# 7 Simulações tridimensionais de elementos finitos

## Esta seção fornece alguns resultados numéricos relacionados à deformação de rochas em túneis gêmeos com galeria transversal obtidos a partir do modelo computacional 3D apresentado nas seções 3, 4 e 5. Ressalta-se que o objetivo principal aqui é ilustrar as capacidades da formulação proposta para abordar dentro de um contexto 3D a configuração de uma estrutura de túnel complexa envolvendo acoplamentos não lineares e dependentes do tempo. A realização de uma análise paramétrica exaustiva integrando os efeitos de parâmetros geométricos, constitutivos e de carga está notavelmente além do escopo da aplicação numérica.

## 7.1 Dados do modelo e considerações preliminares

Os dados constitutivos da rocha usados na análise subsequente referem-se a uma argila profunda da bacia oriental de Paris (região de Aisne, França) estudada em [18,20,22,37]. As propriedades do material, incluindo parâmetros elastoplásticos e viscoplásticos, estão resumidas na Tabela [2.](#table2) foram avaliados e calibrados a partir de uma extensa série de testes de laboratório realizados em condições não drenadas [18,22,37] . As rochas argilosas de Aisne apresentam alta densidade (2,01 a 2,57 g/cm ), baixo teor médio de água (entre 3 a 11%) e porosidade relativamente baixa (tipicamente menor que 20%). Portanto, supõe-se que o acoplamento hidromecânico pode ser negligenciado na análise da deformação do material rochoso. Em particular, os testes de fluência indicaram que os efeitos de longo prazo decorrem principalmente da viscosidade do material, com uma proporção muito baixa induzida pela redistribuição da pressão dos poros . Uma característica importante do comportamento dessa argila é que tensões irreversíveis são observadas em testes cíclicos mesmo em pequenos valores de tensão axial (menos de 0,3% ). Os testes triaxiais instantâneos não drenados realizados em altos valores de pressão confinante, como aqueles prevalecentes na massa rochosa a aproximadamente 450 m de profundidade, indicaram que a tensão desviatória máxima permanece aproximadamente constante, sugerindo assim um critério de falha do tipo Tresca para o componente de curto prazo do comportamento . Quanto ao comportamento de longo prazo, os testes de fluência revelaram que o limite de tensão desviatória além do qual o material exibe deformação por fluência é quase independente da tensão média , sugerindo que o componente de comportamento dependente do tempo pode ser convenientemente descrito por um critério semelhante ao de Tresca. A comparação dos comportamentos instantâneo e retardado revela que a coesão de curto prazo excede a coesão de longo prazo dentro de uma proporção que varia entre 1,2 e 2. Com base nessas observações, os dados do modelo constitutivo adotados para os componentes elastoplástico e viscoplástico do comportamento do material rochoso são resumidos na Tabela [2](#table2) .

A Tabela [2](#table2) também apresenta os parâmetros constitutivos usados para o revestimento usado para os túneis gêmeos e galeria, o módulo de relaxamento instantâneo sob tensão uniaxial em 28 dias sendo referido como . Nas análises que consideram o comportamento elástico do revestimento, o módulo elástico do concreto é definido como igual a . Quando o comportamento viscoelástico é adotado para o revestimento, o módulo de relaxamento evolui no tempo de acordo com o modelo Kelvin Generalizado descrito na seção 4, enquanto a razão de Poisson é assumida como constante dentro do intervalo de tempo da análise. Durante o processo de construção do túnel, o carregamento e a fluência de cada segmento de revestimento começam a partir do momento em que é ativado com propriedades na idade dia, enquanto os efeitos de retração são assumidos como ocorrendo na idade dias.

Tabela 2 Parâmetros constitutivos utilizados nas análises numéricas .

| PARÂMETROS | SÍMBOLO | UNIDADE | VALORES |
| --- | --- | --- | --- |
| Modelo constitutivo do maciço rochoso | | | |
| Módulo de Young |  | MPa |  |
| Coeficiente de Poisson |  | - |  |
| Coesão plástica |  | MPa | 4 |
| Ângulo de atrito plástico |  |  | 0 |
| Coesão viscoplástica |  | MPa | 2 |
| Ângulo de atrito viscoplástico |  |  | 0 |
| Parâmetro da lei de potência |  | - | 1 |
| Parâmetro de referência |  | MPa | 1 |
| Coeficiente de viscosidade |  | dia |  |
| Modelo constitutivo do revestimento | | | |
| Resistência à compressão característica aos 28 dias de idade |  | MPa |  |
| Módulo de elasticidade aos 28 dias de idade |  | MPa |  |
| Coeficiente de Poisson |  | - |  |
| Coeficiente que define o módulo de relaxamento instantâneo [27] |  | - |  |
| Humidade relativa do ambiente |  | % |  |
| Tamanho nominal do elemento - revestimento longitudinal de concreto |  | cm |  |
| Tamanho nominal do membro - revestimento de concreto da galeria |  | cm |  |
| Idade do concreto no início da retração |  | dias |  |
| Coeficiente de retração em função do tipo de cimento [27] |  | - |  |
| Temperatura |  | C |  |
| Idade do concreto no carregamento |  | dias |  |

Os parâmetros que definem a geometria da estrutura, bem como o processo de escavação e instalação do revestimento são fornecidos na Tabela 1. [Todos](#table1) os parâmetros de comprimento são normalizados pelo raio do túnel , o que equivale a considerar formalmente o raio m nas simulações numéricas. Conforme mencionado na Tabela [1](#table1) , três valores diferentes devem ser considerados nas simulações para a distância entre os eixos dos túneis gêmeos, a saber , , e . Além disso, valores constantes das taxas de avanço do túnel e da galeria são considerados e fixados em é fixado em . No que diz respeito ao estado de tensão inicial prevalecente antes dos processos de escavação, a distribuição de tensão hidrostática com MPa, correspondente às condições geostáticas em profundidades de cerca de 450 m, é adotada nas simulações subsequentes.

