prazo (LP). Busca-se compreender a colaboração dos efeitos diferidos no tempo na evolução da convergência após o término da análise. Além disso, informa-se que os valores dos perfis de convergências do modelo elastoplástico com revestimento elástico são adotados como referência para que seja viável a realização de comparações entre os dois modelos.

Figura 82 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos sem galeria: modelos elastoplástico e viscoplástico com revestimento elástico no longo prazo



Fonte: o autor (2023).

Inicialmente, observa-se na Figura 82 que a presença do revestimento restringe os efeitos viscosos, de modo que os perfis de convergência dos túneis gêmeos tendem a se aproximar da condição de referência representada pelo túnel isolado, independentemente da distância existente entre os túneis. Logo, a variação encontrada é muito pequena, ficando na ordem de 3% em relação ao túnel isolado para a distância de 4 raios, cenário onde há a maior interação entre os túneis gêmeos.

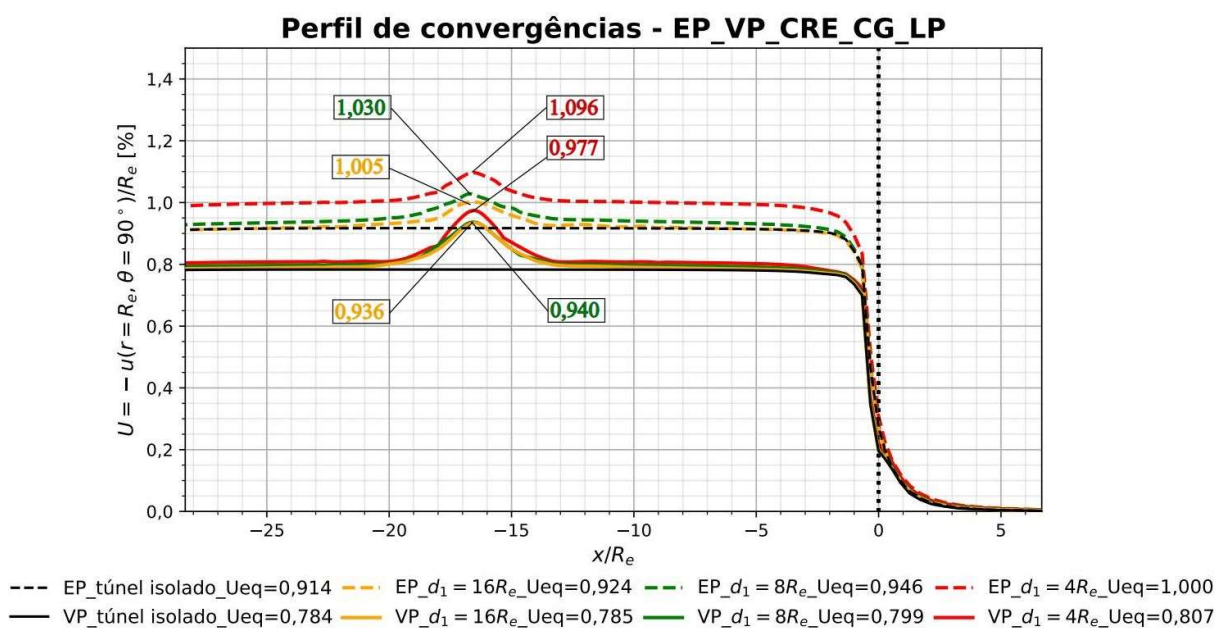
Dessa forma, pode-se avaliar a relevância do efeito específico da viscosidade através da comparação do túnel isolado EP CRE (linha preta tracejada) com o VP CRE (linha preta contínua). No longo prazo, como o modelo viscoplástico tem uma coesão menor, caso não houvesse revestimento, seria esperado que este atribuísse uma convergência maior do que o modelo elastoplástico. Porém, nesse caso revestido, verifica-se que os valores relacionados ao modelo viscoso são significativamente inferiores ao modelo elastoplástico, correspondendo a uma diferença de aproximadamente 14%.

A inversão de expectativa em relação aos modelos se explica pela elevada rigidez do revestimento de concreto adotado na análise, de modo que o desenvolvimento destes efeitos, que ocorreriam ao longo do tempo, é restringido. Por outro lado, no modelo EP CRE a convergência no regime plástico ocorre de forma instantânea durante a escavação, embora seja

restringida também pelo revestimento. Assim, o processo de escavação pode condicionar a ocorrência da plastificação ao redor da seção do túnel, mas os efeitos viscosos não ocorrerão de forma pronunciada como esperado, pois há a influência da rigidez do revestimento.

A Figura 83 apresenta a mesma configuração da Figura 82, porém com a presença da galeria transversal.

Figura 83 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos com galeria: modelos elastoplástico e viscoplástico com revestimento elástico no longo prazo



Fonte: o autor (2023).

Percebe-se que os valores da convergência, fora da zona de influência da galeria, dos túneis gêmeos, independente da distância de afastamento entre eles, se mantêm praticamente constantes, havendo uma diferença desprezível na ordem de 1% em relação aos valores da Figura 82. Isso é devido à restrição causada pela rigidez do revestimento. Pode-se também notar que o efeito da galeria no perfil de convergências dos túneis ocorre de forma bem localizada quando há o revestimento (4 raios para cada lado do eixo da galeria).

Ainda na Figura 83 é possível identificar diferenças maiores de convergência entre a zona da galeria para a zona não influenciada pela galeria. Na condição mais pronunciada, que ocorre nos túneis gêmeos afastados 4 raios entre si, para o modelo VP CRE a diferença entre U_{eq} e U_{pico} fica na ordem de 21% e para o EP CRE essa diferença é equivalente a 9,5%. Assim, de forma localizada, pode-se compreender a importância dos efeitos viscosos nos valores de

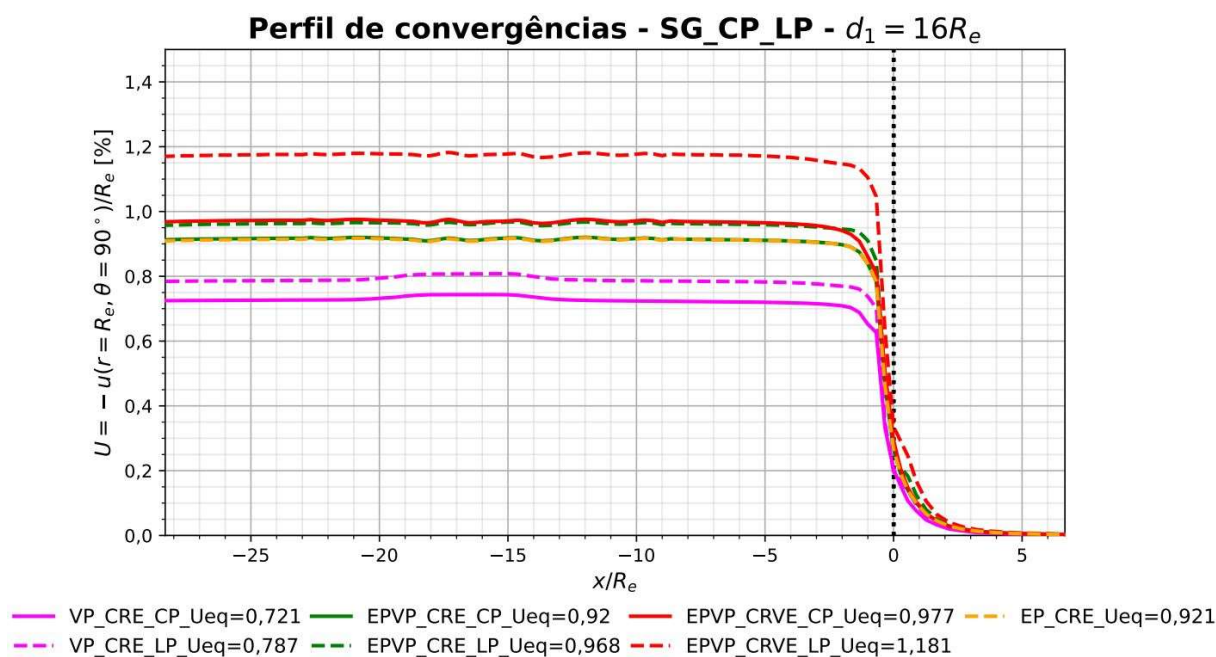
convergência resultantes, principalmente no caso em que a distância de afastamento entre os túneis é menor, na ordem de 4 raios, onde a interação entre os túneis é mais preponderante.

Pode-se notar, também, que no EP CRE há uma aparente translação entre os perfis de convergências devido ao efeito da proximidade entre os túneis, tanto na região da galeria, quanto no patamar.

Entretanto, no modelo VP CRE surge a influência do tempo na convergência. Neste caso, o maior intervalo de tempo necessário para escavar a galeria em d_1 equivalente a 16 raios faz com que o respectivo perfil se aproxime do perfil de convergências de d_1 igual a 8 raios, ou seja, o trecho escavado fica exposto aos efeitos viscosos por um tempo maior em relação aos outros valores de d_1 , permitindo a evolução da convergência. Apesar disso, para d_1 igual a 4 raios a interação da proximidade entre os túneis gêmeos somada aos efeitos viscosos ao longo do tempo resultou em um maior valor quando comparado ao d_1 com 16 e 8 raios.

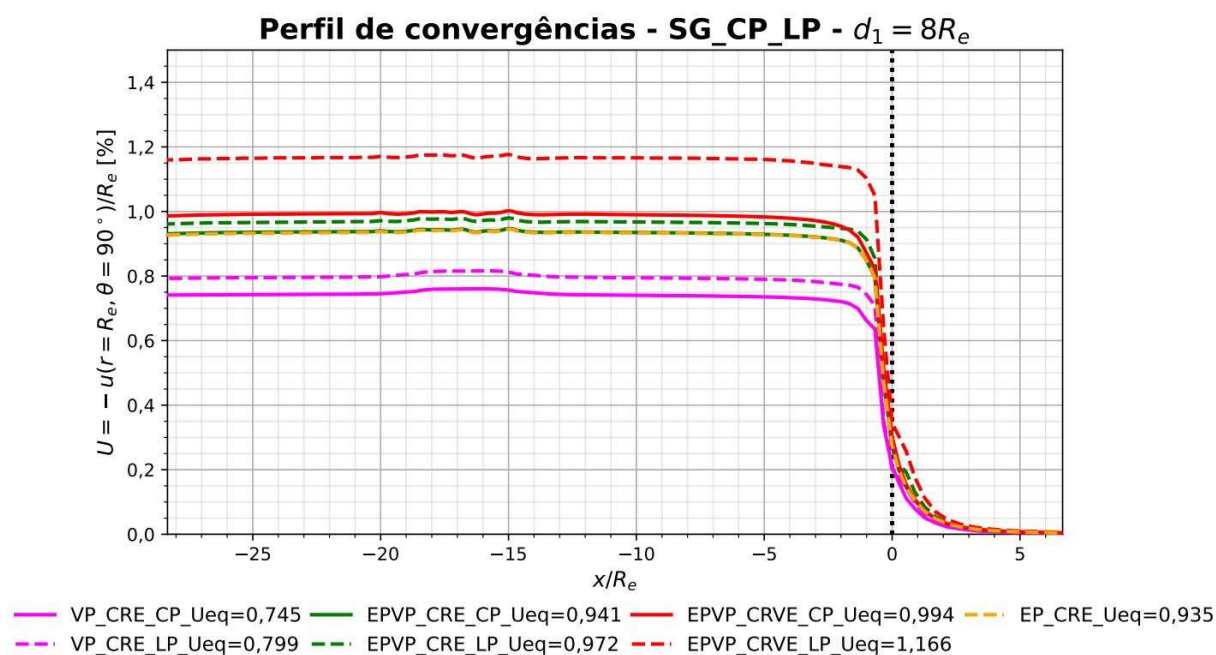
A análise seguinte, ilustrada nas figuras 84, 85 e 86, leva em consideração o comportamento de diferentes modelos constitutivos do maciço, inicialmente sem galeria, e com a aplicação de revestimento elástico e viscoelástico no curto prazo (CP), ou seja, no final da escavação, e no longo prazo (LP), correspondente ao término dos efeitos viscosos. A desconsideração da galeria transversal permite avaliar, primeiramente, as implicações do modelo do maciço associado ao respectivo modelo do revestimento no perfil de convergências dos túneis gêmeos para cada uma das três distâncias de afastamento. São considerados os modelos elastoplástico (EP) com revestimento elástico (CRE), viscoplástico (VP) com revestimento elástico (CRE), elastoplástico-viscoplástico (EPVP) com revestimento elástico (CRE) e o elastoplástico-viscoplástico (EPVP) com revestimento viscoelástico (CRVE), no curto (CP) e no longo prazo (LP).