O estudo numérico investiga os perfis de convergência de túneis de longo e curto prazo considerando vários modelos constitutivos para a massa rochosa (elástico, elastoplástico, viscoplástico ou elastoplástico- viscoplástico ) e para o revestimento (elástico e viscoelástico). Para fins de comparação, a configuração do túnel não revestido, bem como as configurações com ou sem galeria transversal também serão analisadas . Para facilitar a descrição das diferentes configurações abordadas abaixo, a Tabela [3](#table3) fornece a lista de cada configuração, bem como a abreviação associada usada para se referir na apresentação de resultados numéricos.

Tabela 3 Configurações e abreviações associadas usadas em simulações numéricas .

| DESCRIÇÃO | ABREVIAÇÃO |
| --- | --- |
| Massa rochosa elástica | E |
| Massa rochosa elastoplástica | EP |
| Massa rochosa elastoviscoplástica | vice-presidente |
| Elastoplástico - Massa rochosa viscoplástica | EPVP |
| Sem forro | Inglês: |
| Forro elástico | EL |
| Forro viscoelástico | VEL |
| Longo prazo | LT |
| Fim do processo de escavação (curto prazo) | ST |
| Com galeria | GT |
| Nenhuma galeria | NG |

Denotando por o componente de deslocamento ao longo da vertical eixo y, todos os resultados apresentados nas análises a seguir se referirão especificamente à convergência perfil que caracteriza o movimento para dentro do teto do túnel em função da distância longitudinal algébrica normalizada da face da escavação. Além disso, o ponto foi escolhido como representativo da convergência de equilíbrio bem atrás da face do túnel e da galeria transversal y . Quando a galeria intercepta o túnel longitudinal, o maior valor de convergência destacado nos gráficos das curvas de convergência se refere ao ponto localizado no teto da seção longitudinal do túnel situada na intersecção com a galeria transversal .

A primeira característica da deformação do túnel a ser mencionada está relacionada à anisotropia de deformação do túnel (ou ovalização ) induzida pela proximidade dos túneis gêmeos. Um único túnel circular escavado em uma massa rochosa isotrópica homogênea com estado de tensão inicial hidrostática se deformará simetricamente de modo que a forma circular da parede do túnel será preservada durante todo o processo de escavação . Como já apontado nas simulações numéricas preliminares apresentadas na seção 6, a interação mútua associada à proximidade dos túneis gêmeos resultará, em contraste, na deformação anisotrópica da parede do túnel, sendo o efeito de ovalização mais pronunciado à medida que a distância entre os eixos dos túneis gêmeos diminui . Para fins ilustrativos, A Fig. [21](#Ovalization effect and monitoring point) apresenta gráficos esquemáticos da parede deformada do túnel bem atrás da face, juntamente com a trajetória do ponto de monitoramento B, considerando três valores diferentes de espaçamento normalizado de túnel duplo . A configuração mostrada nesta figura corresponde à massa rochosa elastoplástica (EP), revestimento elástico (EL) e galeria transversal (WG). Deve-se, no entanto, ter em mente que, devido à ovalização do túnel , não seria suficiente para caracterizar toda a deformação da parede do túnel.

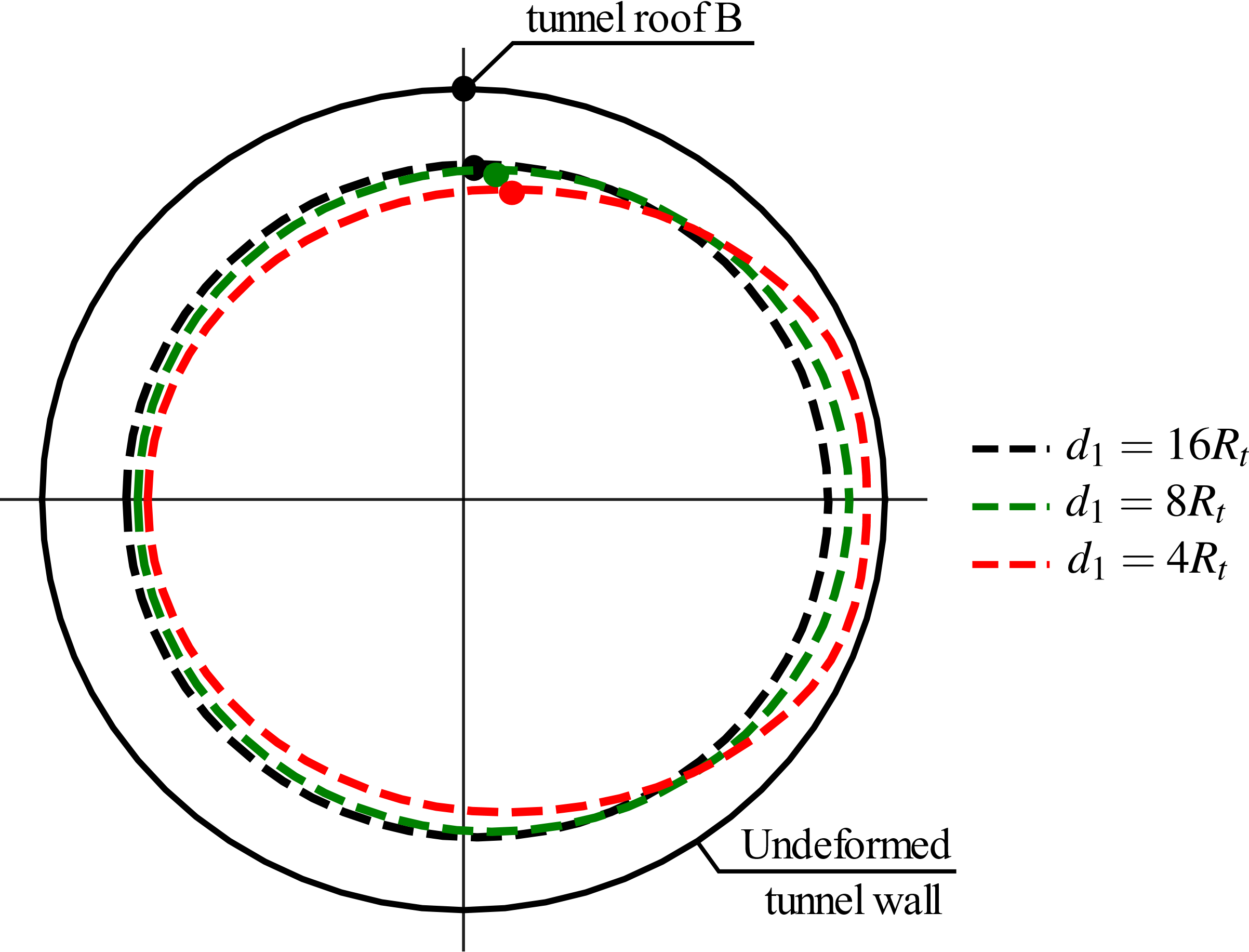


Figura 21: Ilustração da anisotropia de deformação induzida pela proximidade de túneis gêmeos .

A segunda característica da deformação do túnel que merece ser mencionada refere-se aos padrões de deformação específicos prevalecentes na região que circunda a parede do túnel. Em consistência com dados experimentais, a coesão plástica e a coesão viscoplástica relatado na Tabela [2](#table2) cumpre com a condição > . Isso implica notavelmente que tensões viscoplásticas irreversíveis serão ativadas mais cedo conforme a escavação do túnel. A representação esquemática dos padrões de deformação dentro da massa rochosa é ilustrada na Fig. [22](#zones) .