Figura 84 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos sem galeria para $d_1 = 16R_e$: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto e longo prazo



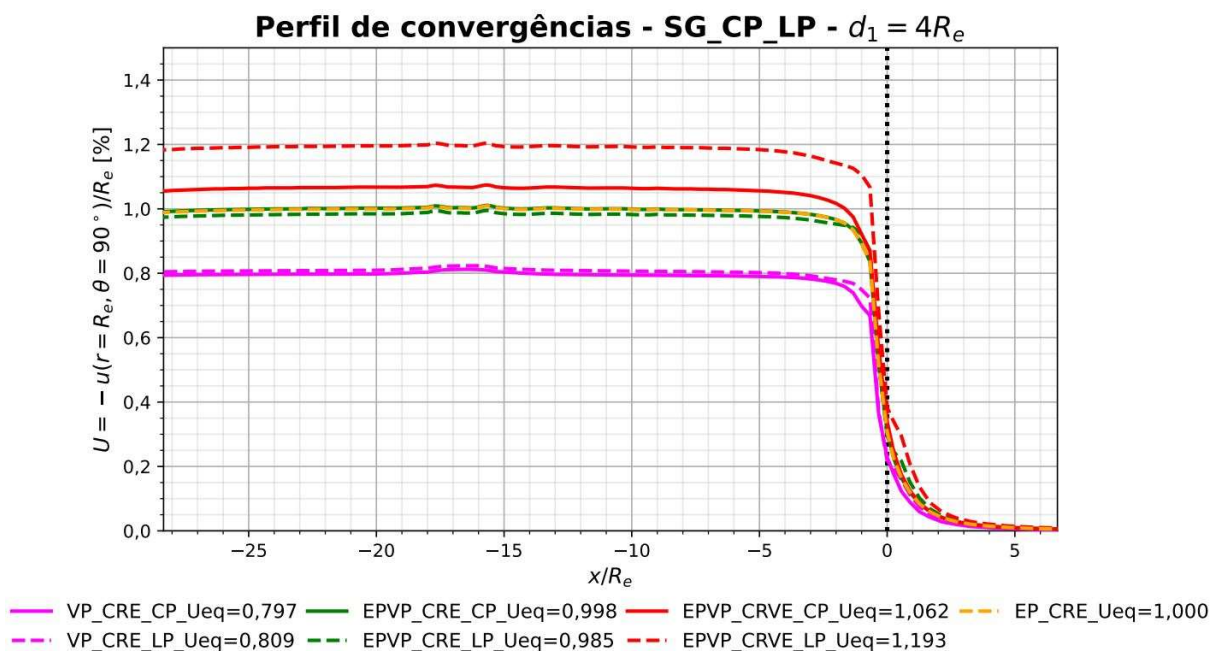
Fonte: o autor (2023).

Figura 85 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos sem galeria para $d_1 = 8R_e$: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto e longo prazo



Fonte: o autor (2023).

Figura 86 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos sem galeria para $d_1 = 4R_e$: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto e longo prazo



Fonte: o autor (2023).

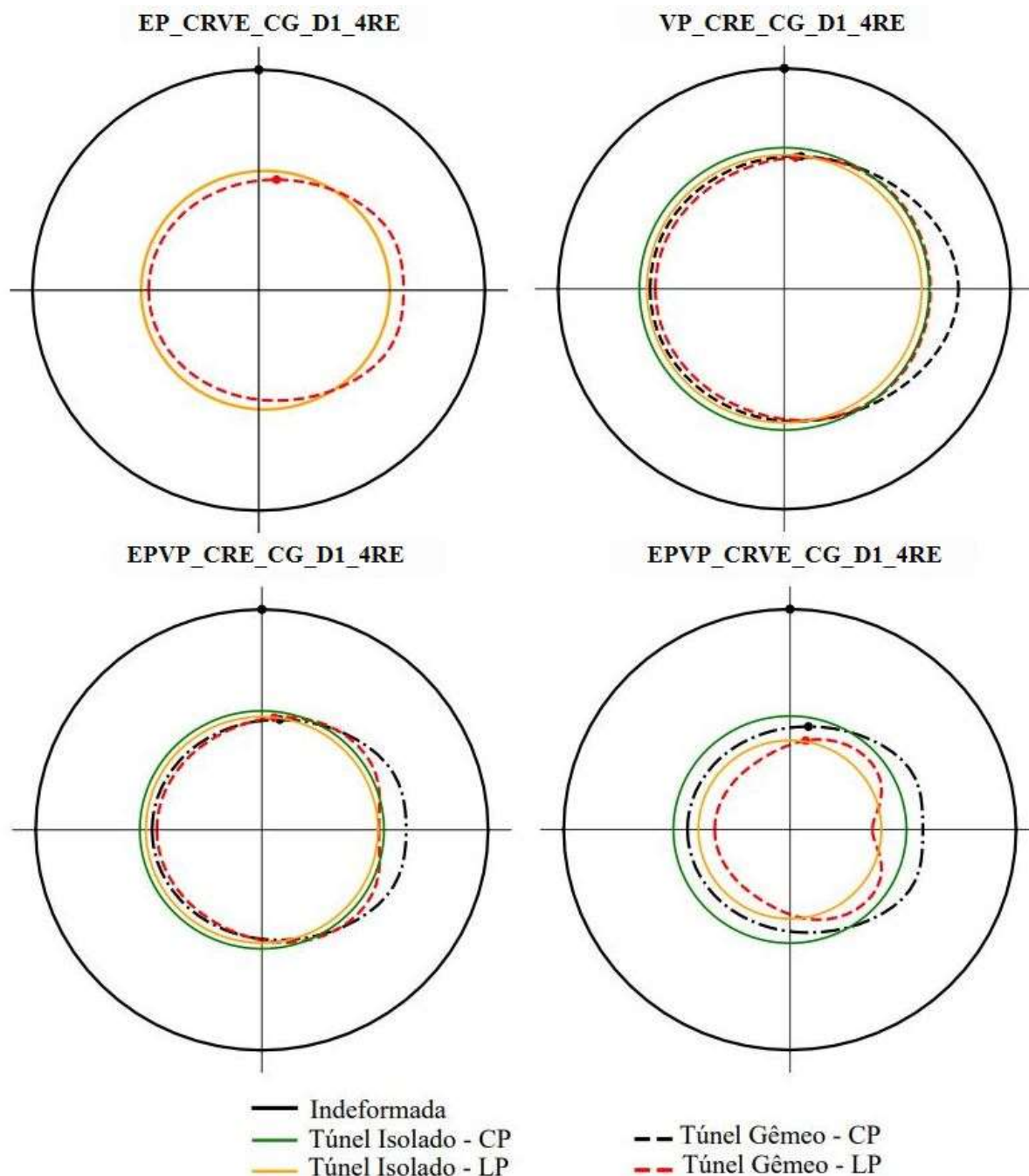
De modo geral, a partir das Figura 84 a 86, pode-se inferir, inicialmente, que no CP o modelo EPVP CRE equivale ao EP CRE, o que faz sentido, pois, embora a plastificação ao redor da seção, decorrente do processo de escavação, possa já ter ocorrida, no CP os efeitos viscosos ainda não evoluíram de forma considerável devido à curta variação temporal existente entre o momento da respectiva etapa de escavação e o término do processo de escavação. Contudo, devido ao efeito reológico do revestimento, o perfil seguirá evoluindo até atingir o longo prazo.

Nota-se, novamente, que a evolução da convergência devido aos efeitos viscosos é fortemente influenciada pela rigidez do revestimento. Essa situação fica mais visível na Figura 86, mais especificamente no modelo VP CRE com d_1 igual a 4 raios, onde o perfil de convergências no CP se aproxima muito do perfil no LP. Neste caso, há uma grande influência da interação entre os túneis gêmeos devido à proximidade, implicando diretamente no aumento do valor da U_{eq} no CP. Porém, como a rigidez do revestimento limita os efeitos viscosos, o perfil no LP praticamente não evolui mantendo-se próximo do CP.

Outra observação importante refere-se a possível ovalização da seção ao longo do tempo em relação ao ponto de referência analisado no perímetro da seção para descrever o comportamento do perfil de convergências. Ao comparar o modelo EPVP CRE no CP e no LP na Figura 86, nota-se que o valor da U_{eq} para o CP é superior ao LP. Ao invés de seguir a lógica no sentido

do fechamento da seção, o ponto sofreu um deslocamento na direção contrária ao fechamento, conforme Figura 87.

Figura 87 – Ovalização da seção para diferentes modelos constitutivos em $z = Lt - L2/4$ considerando $d_1 = 4R_e$ e escala = 50x

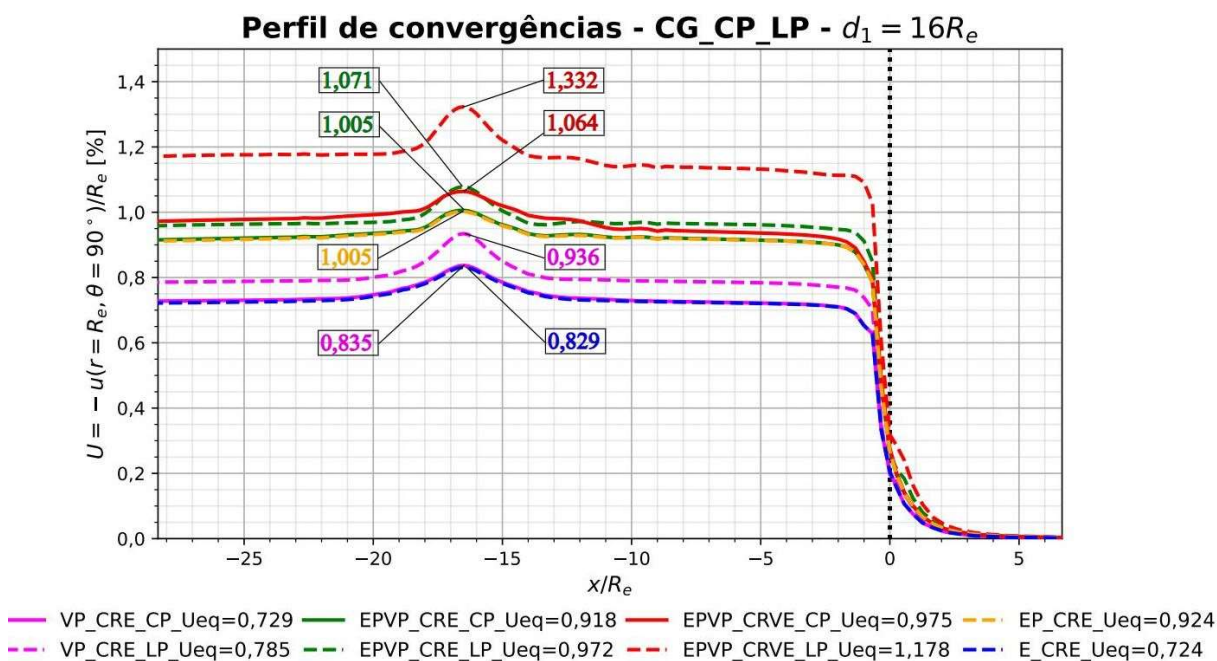


Fonte: o autor (2023).