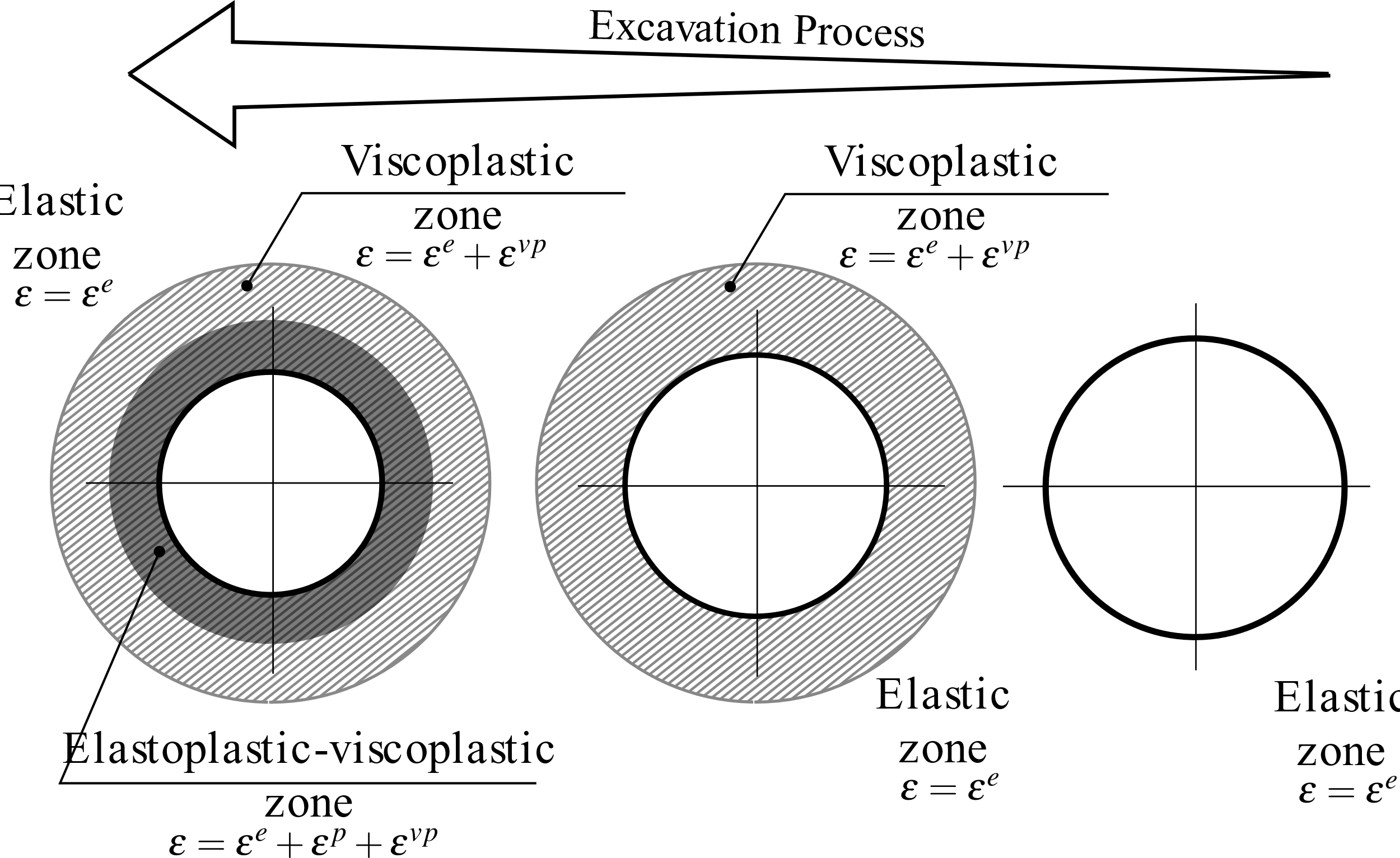


Figura 22: Evolução das zonas de deformação à medida que a escavação do túnel avança .

## 7.2 Perfis de convergência de curto e longo prazo

As Figuras [23](#WG-ST-LT-D1-16RI) , [24](#WG-ST-LT-D1-8RI) e [25](#WG-ST-LT-D1-4RI) mostram os perfis de convergência nos túneis gêmeos com galeria (WG) considerando os diferentes elementos constitutivos modelos da massa rochosa (E - azul, EP - amarelo, VP - magenta, EPVP - vermelho e verde) e do revestimento (EL e VEL). O efeito de interação que surge da proximidade dos túneis gêmeos é investigado considerando três valores , , e . As linhas sólidas referem-se à análise de curto prazo (ST), enquanto as linhas tracejadas à análise de longo prazo (LT ).

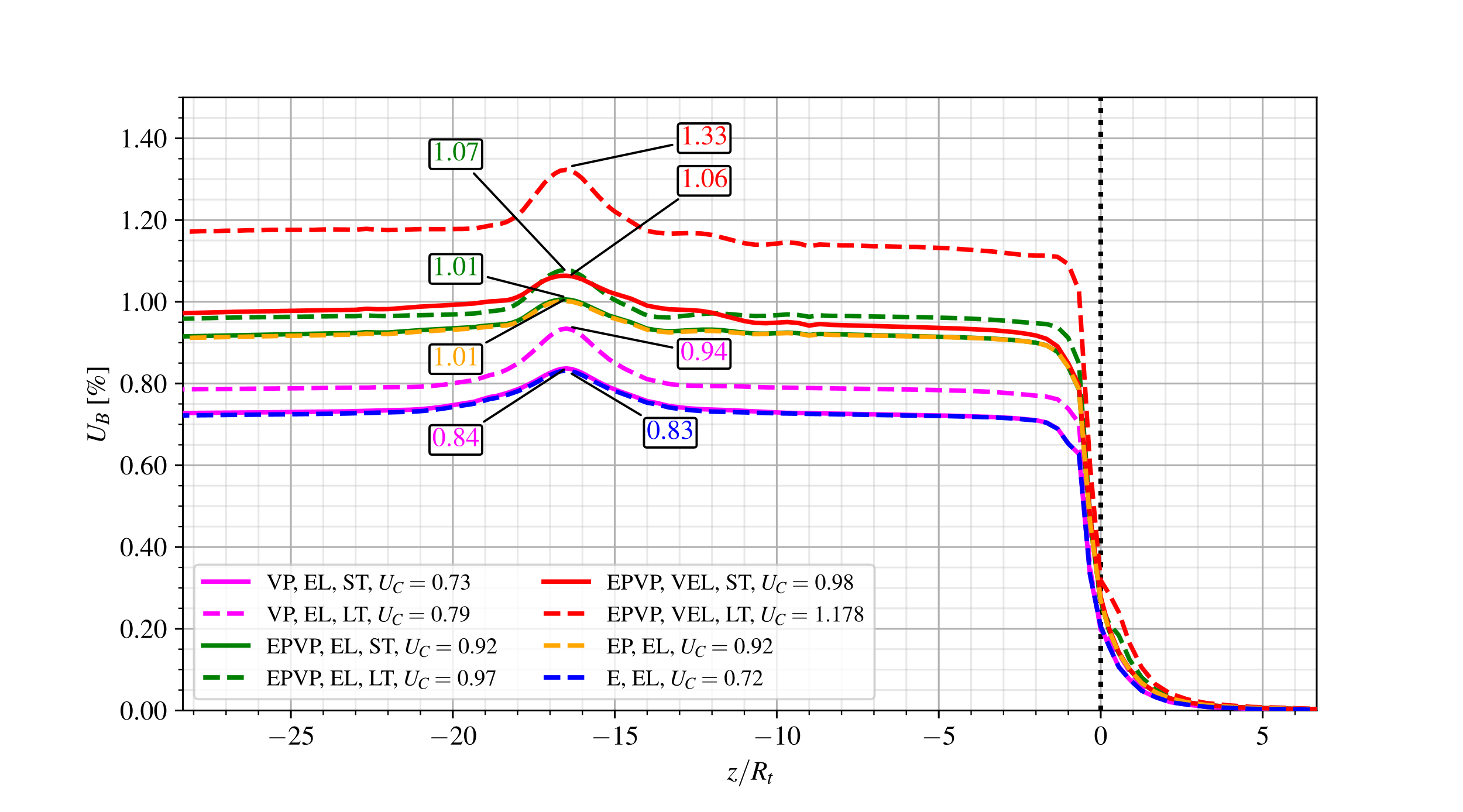


Figura 23: Perfis de convergência: análises de curto prazo (ST) e longo prazo (LT) para a configuração com galeria (WG) e distância entre túneis gêmeos .

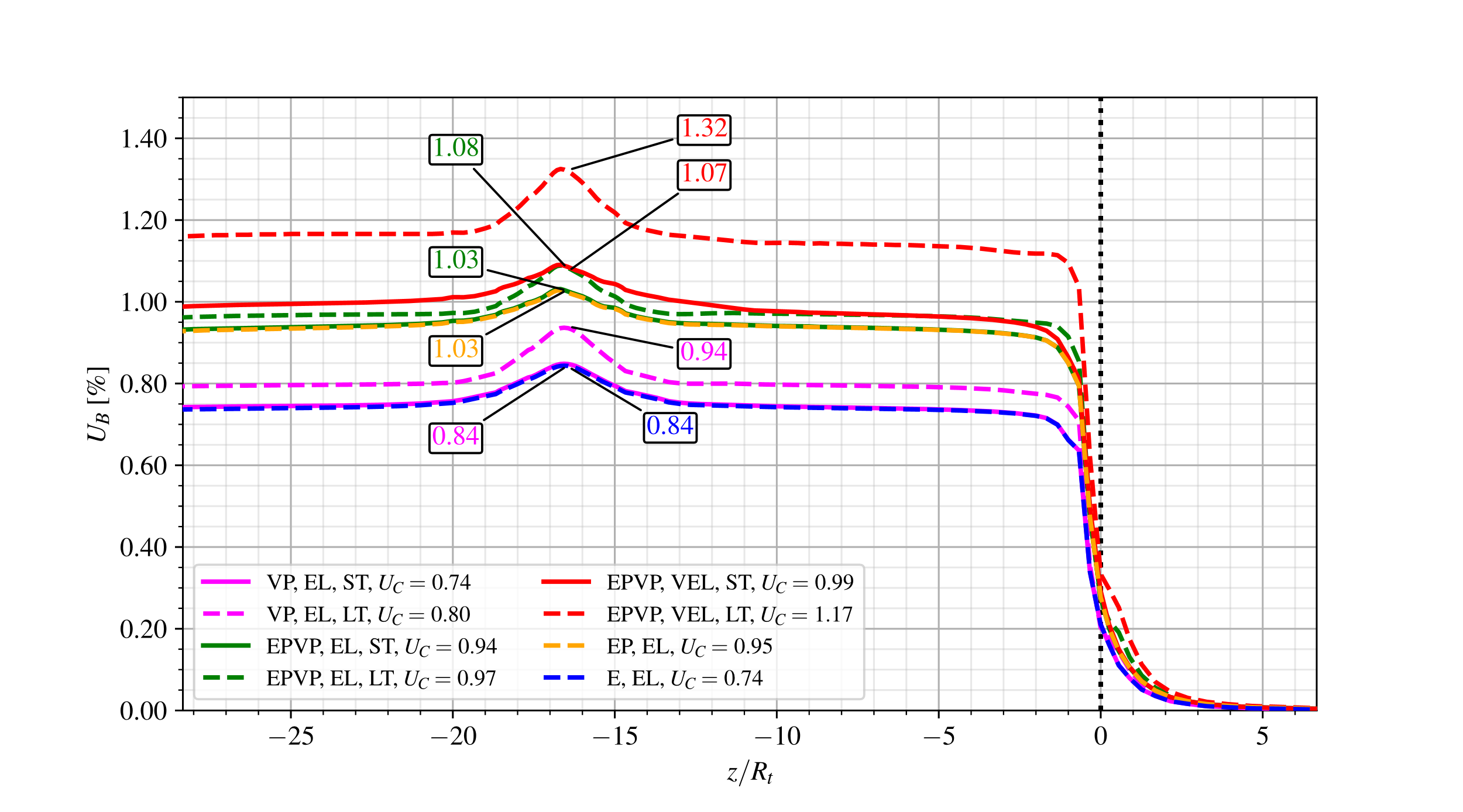


Figura 24: Perfis de convergência: análises de curto prazo (ST) e longo prazo (LT) para a configuração com galeria (WG) e distância entre túneis gêmeos