De modo análogo às figuras 84, 85 e 86, porém com a presença da galeria transversal, apresenta-se a análise de diferentes valores de d_1 nas figuras 88, 89 e 90. Busca-se a comparação dos

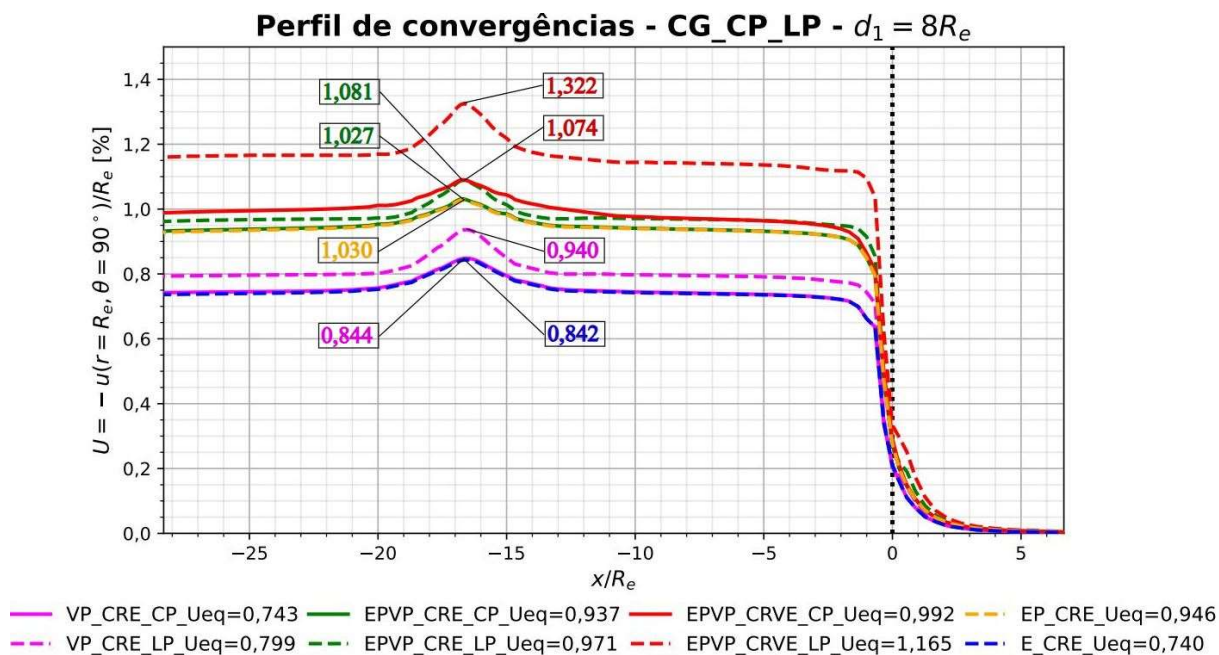
resultados entre os modelos elástico (E) com revestimento elástico (CRE), elastoplástico (EP) com revestimento elástico (CRE), viscoplástico (VP) com revestimento elástico (CRE), elastoplástico-viscoplástico (EPVP) com revestimento elástico (CRE) e o elastoplástico-viscoplástico (EPVP) com revestimento viscoelástico (CRVE), no curto (CP) e no longo prazo (LP).

Figura 88 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos com galeria para $d_1 = 16R_e$: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto e longo prazo



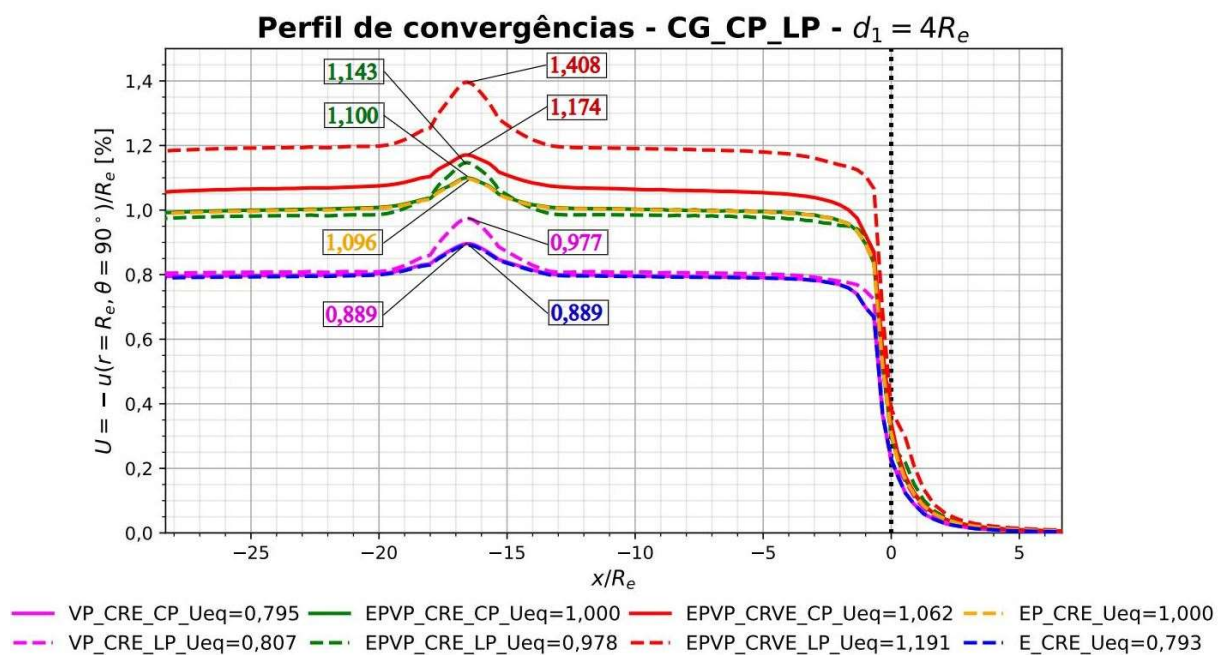
Fonte: o autor (2023).

Figura 89 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos com galeria para $d_1 = 8R_e$: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto e longo prazo



Fonte: o autor (2023).

Figura 90 – Perfil de convergências dos túneis gêmeos com galeria para $d_1 = 4R_e$: comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto e longo prazo



Fonte: o autor (2023).

O primeiro ponto observado é a equivalência entre os perfis de convergência do modelo E CRE (linha tracejada azul) com o VP CRE no CP (linha tracejada magenta), muito provavelmente relacionada à elevada velocidade de escavação. Como o processo de escavação e instalação do revestimento ocorre rapidamente ($V_p = 12,5$ m/dia), o intervalo de tempo para que os efeitos viscosos possam ocorrer é muito pequeno, levando em consideração, ainda, a restrição imposta pela rigidez do revestimento.

Diferentemente da condição apresentada acima, onde há a presença do revestimento elástico, no modelo VP, sem a aplicação de revestimento, a expectativa no LP seria de valores de convergências superiores ao modelo EP, pois o valor da coesão na parcela viscosa é menor do que a coesão correspondente na parcela plástica. Entretanto, devido à elevada rigidez do revestimento empregado, os efeitos viscosos são restringidos e os valores das convergências resultantes no modelo VP tornam-se inferiores aos valores no EP.

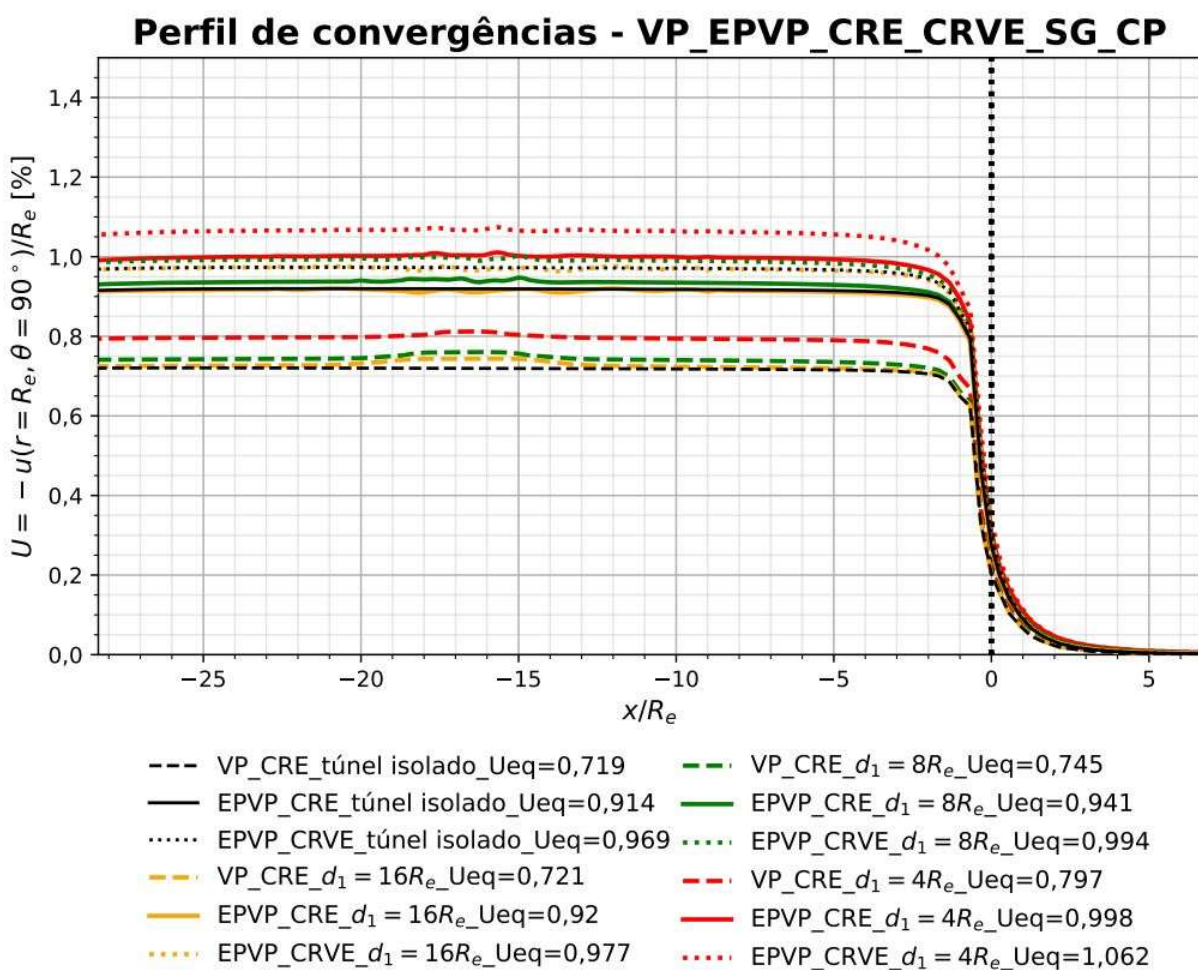
Outro aspecto relevante, conforme já abordado anteriormente, diz respeito à ovalização da seção ao longo do tempo, em relação ao ponto de referência utilizado para descrever o perfil de convergências. Ao examinar a Figura 90 e comparar o modelo EPVP CRE no CP e no LP para d_1 equivalente a 4 raios, fora da região de influência da galeria, percebe-se que o valor de U_{eq} no CP é maior do que no LP. Essa ovalização é mais pronunciada quando d_1 é menor.

Na Figura 88, no modelo EPVP CRVE, logo após a região da galeria, pode-se notar que há uma perturbação no patamar do perfil de convergências. Essa perturbação está relacionada aos efeitos viscosos no trecho do túnel longitudinal já escavado que se desenvolvem durante o tempo de escavação da galeria. Esse efeito é mais pronunciado quando $d_1 = 16R_e$, pois leva-se mais tempo até concluir a galeria e retomar a escavação do túnel longitudinal. Quando $d_1 = 4R_e$ esse efeito não é relevante.

Ainda sobre o modelo EPVP CRVE, mais especificamente para os afastamentos de 16 e 8 raios entre os túneis gêmeos, distingue-se que a U_{eq} no patamar a frente da região da galeria é ligeiramente menor do que a U_{eq} no patamar que antecede a galeria. Este comportamento do perfil de convergências se deve ao menor tempo de exposição aos efeitos viscosos do trecho escavado posteriormente à galeria transversal. Portanto, durante o período de escavação da galeria o trecho do túnel longitudinal já escavado permanece a disposição dos efeitos viscosos até o término da escavação desta. Por conseguinte, o patamar a frente da galeria apresenta convergência menor por possuir menor tempo de exposição aos efeitos viscosos, quando comparado ao trecho do túnel antes da galeria.