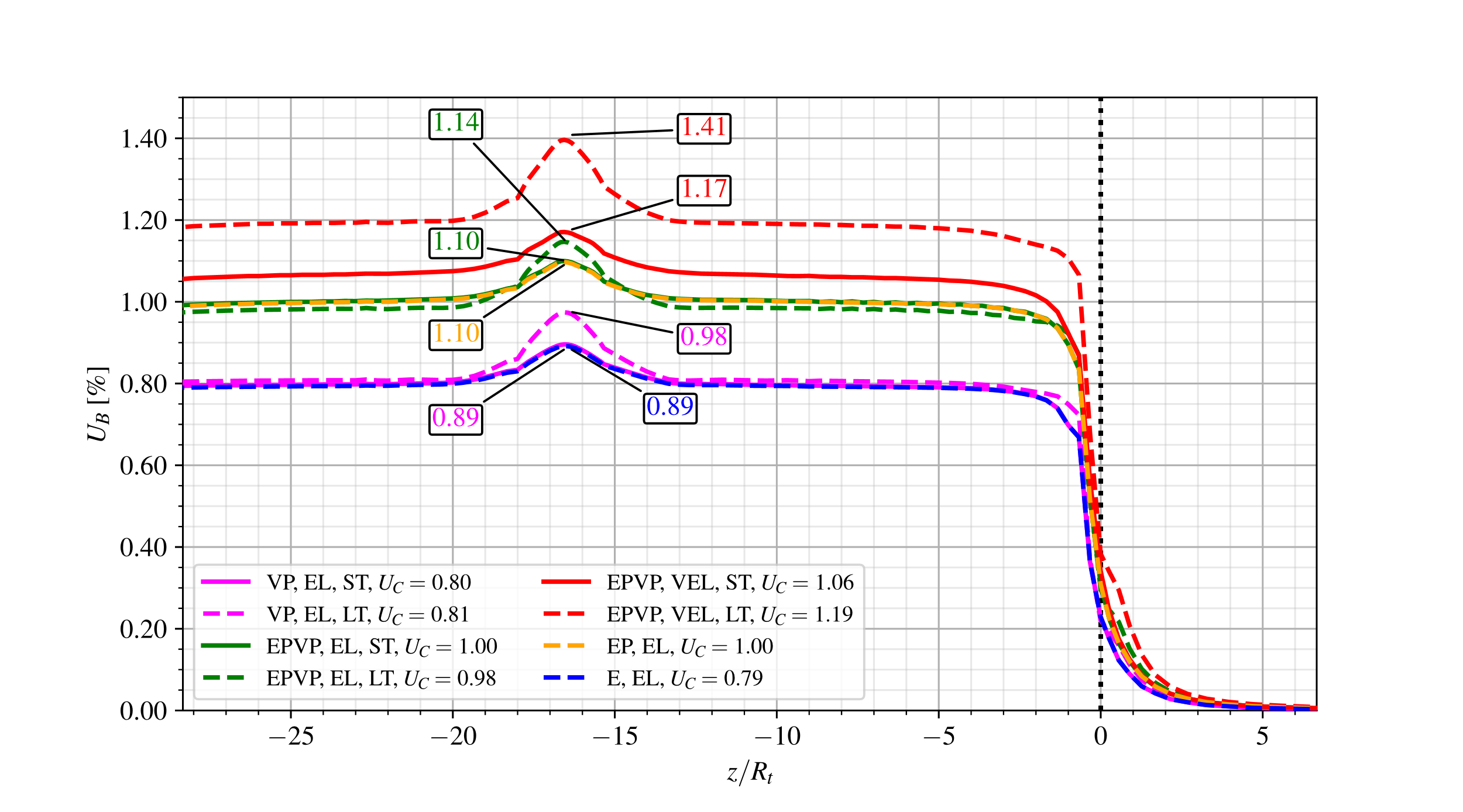


Figura 25: Perfis de Convergência: análises de curto prazo (ST) e longo prazo (LT) para a configuração com galeria (WG) e distância entre túneis gêmeos .

Para todos os valores investigados de distância de túneis gêmeos , os perfis de convergência obtidos em análises de curto prazo (ST) são muito semelhantes para as configurações do modelo constitutivo E-EL (linha tracejada azul) e VP-EL (linha sólida magenta). Isso é atribuído principalmente ao valor relativamente alto considerado para a taxa de avanço do túnel/galeria e instalação do revestimento (velocidade de escavação ), limitando assim os efeitos viscosos na deformação do túnel. A mesma explicação vale para os resultados derivados das análises de curto prazo (ST) com as configurações do modelo constitutivo EP-EL (linha tracejada amarela) ou EPVP-EL (linha sólida verde) . No entanto, os efeitos viscosos dão origem à deformação tardia do túnel afetando progressivamente a convergência de longo prazo (LT) (linha verde tracejada) no teto do túnel B. A discrepância entre as respostas de curto e longo prazo é mais pronunciada quando um revestimento viscoelástico dependente do tempo é considerado, como claramente indicado pela convergência associada ao modelo EPVP-VEL (linhas vermelhas sólidas e tracejadas).

Nota-se que a rigidez relativamente alta considerada do revestimento elástico provavelmente reduz significativamente o componente viscoso da deformação da parede do túnel. Isso pode ser ilustrado pela análise das convergências de curto e longo prazo para o modelo VP-EL (linha magenta sólida e tracejada). Nessa configuração, a proximidade dos túneis gêmeos induz um aumento substancial na previsão de curto prazo (ST) de quando comparamos e , enquanto a convergência de longo prazo (LT) dificilmente muda, principalmente devido à restrição imposta pelo revestimento rígido.

Como era de se esperar, a extensão da zona ao longo do eixo do túnel que é afetada pela galeria transversal de intersecção , que é caracterizada nas figuras anteriores por um aumento localizado no valor de convergência, depende da duração total necessária para a escavação completa da galeria. Enquanto a escavação da galeria prossegue antes da intersecção do túnel longitudinal, tensões de fluência se desenvolvem ao longo da parte já escavada deste último. Como uma taxa fixa de avanço do túnel e da galeria é adotada ao longo das análises, a duração desta última aumenta com o comprimento da galeria, ou seja, com a distância , levando assim a uma maior deformação de fluência e menor extensão da zona acima mencionada para .

Referindo-se à configuração analisada nas Figs. [23](#WG-ST-LT-D1-16RI) , [24](#WG-ST-LT-D1-8RI) e [25](#WG-ST-LT-D1-4RI) , o efeito de ovalização pode ser ilustrado visualizando-se na Fig. [26](#ovalization) a deformação anisotrópica de uma seção transversal de túnel localizada bem atrás da face no caso particular de distância de túnel duplo . Nesta figura, a configuração de um único túnel circular ( ) também é mostrada como um caso de referência.