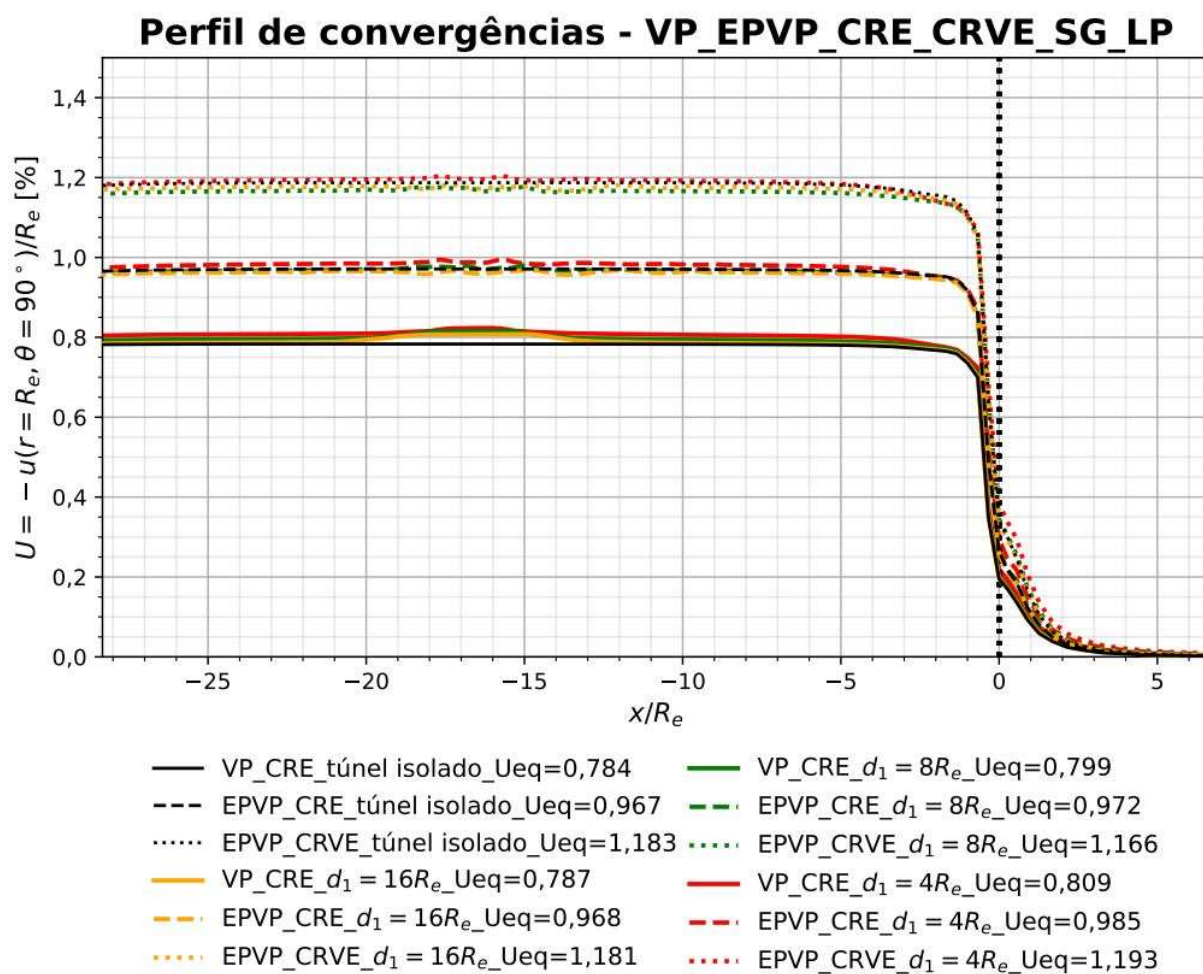
Por fim, mostra-se um resumo do comportamento dos modelos constitutivos VP CRE, EPVP CRE e EPVP CRVE sem galeria no CP na Figura 91 e no LP na Figura 92, bem como os mesmos modelos com galeria no CP na Figura 93 e no LP na Figura 94. Em todos os casos, são expostos os perfis de convergências para $d_1 = 16R_e$, $8R_e$ e $4R_e$, bem como o perfil do túnel isolado como referência.

Figura 91 – Resumo dos perfis de convergências dos túneis gêmeos sem galeria:
comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto prazo



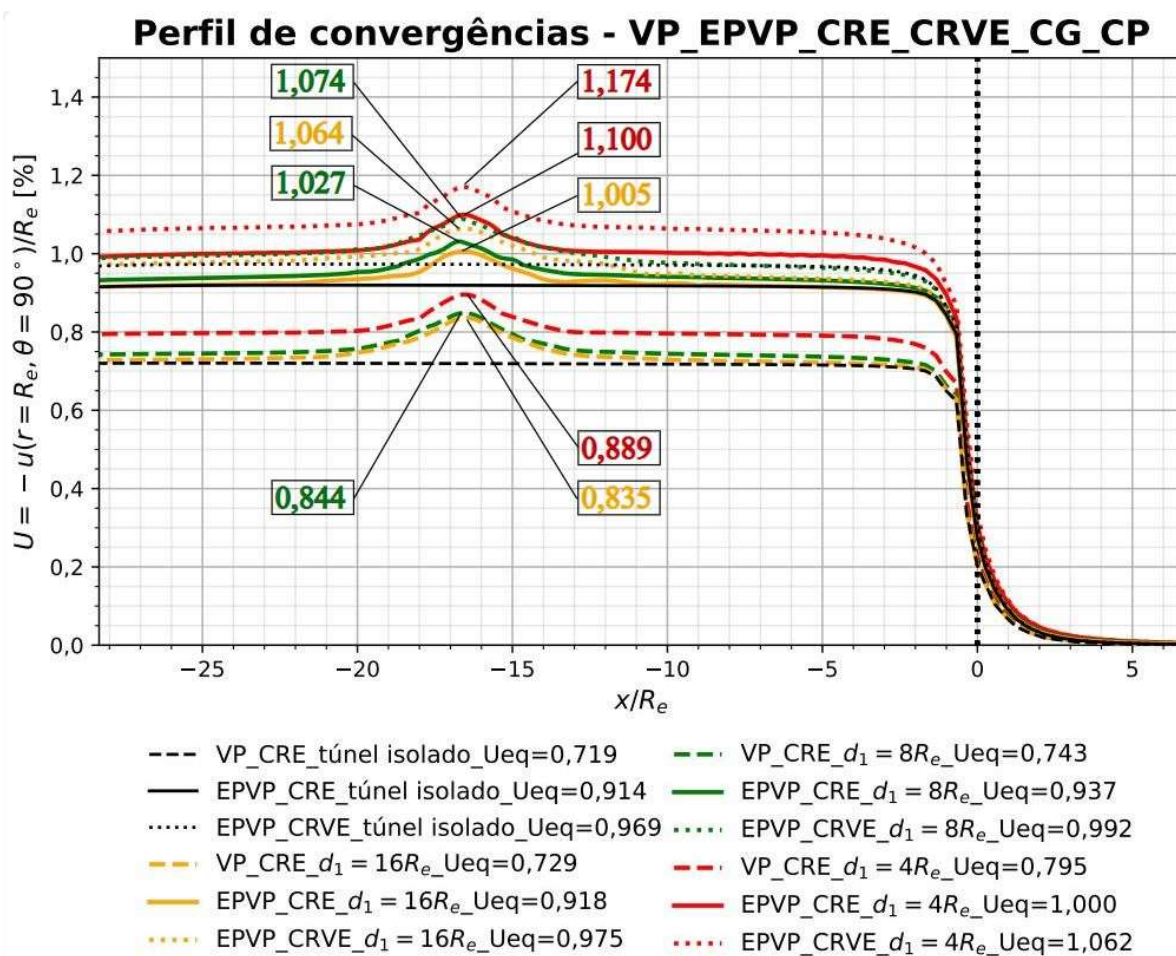
Fonte: o autor (2023).

Figura 92 – Resumo dos perfis de convergências dos túneis gêmeos sem galeria:
comportamento de diferentes modelos constitutivos no longo prazo



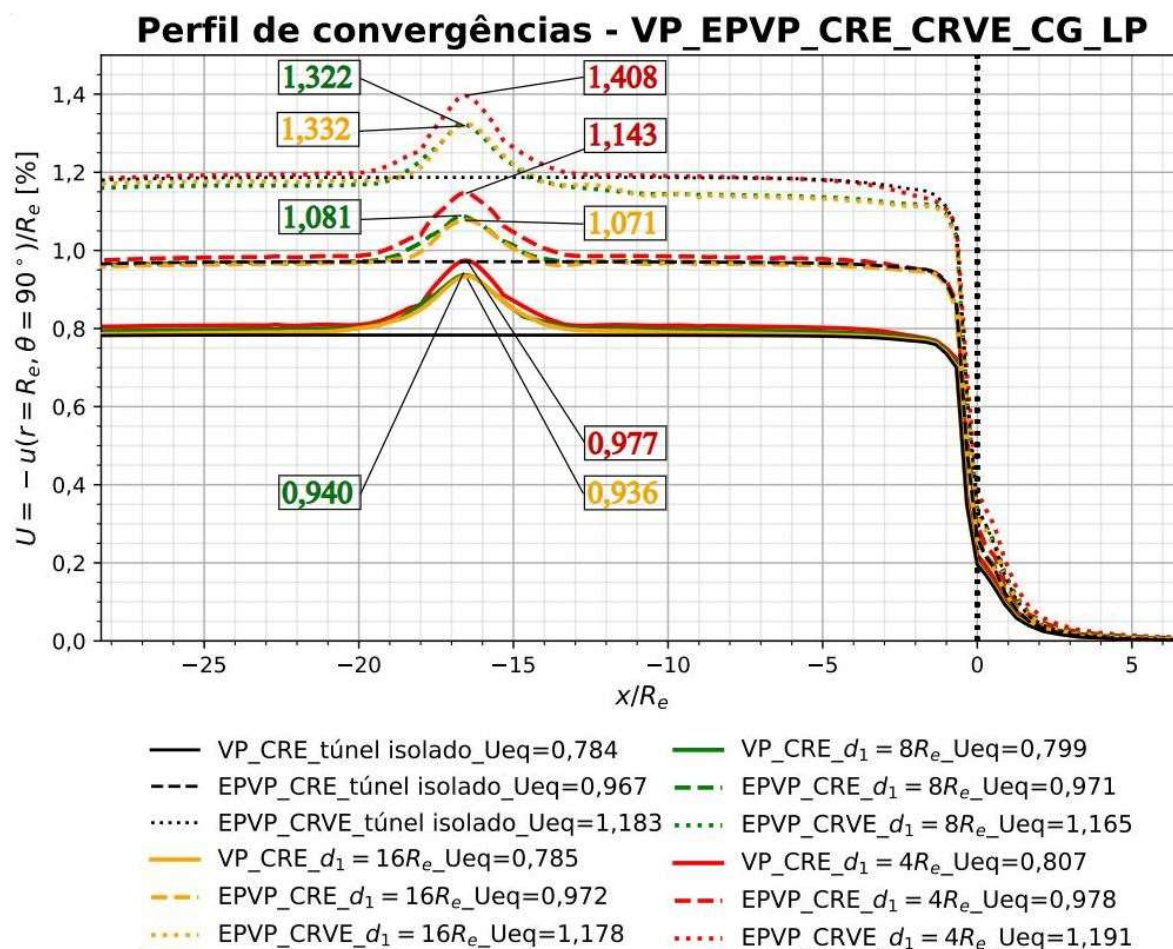
Fonte: o autor (2023).

Figura 93 – Resumo dos perfis de convergências dos túneis gêmeos com galeria:
comportamento de diferentes modelos constitutivos no curto prazo



Fonte: o autor (2023).

Figura 94 – Resumo dos perfis de convergências dos túneis gêmeos com galeria:
comportamento de diferentes modelos constitutivos no longo prazo



Fonte: o autor (2023).

Dessa forma, constata-se na Figura 94 um aumento do valor da U_{pico} da galeria no modelo EPVP CRVE na comparação do perfil com $d_1 = 16R_e$ (linha amarela pontilhada) em relação ao $d_1 = 8R_e$ (linha verde pontilhada). Diante do exposto anteriormente, este aumento inesperado pode estar relacionado ao maior intervalo de tempo destinado no processo de escavação da galeria transversal. Logo, há influência diretamente na ocorrência dos efeitos diferidos no tempo no trecho já escavado que corresponde ao ponto de intersecção entre o túnel longitudinal e a galeria. Por outro lado, espera-se que em $d_1 = 8R_e$ a convergência seja maior em comparação a $d_1 = 16R_e$ devido à proximidade entre os túneis gêmeos.

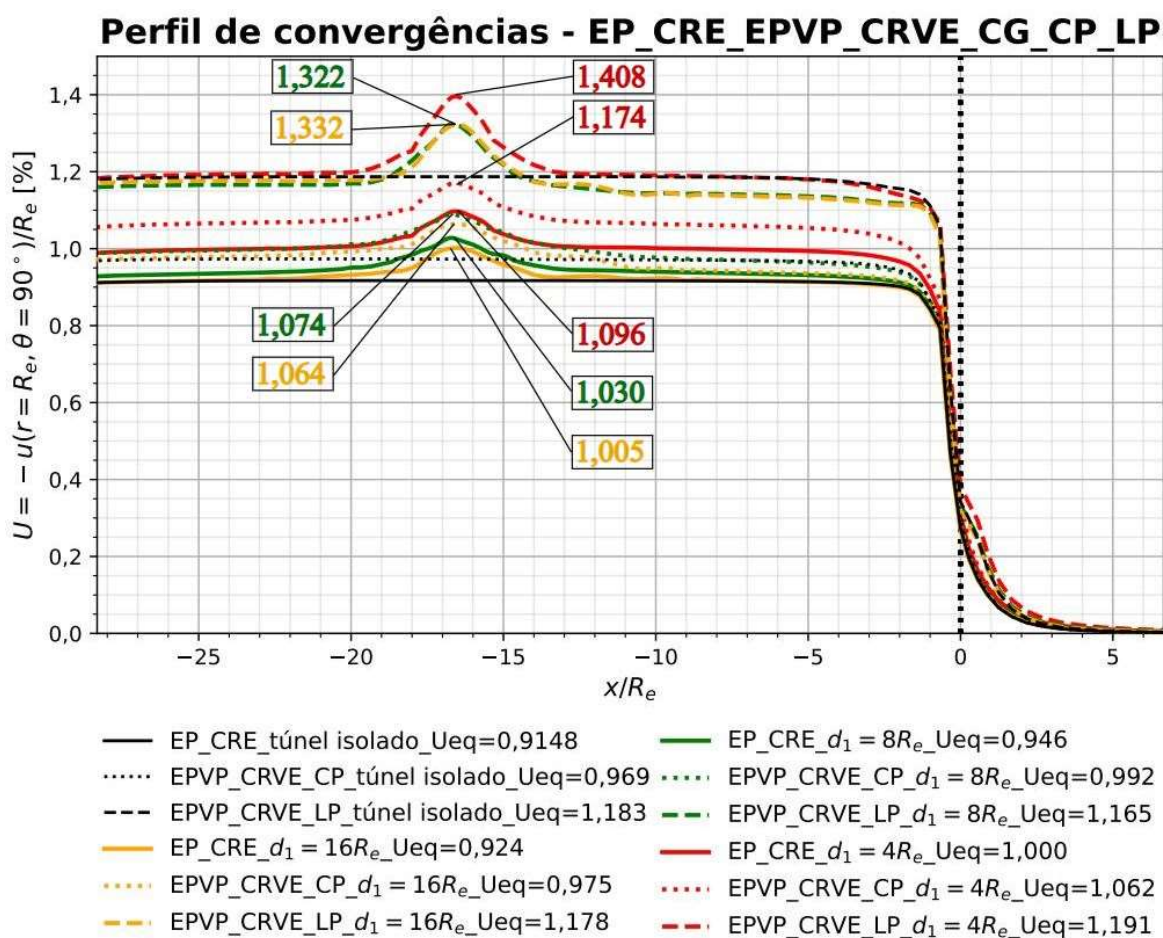
Além disso, na análise da Figura 93 e da Figura 94, um aspecto que merece destaque, direcionado a todos os modelos, relaciona-se à tendência, no CP, onde os efeitos viscosos ainda são pequenos, de translação praticamente uniforme em todo o perfil conforme a proximidade dos túneis tende a diminuir. Contudo, no longo prazo pode-se notar o efeito do tempo, fazendo

com que os perfis relacionados a 16 e 8 raios se aproximem, enquanto o perfil relativo a 4 raios apresente um maior valor de convergência devido à interação da proximidade entre os túneis gêmeos somada ao efeito viscoso.

Nota-se, também, que o efeito no trecho anterior à galeria no patamar do perfil de convergências aparece de forma mais evidente no modelo EPVP CRVE para $d_1 = 8R_e$ e $16R_e$ (linhas pontilhadas na Figura 94). Esse efeito é devido ao comportamento viscoelástico do revestimento, que ao contrário do revestimento elástico de elevada rigidez, tende a permitir a evolução da convergência enquanto ocorre a escavação da galeria. Logo, os valores no patamar antes da região da galeria tendem a ser superiores aos valores no patamar após a galeria.

A partir da Figura 95 é possível identificar a importante contribuição do revestimento viscoelástico no perfil de convergências dos túneis.

Figura 95 – Comparativo dos perfis de convergências dos túneis gêmeos com galeria: maciço elastoplástico com revestimento elástico e elastoplástico-viscoplastico com revestimento viscoelástico no curto e longo prazo



Fonte: o autor (2023).

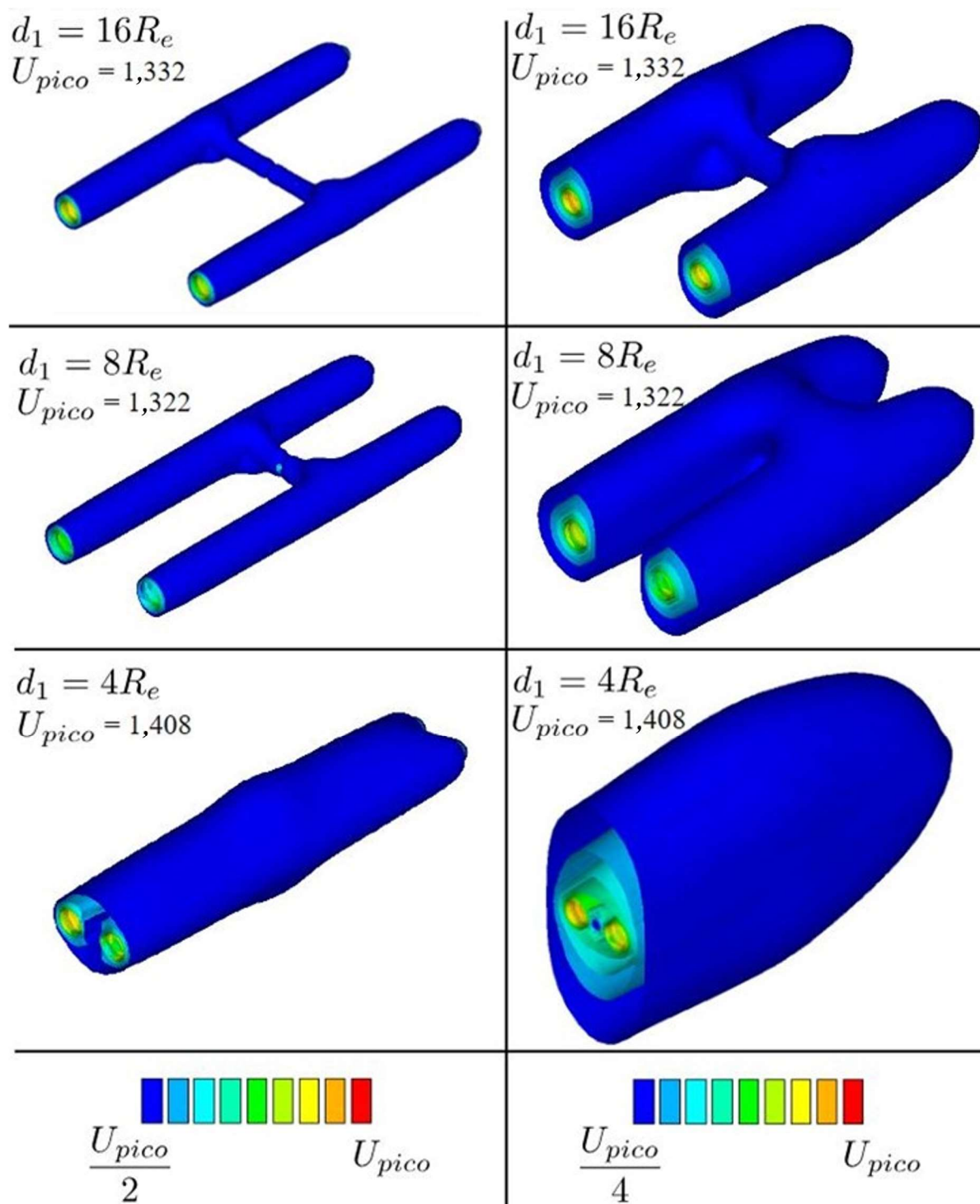
No curto prazo (CP), observa-se que o modelo elastoplástico-viscoplástico (EPVP) com revestimento viscoelástico (CRVE) já apresenta valores de convergência superiores ao modelo elastoplástico (EP) com revestimento elástico (CRE). Como o revestimento viscoelástico (CRVE) apresenta, no início da instalação, valor de módulo de elasticidade menor em relação ao final da escavação e ao final dos efeitos viscosos, há uma menor rigidez envolvida no curto prazo (CP). Logo, quando comparado ao revestimento elástico (CRE), o menor valor do módulo de elasticidade inicial terá uma maior contribuição no desenvolvimento da convergência.

No longo prazo (LP), embora o revestimento viscoelástico (CRVE) possua uma maior rigidez, relacionada a um maior valor de módulo de elasticidade, devido aos efeitos viscosos da fluência, que evoluem ao longo do tempo, o perfil de convergências tende a ser significativamente mais discrepante em relação ao perfil do modelo elastoplástico (EP) com revestimento elástico (CRE). Neste caso, em relação ao revestimento viscoelástico, há um somatório da contribuição do menor valor do módulo de elasticidade no curto prazo (CP) com os efeitos relacionados à fluência no longo prazo (LP), fazendo com que a diferença em relação ao revestimento elástico seja maior.

Por fim, para se ter uma ideia qualitativa da extensão dos efeitos no interior do maciço, ilustra-se as isosuperfícies de deslocamentos na Figura 96. O valor de referência utilizado corresponde ao valor da convergência no pico (U_{pico}). Assim, apresenta-se a superfície azul equivalente à metade e a 1/4 deste valor de referência.

Chama-se a atenção para a interação entre os túneis quando $d_1 = 4R_e$, onde a isosuperfície $\frac{U_{pico}}{2}$ acaba englobando os dois. Pode-se observar também o efeito localizado da galeria, destacada pela região mais pronunciada na ligação com o túnel longitudinal. Além disso, nota-se que em $d_1 = 4R_e$ na direção y os deslocamentos se estenderam mais do que na direção x .

Figura 96 – Isosuperfícies dos deslocamentos para o modelo EPVP CRVE CG LP

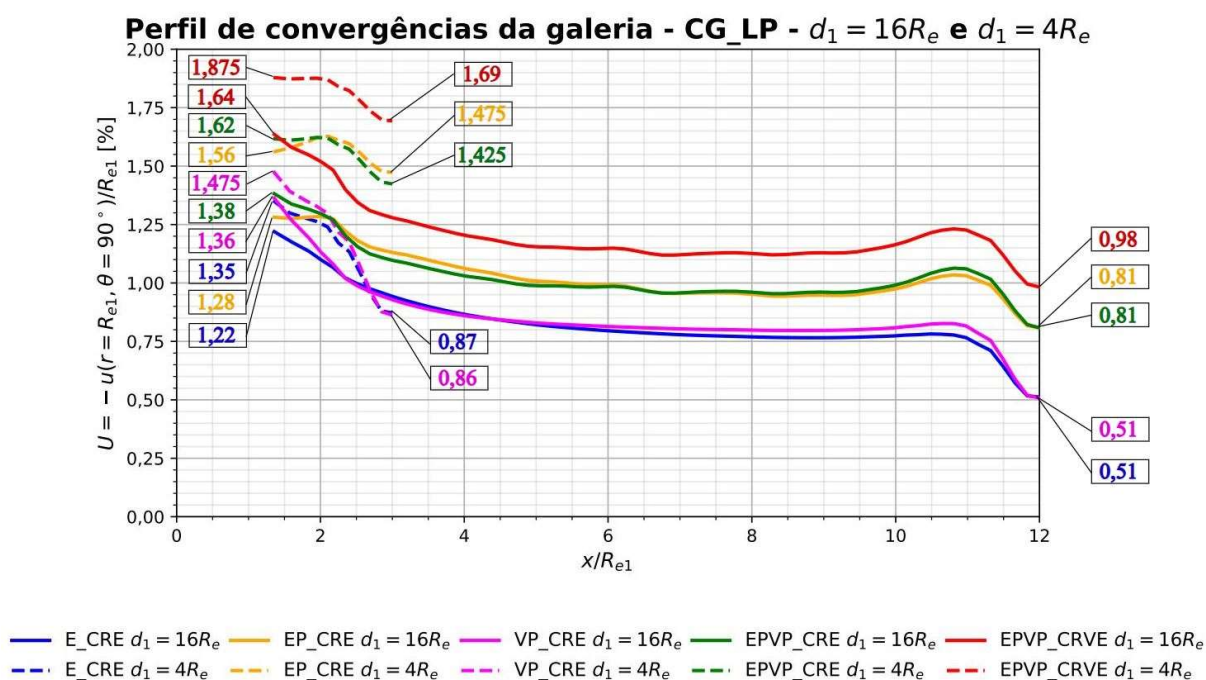


Fonte: o autor (2023).