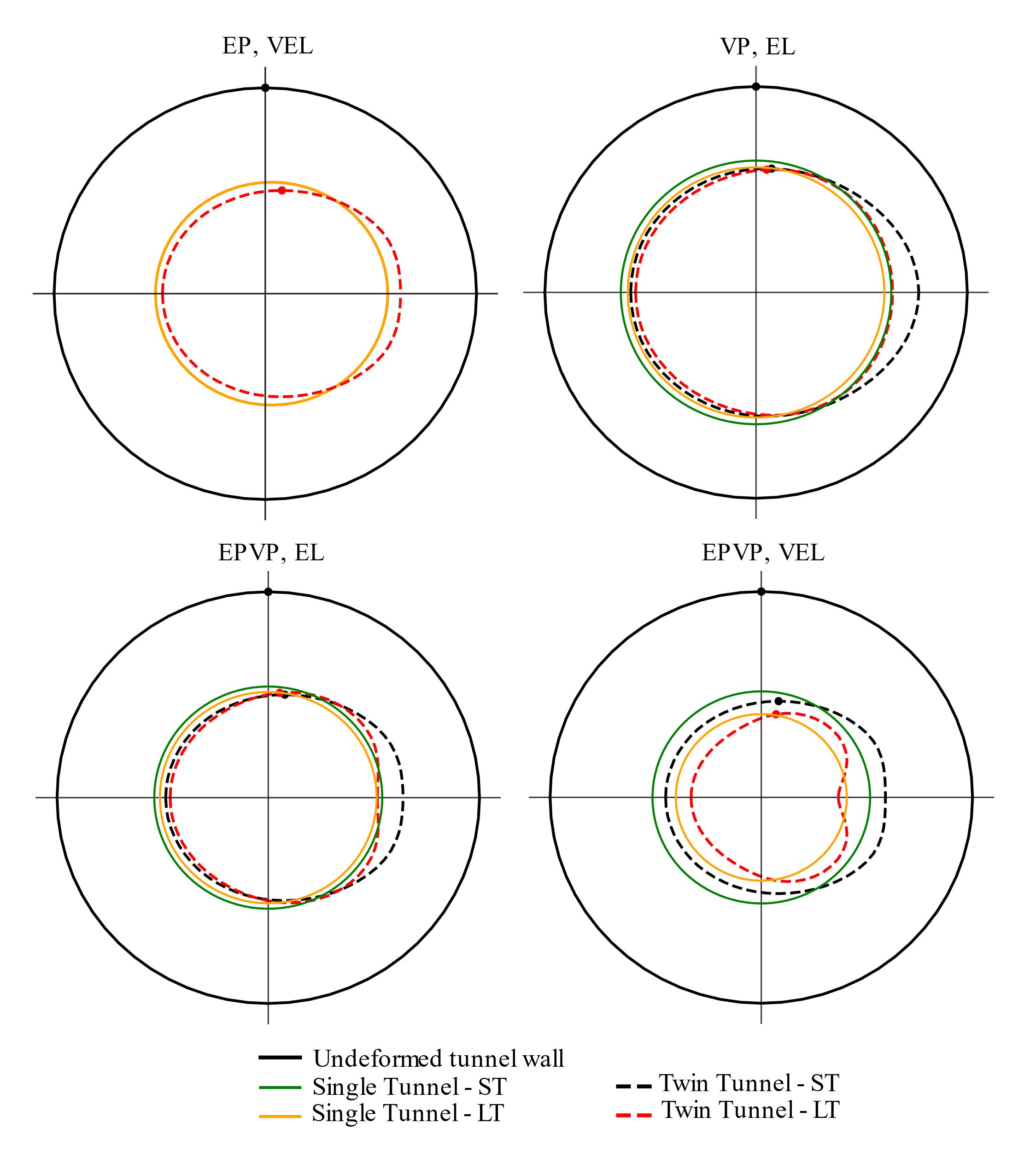


Figura 26: Ilustração da anisotropia de deformação induzida: configuração com galeria (WG) e distância entre túneis gêmeos

A este respeito, a Fig. [27](#UB-UAUB-D1_4RT) fornece uma ilustração adicional do efeito de ovalização , traçando a razão de anisotropia entre o deslocamento vertical no teto B e o deslocamento horizontal na parede lateral . Os resultados apresentados nesta figura correspondem a túneis gêmeos sem galeria transversal (NG) e distância sem galeria . Os resultados sugerem um efeito de ovalização mais pronunciado na deformação do túnel de curto prazo (linhas sólidas).