7.4 ANÁLISES DO PERFIL DE CONVERGÊNCIA DA GALERIA TRANSVERSAL CONSIDERANDO DIVERSOS MODELOS CONSTITUTIVOS

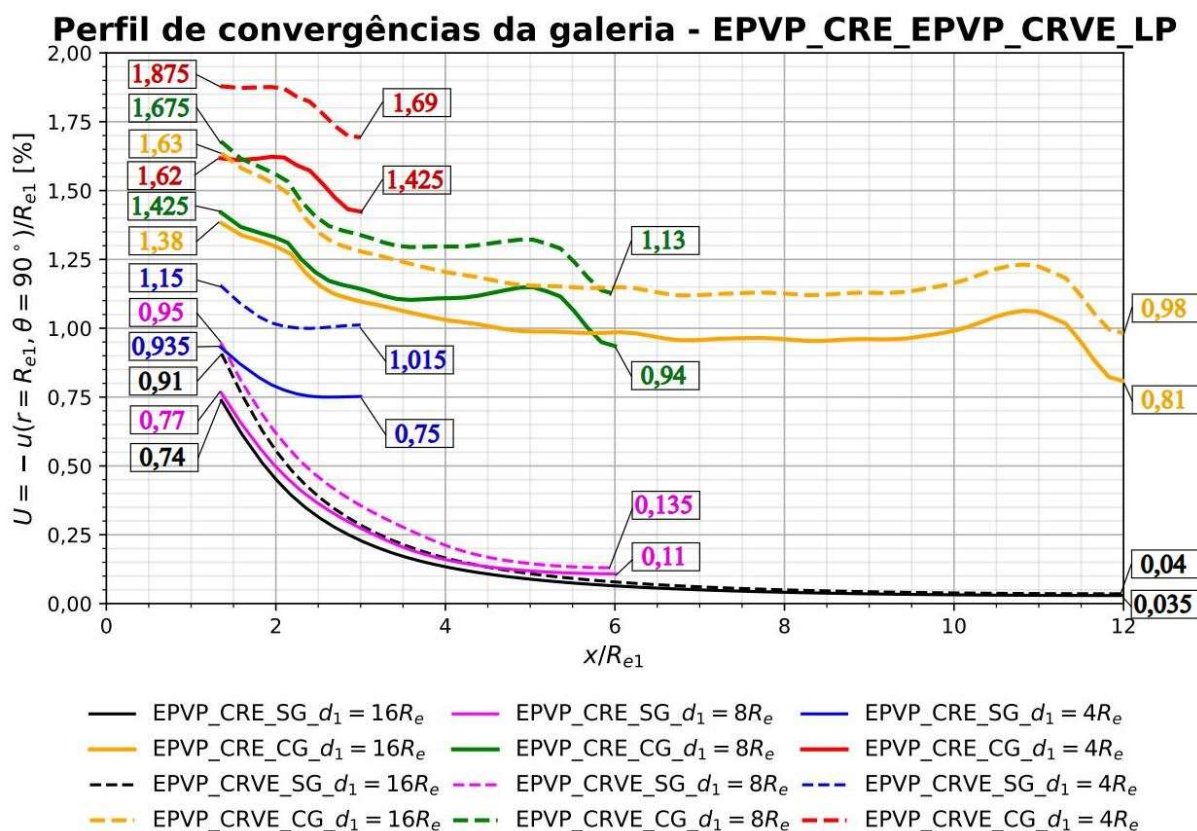
Essa etapa do estudo direciona-se a uma análise sucinta do comportamento do perfil de convergências da galeria transversal, levando em consideração os diferentes modelos constitutivos do maciço e do revestimento, de modo a identificar os pontos mais importantes observados a partir da interação dos túneis gêmeos. Na Figura 97 busca-se a comparação entre os diferentes modelos constitutivos para $d_1 = 16R_e$ e $d_1 = 4R_e$, enquanto na Figura 98 realiza-se a comparação entre os modelos EPVP CRE e EPVP CRVE, tendo como referência a condição sem a escavação da galeria, para $d_1 = 16R_e$, $8R_e$ e $4R_e$ no longo prazo (LP).

Figura 97 – Resumo dos perfis de convergências da galeria transversal para diferentes modelos constitutivos no longo prazo, considerando $d_1 = 16R_e$ e $d_1 = 4R_e$



Fonte: o autor (2023).

Figura 98 – Perfis de convergências da galeria transversal no longo prazo para os modelos EPVP CRE e EPVP CRVE, considerando $d_1 = 16R_e$, $d_1 = 8R_e$ e $d_1 = 4R_e$



Fonte: o autor (2023).

A partir da Figura 97, observa-se que a proximidade dos túneis gêmeos contribui para a ocorrência de valores maiores de convergência. Logo, ao comparar os perfis dos modelos constitutivos com $d_1 = 16R_e$ e $d_1 = 4R_e$, nota-se uma diferença significativa tanto na extremidade esquerda (ponto de intersecção entre a galeria e o túnel), quanto na extremidade direita (ponto relacionado a metade do comprimento total da galeria).

Há uma notável similaridade nos padrões de convergência entre o modelo E CRE e o VP CRE, assim como entre o modelo EPVP CRE e o EP CRE, com exceção dos valores correspondentes ao ponto de intersecção da galeria com o túnel longitudinal (extremidade esquerda dos perfis). Essa semelhança está possivelmente associada à alta velocidade de escavação. Devido à rapidez do processo de escavação e instalação do revestimento ($V_p = 12,5$ m/dia), o intervalo para o surgimento de efeitos viscosos é bastante reduzido. Isso considerando também as limitações impostas pela rigidez do revestimento a longo prazo. Embora a plastificação ao redor da seção, decorrente do processo de escavação, possa já ter ocorrido, os efeitos viscosos podem não ter se desenvolvido de maneira significativa.

Entretanto, embora haja as proximidades mencionadas em relação aos perfis, verifica-se que na extremidade relacionada ao ponto de intersecção da galeria com o túnel há uma diferença relativa entre os perfis. Esta condição mostra a influência da galeria no perfil de convergências dos túneis longitudinais nesta interface de contato, retratando uma região de descontinuidade.

Em relação à Figura 98, ao comparar os perfis de convergências quando há a escavação da galeria e quando não há a consideração da galeria entre os túneis gêmeos, destaca-se duas interações importantes. A primeira relaciona-se com a proximidade entre os túneis gêmeos, denotando-se os maiores valores para $d_1 = 4R_e$, conforme esperado. A segunda diz respeito à contribuição do revestimento viscoelástico (CRVE) na evolução dos efeitos viscosos ao longo do tempo, que implica em um aumento considerável nos valores das convergências, mesmo existindo a restrição do revestimento.

Ainda em relação aos efeitos do revestimento viscoelástico, conclui-se da Figura 98 que, nos casos em que há a escavação da galeria transversal, os perfis CRVE praticamente sofrem uma transladação ao longo de todo o perfil em relação ao revestimento elástico (CRE), mantendo-se um afastamento praticamente uniforme entre os perfis. A exceção está na extremidade esquerda do perfil, correspondente ao ponto de intersecção da galeria com o túnel, onde há uma diferença maior pelo fato de ter sido o local onde a escavação da galeria iniciou e, portanto, acaba ficando exposta aos efeitos viscosos por um intervalo de tempo superior ao trecho da extremidade direita do perfil.

Por outro lado, no caso dos perfis onde não há a escavação da galeria nota-se uma diferença maior entre os tipos de revestimentos quanto mais próximos estiverem os túneis gêmeos ($d_1 = 4R_e$). O mesmo pode ser observado na extremidade esquerda do perfil para $d_1 = 8R_e$ e $d_1 = 16R_e$, pois a extremidade da direita encontra-se em uma região do maciço mais afastada da escavação da seção do túnel longitudinal, apresentando convergências menores onde não há tanta influência da interação entre os túneis e do processo de escavação.

Em resumo, os perfis de convergências da galeria transversal também sofrem influência da proximidade entre os túneis gêmeos e do revestimento. Pode-se inferir, ainda, que a galeria apresenta os maiores valores de convergência na interface de contato com os túneis gêmeos, conforme esperado.

Vale destacar que a presença do ressalto na extremidade direita dos perfis para $d_1 = 8R_e$ e $d_1 = 16R_e$ pode estar relacionada com a maior distância não revestida decorrente do encontro entre as duas frentes de escavação da galeria, uma vez que seu processo de escavação previsto ocorre

das extremidades (interface da galeria com o túnel) em direção a metade do seu comprimento (centro da galeria). Assim, este trecho maior sem revestimento, mesmo que em um curto intervalo de tempo, pode contribuir para a ocorrência de convergências maiores seguidas de uma queda abrupta após a instalação do revestimento.

Os valores de todas as análises realizadas neste trabalho, tanto para o perfil de convergências dos túneis, quanto para o perfil de convergências da galeria transversal, podem ser encontrados na tabela do Apêndice A.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho consistiu na utilização de um modelo computacional para a realização de análises paramétricas direcionadas à investigação da interação existente entre túneis gêmeos, com ou sem a presença de galeria transversal. Especificamente, o estudo visa compreender o impacto no perfil de convergências do túnel longitudinal, quando há a intersecção com a galeria transversal, além de analisar como a distância entre os túneis longitudinais influencia neste perfil.

Compreende-se a partir das análises o papel fundamental da rigidez do revestimento de concreto no perfil de convergências dos túneis gêmeos. De acordo com o valor desta rigidez, pode-se condicionar a restrição dos efeitos viscosos que tendem a se manifestar ao longo do tempo após o final do processo de escavação.

A existência de um revestimento com uma alta rigidez, como demonstrado neste estudo, tende a atenuar o progresso da convergência e tornar o efeito da galeria localizado. Isso resulta, a partir dos resultados obtidos na condição de túnel isolado para a referência de maciço elastoplástico sem revestimento, em uma redução de cerca de 35% na magnitude da convergência quando se aplica o revestimento elástico ao maciço elastoplástico. Além disso, observa-se uma diminuição de 86% quando o revestimento elástico é aplicado no maciço elastoplástico-viscoplástico e uma redução de 83% quando se emprega o revestimento viscoelástico neste mesmo maciço.

Além disso, é notável o efeito resultante da interação entre os túneis longitudinais quando se considera a proximidade, havendo influência relevante a partir de uma distância de 4 raios. No entanto, em muitos casos, esse efeito pode ser sutil ou quase imperceptível devido à presença de um revestimento altamente rígido. Comparando o maciço elastoplástico, sem revestimento, há um aumento de 30,15% no perfil de convergência na situação em que os túneis estão afastados por $d_1 = 4R_e$. Por outro lado, um afastamento de $d_1 = 16R_e$ equivale a um túnel isolado. Quando $d_1 = 8R_e$ há uma influência mínima com um aumento de aproximadamente 1,64%.

Em modelos que consideram a viscosidade do maciço, o fator tempo desempenha um papel significativo na convergência. Nesse cenário, ao escavar a galeria com um valor de d_1 correspondente a 16 raios, a parcela do túnel já escavada permanece sujeita aos efeitos viscosos por um período mais prolongado em comparação com outras configurações de d_1 . Isso permite

uma evolução mais substancial dos efeitos físicos da convergência ao longo do tempo. De qualquer maneira, quando d_1 é igual a 4 raios, a interação da proximidade entre os túneis gêmeos, juntamente com os efeitos viscosos ao longo do tempo, resulta em um valor mais elevado quando comparado aos casos em que d_1 é igual a 16 e 8 raios.

Uma outra observação importante, relacionada aos modelos EPVP CRE e EPVP CRVE, diz respeito à possível ovalização da seção ao longo do tempo, em relação ao ponto de referência analisado no perímetro da seção (na coroa). Em vez de seguir a lógica de acompanhar o sentido de fechamento da seção, ele pode sofrer algum deslocamento negativo no longo prazo. O resultado, para um mesmo ponto de observação, é um valor de convergência que no curto prazo pode estar indicando fechamento da seção, mas no longo prazo pode indicar o contrário.

No que diz respeito ao modelo EPVP CRVE, mais precisamente em relação aos afastamentos de 16 e 8 raios entre os túneis gêmeos, observa-se que a U_{eq} no trecho à frente da região da galeria é ligeiramente menor do que a U_{eq} no trecho que precede a galeria. Essa variação no perfil de convergências é atribuída ao menor tempo de exposição aos efeitos viscosos nas seções do túnel escavadas posteriormente à galeria transversal. Portanto, durante o processo de escavação da galeria, a porção do túnel longitudinal escavada já fica sujeita aos efeitos viscosos até que a escavação da galeria esteja concluída. Consequentemente, a área à frente da galeria exibe uma convergência menor devido ao seu menor período de exposição aos efeitos viscosos, em comparação com a seção do túnel anterior à galeria.

Com base nas análises realizadas, pode-se inferir que os efeitos de viscosidade resultantes do revestimento viscoelástico facilitam o desenvolvimento da convergência, ao contrário do revestimento puramente elástico, que devido à alta rigidez, restringiu o perfil de convergências. Além disso, as maiores contribuições para os valores dos perfis de convergência dos túneis são influenciadas principalmente pela existência de revestimento e pela interação entre os túneis gêmeos.

No entanto, quando se trata da existência de galeria transversal, para os parâmetros constitutivos adotados e considerando a existência de revestimento, observa-se que a sua influência é altamente localizada, na ordem de 4 raios para cada lado a partir do seu eixo. Portanto, não há um impacto significativo no restante do perfil de convergências dos túneis, com a exceção do modelo com revestimento viscoelástico, onde há a ocorrência de menores convergências a *posteriori* da galeria. Esta situação relaciona-se ao tempo destinado para o processo de escavação da galeria, no qual o trecho já escavado do túnel fica exposto aos efeitos viscosos,

enquanto a região a *posteriori* da galeria ainda não foi escavado e acaba ficando exposto aos efeitos diferidos no tempo por um período menor.

Como sugestões para desenvolvimentos futuros pode-se citar:

- a) Realizar análises considerando o maciço com comportamento plástico e viscoplástico envolvendo propriedades friccionais;
- b) Considerar revestimentos com rigidez moderada para não atenuar os efeitos da interação entre os túneis gêmeos;
- c) Realizar análises preliminares para identificar os parâmetros fundamentais que controlam a interação entre túneis gêmeos e galeria;
- d) Analisar as deformações de diversos pontos da parede do túnel para caracterizar completamente a deformada;
- e) Analisar mais precisamente a natureza das deformações irreversíveis no maciço ao longo do processo de escavação e interação dos diferentes componentes da estrutura subterrânea;
- f) Estudar a interação dos túneis gêmeos, considerando um processo de escavação não sincronizado.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA E SOUSA, J. N. V. D. **Túneis em maciços terrosos: comportamento e modelação numérica**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 1998.
- ALMEIDA E SOUSA, J. N. V. D. **Projeto de Túneis**. Coimbra: Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, 2005.
- ANSYS INC. **Element Reference**. Canonsburg: ANSYS Inc, 2022.
- AFTES. *Association Française des Tunnels et de L'espace Souterrain*. **Recommandations de l'AFTES: La méthode convergence-confinement**. 2001.
- BARTON, N.; GRIMSTAD, E. Rock mass conditions dictate the choice between NMT and NATM. **Tunnels and Tunnelling Internacional**, Londres, v. 26, p. 39-42. 1994.
- BAZANT, Z. P.; PRASANNAN, S. Solidification theory for concrete creep I: formulation. **Journal of Engineering Mechanics**, Reston, v. 115, n. 8, p. 1691-1703. 1989a. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9399%281989%29115%3A8%281691%29>. Acesso em: 03 set. 2023.
- BAZANT, Z. P.; PRASANNAN, S. Solidification theory for concrete creep II: verification and application. **Journal of Engineering Mechanics**, Reston, v. 115, n. 8, p. 1691-1703. 1989b. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9399%281997%29123%3A11%281195%29>. Acesso em: 03 set. 2023.
- BBT SE. Brenner Base Tunnel European Public Limited. **Project overview**. Bolzano: BBT SE, 2023. Disponível em: <https://www.bbt-se.com/en/tunnel/project-overview/>. Acesso em: 30 set. 2023.
- BENAMAR, I. **Etude des effets différés dans les tunnels profonds**. 1996. Thèse (Doctorat en Ingénierie) – Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Champs-sur-Marne, 1996.
- BERNAUD, D. **Tunnels profonds dans les milieux viscoplastiques: approches expérimentale et numérique**. 1991. Thèse (Doctorat en Ingénierie) – Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Champs-sur-Marne, 1991.
- BERNAUD, D.; ROUSSET, G. La nouvelle méthode implicite pour l'étude du dimensionnement des tunnels. **Revue Française de Géotechnique**, Les Ulis, n. 60, p. 5–26. 1992.
- BERNAUD, D.; BENAMAR, I.; ROUSSET, G. La nouvelle méthode implicite pour le calcul des tunnels dans les milieux élastoplastiques et viscoplastiques. **Revue Française de Géotechnique**, Les Ulis, n. 68, p. 3-19. 1994.
- BIENIAWSKI, Z. T. **Engineering Rock Mass Classifications**. New York: John Wiley & Sons, 1989.

BINGHAM, E. C. **Fluidity and Plasticity**. New York: McGraw-Hill, 1922.

BOWERS, K. H. **An Appraisal of the New Austrian Tunnelling Method in Soil and Weak Rock**. 1997. PhD Thesis – The University of Leeds, Sheffield, 1997.

BRAUN, W. M. Application of the NATM in deep tunnels and difficult formations. **Tunnels & Tunnelling International**, Londres, 2 ed., v. 12, p. 17-20. 1980.

BROWN, E. T. Putting the NATM into perspective. **Tunnels & Tunnelling International**, Londres, 10 ed., v. 13, p. 13-17. 1981.

CAYRO, E. E. P. **Simulação tridimensional de túneis escavados em meios poroelásticos**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

CHEN, W. F.; HAN, D. J. **Plasticity for Structural Engineers**. New York: Springer-Verlag, 1988.

CHORTIS, F., KAVVADAS, M. Three-Dimensional Numerical Analyses of Perpendicular Tunnel Intersections. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 39, p. 1771–1793. 2021a.

CHORTIS, F., KAVVADAS, M. Three-Dimensional Numerical Investigation of the Interaction Between Twin Tunnels. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 39, p. 5559–5585. 2021b.

CHORTIS, F., KAVVADAS, M. **Three-Dimensional numerical investigation of the axial forces acting on tunnel junctions constructed in fractured/weathered to very blocky rockmass**. 2023a. p. 1574-1582. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.1201/9781003348030-188/3d-numerical-investigation-axial-forces-acting-tunnel-junctions-constructed-fractured-weathered-blocky-rockmass-chortis-kavvadas>. Acesso em: 05 set. 2023.

CHORTIS, F., KAVVADAS, M. **Three-Dimensional numerical investigation of the bending moments acting on tunnel junctions constructed in fractured/weathered to very blocky rockmass**. 2023b. p. 1583-1591. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/oa-edit/10.1201/9781003348030-189/3d-numerical-investigation-bending-moments-acting-tunnel-junctions-constructed-fractured-weathered-blocky-rockmass-chortis-kavvadas>. Acesso em: 05 set. 2023.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP Model Code 1990**. London: Thomas Telford, 1993.

CORBETTA, F. **Nouvelles méthodes d'étude des tunnels profonds: calculs analytiques et numériques**. 1990. Thèse (Doctorat en Ingénierie) – Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 1990.

CORMEAU, I. Numerical stability in quasi-static elasto/visco-plasticity. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 109–127. 1975.

COUTO, E. C. **Um modelo tridimensional para túneis escavados em rocha reforçada por tirantes passivos**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DADA, T. W. **Modelagem Numérica de Túneis Gêmeos com Galerias Transversais**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

DEBERNARDI, D.; BARLA, G. New Viscoplastic Model for Design Analysis of Tunnels in Squeezing Conditions. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, [s. l.], v. 42, n. 2, p. 259–288. 2009.

FABBRI, D.; STRASSL, C.; PEGGS, S. Safety doors in the world’s longest tunnel under the Gotthard: Outstanding requirements and performance. Feed-back from the bidding phase and results from the testing phase on selected prototypes. *In*: BARTÁK, J. *et al.* **Underground Space – the 4th Dimension of Metro**. London: Taylor & Francis Group, 2007. p. 1671-1676.

FENNER, R. **Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdrucks**. Essen: Glückauf, 1938. p. 681-695.

FORTSAKIS, P. *et al.* Numerical analysis of twin tunnels interaction. **Proceedings of the 1st Eastern European Tunneling Conference**. Budapest: 2012.

FOWELL, R. J.; BOWERS, K. H. NATM tunnels in the United Kingdom. **Seminar Notes given at The Department of Mining & Mineral Engineering**. Leeds: University of Leeds, 1998.

FRANÇA, P. T. **Estudo do comportamento de túneis: análise numérica tridimensional com modelos elasto-plásticos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

GALLI, G.; GRIMALDI, A.; LEONARDI, A. Three-dimensional modeling of tunnel excavation and lining. **Computers and Geotechnics**, [s. l.], v. 31, p. 171-183. 2004.

GKIKAS, V., NOMIKOS, P. **The importance of axisymmetric simulations for the estimation of tunnel support pressure for sequentially supported deep tunnels**. [S. l.]: CRC Press, 2023.

GOLSER, J. Another view of the NATM. **Tunnels and Tunnelling Internacional**, Londres, v. 11, p. 41. 1979.

GRIMSTAD, E.; BARTON, N. Updating the Q-System for NMT. **Proc. int. symp. on sprayed concrete - modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fagernes**. Oslo: Norwegian Concrete Assn, 1993. p. 46-66.

GUO, Z.; LIU, X.; ZHU, Z. An elastic solution for twin circular tunnels’ stress in hydrostatic stress field. **Geotechnical and Geological Engineering**, [s. l.], v. 39, p. 4253-4263. 2021.

HAGENHOFER, F. NATM for tunnels with high overburden. **Tunnels and Tunnelling**

Internacional, Londres, v. 22, p. 51-52. 1990.

HSE. *Health and Safety Executive*. Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels, A review of sprayed concrete tunnels with particular reference to London Clay. (HSE) Books, Sudbury, 1996.

HOEK, E.; BROWN, E. T. **Underground Excavations in Rock**. London: CRC Press, 1980.

HOEK, E.; KAISER, P. K.; BAWDEN, W. F. **Support of Underground Excavations in Hard Rock**. Netherlands: A. A. Balkema, 1995.

IFTIMIE, T. **Contributions to the concept and structural analysis of precast circular linings for shield driven tunnels**. 1996. Thèse (Doctorat en Ingénierie) – Technical university of civil engineering Bucharest, Bucarest, 1996.

ICE. *Institution of Civil Engineers*. Sprayed Concrete Linings (NATM) for tunnels in soft ground. **ICE design and practice guide**. London: Thomas Telford, 1996.

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

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J-L. Mechanics of solid materials. Tradução: B. Shrivastava. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

LUNARDI, P. Conception et exécution des tunnels: rôle et résultats de la recherche expérimentale. **Revue Française de Géotechnique**, [s. l.], n. 84, p. 49-64. 1998.

MA, Y. *et al.* Analytical solution for determining the plastic zones around twin circular tunnels excavated at great depth. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Sivas, v. 136. 2020.

PACHER, F. Deformationsmessungen im Versuchsstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsverhaltens und zur Bemessung des Ausbaues. *In*: MÜLLER, L.; FAIRHURST, C. **Grundfragen auf dem Gebiete der Geomechanik - Principles in the Field of Geomechanics**. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1964. p. 149–161.

PALMSTRÖM, A. O novo método austríaco de escavação de túneis. **Anais da Conferência técnica de detonação de rochas, mecânica das rochas e Geotecnia**, Oslo, Instituto Geotécnico Norueguês, p. 31.1-31.20. 1993. Disponível em: http://rockmass.net/ap/39_Palmstrom_on_NATM.pdf. Acesso em: 01 set. 2023.

PANET, M.; GUELLEC, P. Contribution à l'étude du soutènement derrière le front de taille. **3rd Congress ISRM**, Denver, v. 2. 1974.

PANET, M.; GUÉNOT, A. Analysis of convergence behind the face of a tunnel. Tunnelling 82, **Proceedings of the 3rd International Symposium**, Brighton, 1982. p. 197–204.

PANET, M. **Le calcul des Tunnels par la méthode Convergence-Confinement**. Paris: Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 1995.

PERZYNA P. Fundamental problems in viscoplasticity. **Advances in Applied Mechanics**, [s. l.], vol. 9. 1966.

PIEPI, G. T. **Comportement viscoplastique avec rupture des argiles raides: applications aux ouvrages souterrains**. 1995. Thèse (Doctorat en Ingénierie) – Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.

POTTS, D. M.; ZDRAVKOVIC, L. **Finite element analysis in geotechnical engineering: theory**. London: Thomas Telford, 1999.

QUEVEDO, F. P. D. M. **Comportamento a longo prazo de túneis profundos revestidos com concreto: modelo em elementos finitos**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

QUEVEDO, F. P. M. *et al.* Customização de um programa de elementos finitos para análise de estruturas de concreto: efeitos de longa duração. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 11, n. 4. 2018.

QUEVEDO, F. P. M.; BERNAUD, D.; CAMPOS FILHO, A. Numerical Analysis of twin tunnels including long-term effects considering the creep and shrinkage of concrete. **Anais do CILAMCE XLI: Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Métodos Computacionais em Engenharia, 2020. Disponível em: <https://cilamce.com.br/anais/index.php?ano=2020>. Acesso em: 06 set. 2023.

QUEVEDO, F. P. D. M. **Análise computacional das deformações em túneis profundos considerando o acoplamento plasticidade-viscoplasticidade**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

QUEVEDO, F. P. M.; BERNAUD, D.; CAMPOS FILHO, A. Numerical Analysis of Deep Tunnels in Viscoplastic Rock Mass Considering the Creep and Shrinkage of the Concrete Lining. **International Journal of Geomechanics**, [s. l.], v. 22, n. 4. 2022.

RABCEWICZ, L. v. The New Austrian Tunnelling Method: part one. **Water Power**, Londres, v. 16, n. 11, p. 453–457. 1964a.

RABCEWICZ, L. v. The New Austrian Tunnelling Method: part two. **Water Power**, Londres, v. 16, n. 12, p. 511–515. 1964b.

RABCEWICZ, L. v. The New Austrian Tunnelling Method: part two. **Water Power**, Londres, v. 17, n. 1, p. 19–24. 1965.

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

RACHINHAS, B. C. **Simulação computacional do processo construtivo da estrutura de edifícios em concreto armado**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

ROCHA, M. **Mecânica das Rochas**. Lisboa: LNEC, 1971.

ROUSSET, G. **Comportement Mécanique des Argiles Profondes**: application au stockage de déchets radioactifs. 1988. Thèse (Doctorat en Ingénierie) – L’Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1988.

SÃO PAULO. Secretaria dos Transportes. Departamento de Estradas de Rodagem. **Instrução de Projeto**. Projeto de Túnel. [IP-DE-C00/002]. São Paulo: Departamento de Estradas de Rodagem, 2005. Disponível em: http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/normas/IP-DE-C00-002_A.pdf. Acesso em: 30 set. 2023.

SAUER, G. Further insights into the natm. when an invention is something new: from practice to theory in tunnelling. **Tunnels and Tunnelling Internacional**, Londres, v. 20, n. 7, p. 35–39. 1988.

SHAHROUR, I.; GHORBANBEIGI, S. Analyse tridimensionnelle du comportement des tunnels dans des terrains meubles. **Révue Française de Géotechnique**, [s. l.], n. 76, p. 17-24. 1996.

SILVEIRA, E. B.S. Metrô e Túneis em Solos. **Relato do Tema II do V Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, São Paulo, v. 3, 24-96. 1974.

SOUZA NETO, E. A. de; PERIC´, D.; OWEN, D. R. J. **Computational Methods for Plasticity**: Theory and Applications. Chichester: John Wiley and Sons, 2008.

SPYRIDIS, P., BERGMEISTER, K. Analysis of lateral openings in tunnel linings. **Tunnelling and Underground Space Technology**, [s. l.], v. 50, p. 376-395. 2015.

WALLIS, S. First principles of NATM. **World Tunnelling**, Barcelona, v. 8, p. 197-200. 1995a.

WALLIS, S. NATM challenge at the Montemor tunnel. **Tunnels & Tunnelling**, Londres, v. 27, p. 32-34. 1995b.

WILL, M. Excavation of Large cross section tunnels in accordance with the basic principles of “New Austrian Tunnelling Method” (N.A.T.M.) with particular regard for the use of Boom-Type tunnelling machines. Second International Tunnelling Symposium, **World Tunnelling**, Munich, p. 51-55. 1989.

ZIENKIEWICZ O.C., CORMEAU I.C. Visco-plasticity and creep in elastic solids: a unified numerical solution approach. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 821–845. 1974.

APÊNDICE A – PLANILHA RESUMO COM OS RESULTADOS DAS ANÁLISES

ANÁLISES PARAMÉTRICAS											
PARÂMETROS				ETAPA	RESULTADOS CONVERGÊNCIA						TEMPO DE ANÁLISE
TIPO DE MACIÇO	TIPO DE REVESTIMENTO	GALERIA	AFASTAMENTO TÚNEIS LONGITUDINAIS - d1		3D DUPLO		variação em relação ao túnel isolado	GALERIA			
					Ueq	Upico		EXT. ESQUERDA	CENTRO	EXT. DIREITA	
E	CRE	SG	túnel isolado	-	0.7181	-	-	-	-	-	2min
			16*raio	-	0.724	-	0.8216%	0.7398	0.044	0.022	4h 23min
			8*raio	-	0.74	-	3.0497%	0.754	0.136	0.087	3h 18min
		4*raio	-	0.795	-	10.7088%	0.831	0.398	0.3088	1h 38min	
		CG	16*raio	-	0.724	0.829	0.8216%	1.1836	0.7821	0.5183	5h 43min
			8*raio	-	0.7406	0.842	3.1333%	1.2008	0.934	0.6078	5h 37min
4*raio	-		0.7932	0.8894	10.4582%	1.307	1.2343	0.871	2h 39min		
EP	CRE	SG	túnel isolado	-	0.9148	-	-	-	-	-	2min
			16*raio	-	0.92125	-	0.7051%	0.8597	0.051	0.0255	7h 40min
			8*raio	-	0.935	-	2.2081%	0.8594	0.1748	0.1081	5h 28min
		4*raio	-	1.0004	-	9.3572%	0.9923	0.618	0.4514	2h 39min	
		CG	16*raio	-	0.9248	1.0054	1.0931%	1.284	0.9496	0.8092	9h 2min
			8*raio	-	0.946	1.0305	3.4106%	1.3095	1.151	0.9846	5h 54min
4*raio	-		1.0004	1.096	9.3572%	1.4522	1.6276	1.4717	2h 39min		
EP	SR	SG	túnel isolado	-	1.406	-	-	-	-	-	1min 51s
			16*raio	-	1.407	-	0.0711%	1.3667	0.082	0.041	6h 43min
			8*raio	-	1.42925	-	1.6536%	1.42375	0.272	0.1615	5h 11min
		4*raio	-	1.83	-	30.1565%	2.3126	1.8973	1.8	2h 12min	
		CG	16*raio	-	1.425	1.6445	1.3514%	2.181	1.6325	1.463	8h 42min
			8*raio	-	1.4392	1.6794	2.3613%	2.2702	2.0118	1.8758	5h 52min
4*raio	-		1.8452	2.045	31.2376%	3.058	3.115	3.172	2h 33min		
EPVP	CRE	SG	túnel isolado	LONGO PRAZO	0.9676	-	-	-	-	-	2min 20s
				TÉR.M. ESC.	0.9145	-	-	-	-	-	-
			16*raio	LONGO PRAZO	0.968	-	0.0413%	0.9135	0.055	0.0275	7h 50min
				TÉR.M. ESC.	0.92	-	0.6014%	0.9135	0.055	0.0275	-
			8*raio	LONGO PRAZO	0.9724	-	0.4961%	0.9018	0.189	0.108	6h 18min
				TÉR.M. ESC.	0.9414	-	2.9415%	0.9018	0.189	0.108	-
		CG	4*raio	LONGO PRAZO	0.9856	-	1.8603%	1	0.778	0.748	2h 58min
				TÉR.M. ESC.	0.998	-	9.1307%	0.994	0.6167	0.455	-
			16*raio	LONGO PRAZO	0.9722	1.0717	0.4754%	1.3921	0.9585	0.8164	9h 43min
				TÉR.M. ESC.	0.9188	1.0056	0.4702%	1.2668	0.9585	0.8164	-
			8*raio	LONGO PRAZO	0.9718	1.0814	0.4341%	1.404	1.106	0.936	6h 21min
				TÉR.M. ESC.	0.9376	1.027	2.5260%	1.293	1.1485	0.987	-
CG	4*raio	LONGO PRAZO	0.9787	1.143	1.1472%	1.5192	1.6168	1.4222	2h 52min		
		TÉR.M. ESC.	1	1.1004	9.3494%	1.461	1.6168	1.4707	-		
EPVP	SR	SG	túnel isolado	LONGO PRAZO	6.886	-	389.7582%	-	-	-	2min 9s
				TÉR.M. ESC.	1.428	-	-	-	-	-	-
VP	CRE	SG	túnel isolado	LONGO PRAZO	0.7849	-	-	-	-	-	1min 34s
				TÉR.M. ESC.	0.7191	-	-	-	-	-	-
			16*raio	LONGO PRAZO	0.7878	-	0.3695%	0.8086	0.048	0.024	5h 22min
				TÉR.M. ESC.	0.7218	-	0.3755%	0.7414	0.0408	0.024	-
			8*raio	LONGO PRAZO	0.7997	-	1.8856%	0.8177	0.1607	0.09	4h 6min
				TÉR.M. ESC.	0.7458	-	3.7130%	0.754	0.146	0.0882	-
		CG	4*raio	LONGO PRAZO	0.8095	-	3.1342%	0.8597	0.5868	0.566	2h 3min
				TÉR.M. ESC.	0.797	-	10.8330%	0.8342	0.4016	0.309	-
			16*raio	LONGO PRAZO	0.785	0.9362	0.0127%	1.306	0.8079	0.5146	9h 48min
				TÉR.M. ESC.	0.729	0.8354	1.3767%	1.184	0.7836	0.5146	-
			8*raio	LONGO PRAZO	0.7992	0.9402	1.8219%	1.366	0.9192	0.5882	4h 27min
				TÉR.M. ESC.	0.7432	0.844	3.3514%	1.2005	0.9356	0.6046	-
CG	4*raio	LONGO PRAZO	0.8074	0.9773	2.8666%	1.454	1.2858	0.8722	2h 7min		
		TÉR.M. ESC.	0.7958	0.8896	10.6661%	1.277	1.233	0.881	-		
EPVP	CRVE	SG	túnel isolado	LONGO PRAZO	1.1836	-	-	-	-	-	1m 47s
				TÉR.M. ESC.	0.9696	-	-	-	-	-	-
			16*raio	LONGO PRAZO	1.1816	-	-0.1690%	1.1246	0.067	0.0335	8h 18min
				TÉR.M. ESC.	0.9772	-	0.7838%	0.909	0.0469	0.0268	-
			8*raio	LONGO PRAZO	1.1669	-	-1.4109%	1.1139	0.267	0.133	6h 4min
				TÉR.M. ESC.	0.994	-	2.5165%	0.9139	0.1799	0.1198	-
		CG	4*raio	LONGO PRAZO	1.19325	-	0.8153%	1.2328	1.0038	1.0111	2h 55min
				TÉR.M. ESC.	1.0628	-	9.6122%	1.0626	0.6936	0.5392	-
			16*raio	LONGO PRAZO	1.1785	1.3324	-0.4309%	1.677	1.125	0.984	10h 25min
				TÉR.M. ESC.	0.975	1.0642	0.5569%	1.3454	1.004	0.8838	-
			8*raio	LONGO PRAZO	1.1653	1.322	-1.5461%	1.68	1.2979	1.127	6h 46min
				TÉR.M. ESC.	0.992	1.074	2.3102%	1.3484	1.2272	1.0767	-
CG	4*raio	LONGO PRAZO	1.1918	1.4081	0.6928%	1.7927	1.8718	1.7023	3h 30min		
		TÉR.M. ESC.	1.0628	1.1746	9.6122%	1.5564	1.7249	1.6126	-		

Considerando processador Intel@Xeon®CPU E5-2697 v3 @ 2.60GHz (14 núcleos, 28 threads) com memória RAM DDR4 64GB. Para a configuração do ANSYS referente a computação de alta performance foi utilizado paralelização SMP (Shared-Memory Parallel) com 24 threads.