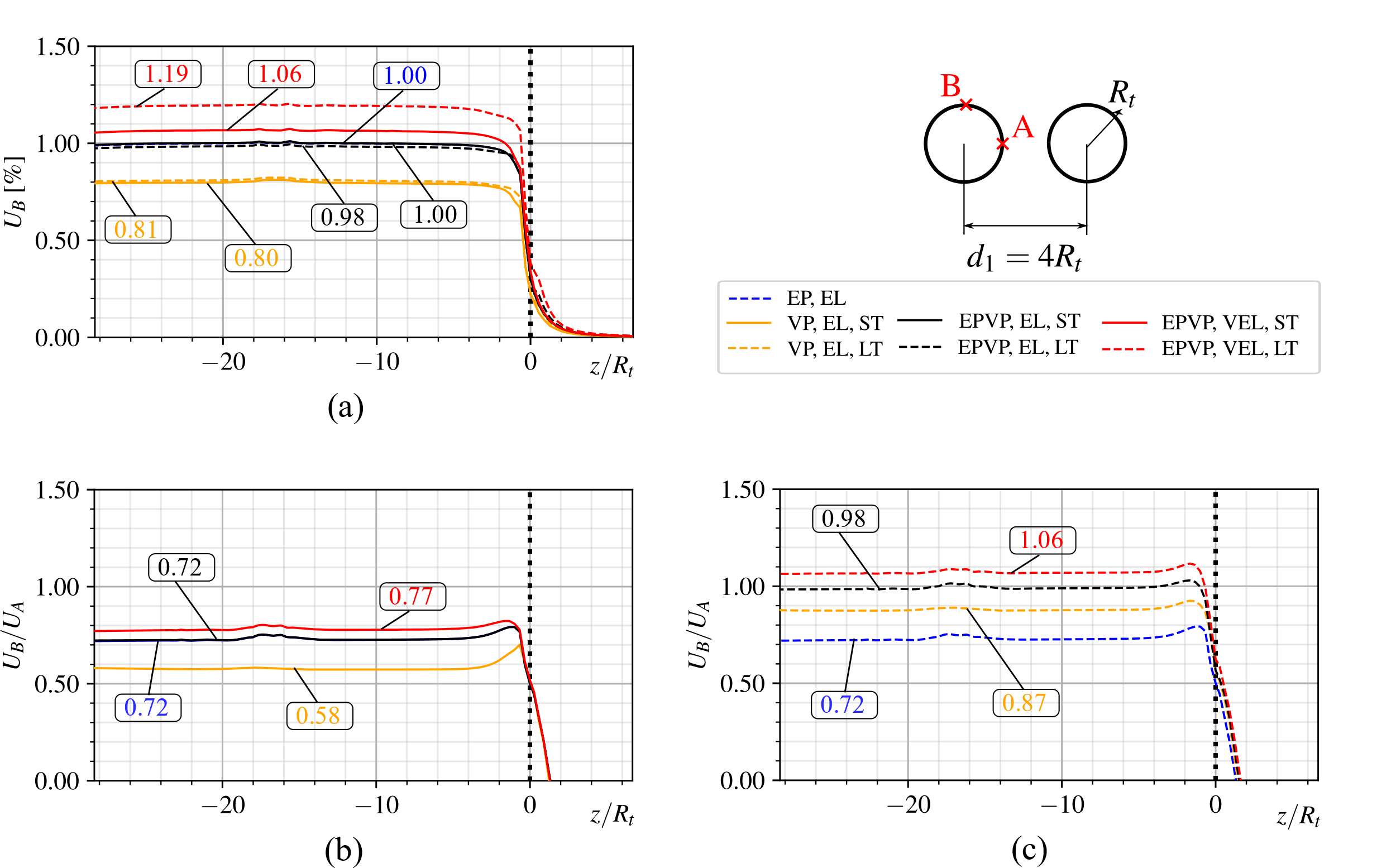


Figura 27: Anisotropia de deformação induzida pela proximidade de túneis gêmeos para a configuração sem galeria (NG) e distância entre túneis gêmeos : (a) perfil de convergência no teto do túnel B, (b) razão de anisotropia obtida na análise de curto prazo, (c) razão de anisotropia obtida em análise de longo prazo .

## 7.3 Análises numéricas adicionais: impacto da deformação por fluência

Esta seção fornece mais resultados numéricos obtidos de análises de longo e curto prazo, com ênfase particular no efeito do comportamento dependente do tempo do material rochoso e dos materiais constituintes do revestimento. A Fig. [28](#VP-EL-EPVP-VEL-WG-LT) exibe os perfis de convergência de longo prazo para e (linhas amarela, verde e vermelha, respectivamente) considerando modelos constitutivos viscosos: maciço rochoso viscoplástico com revestimento elástico (VP-EL - linhas sólidas), maciço rochoso elastoplástico- viscoplástico com revestimento elástico (EPVP-EL - linha tracejada) e revestimento viscoelástico (EPVP-VEL - linhas pontilhadas). Para enfatizar a interação que surge da proximidade dos túneis gêmeos e da galeria transversal, os resultados obtidos na configuração de referência de um único túnel (linhas pretas) também são mostrados . Valores próximos da convergência de pico são obtidos no teto do túnel para o modelo EPVP-VEL com (linha pontilhada amarela) e com (linha pontilhada verde) . Este resultado pode ser explicado pelo fato de que o efeito de interação geral na convergência do túnel resulta dos efeitos concorrentes da proximidade do túnel duplo (definida por ) e do tempo necessário para a escavação completa da galeria e sua intersecção com o túnel longitudinal (também definido pelo comprimento por ). Os resultados indicaram que esses fenômenos concorrentes levam a um efeito geral equivalente nos casos de e . No caso de (linha pontilhada vermelha), o efeito da proximidade do túnel duplo parece ser predominante , o que leva a um valor mais alto da convergência de pico .

Referindo-se aos modelos EPVP-VEL e EPVP-EL (linhas pontilhadas e tracejadas), pode-se observar pelos resultados da Fig. [28](#VP-EL-EPVP-VEL-WG-LT) que valores de convergência mais altos estão associados ao comportamento dependente do tempo do revestimento. Ao contrário do revestimento elástico rígido, o revestimento viscoelástico envelhecido induz a evolução da convergência do túnel ao longo do processo de escavação .

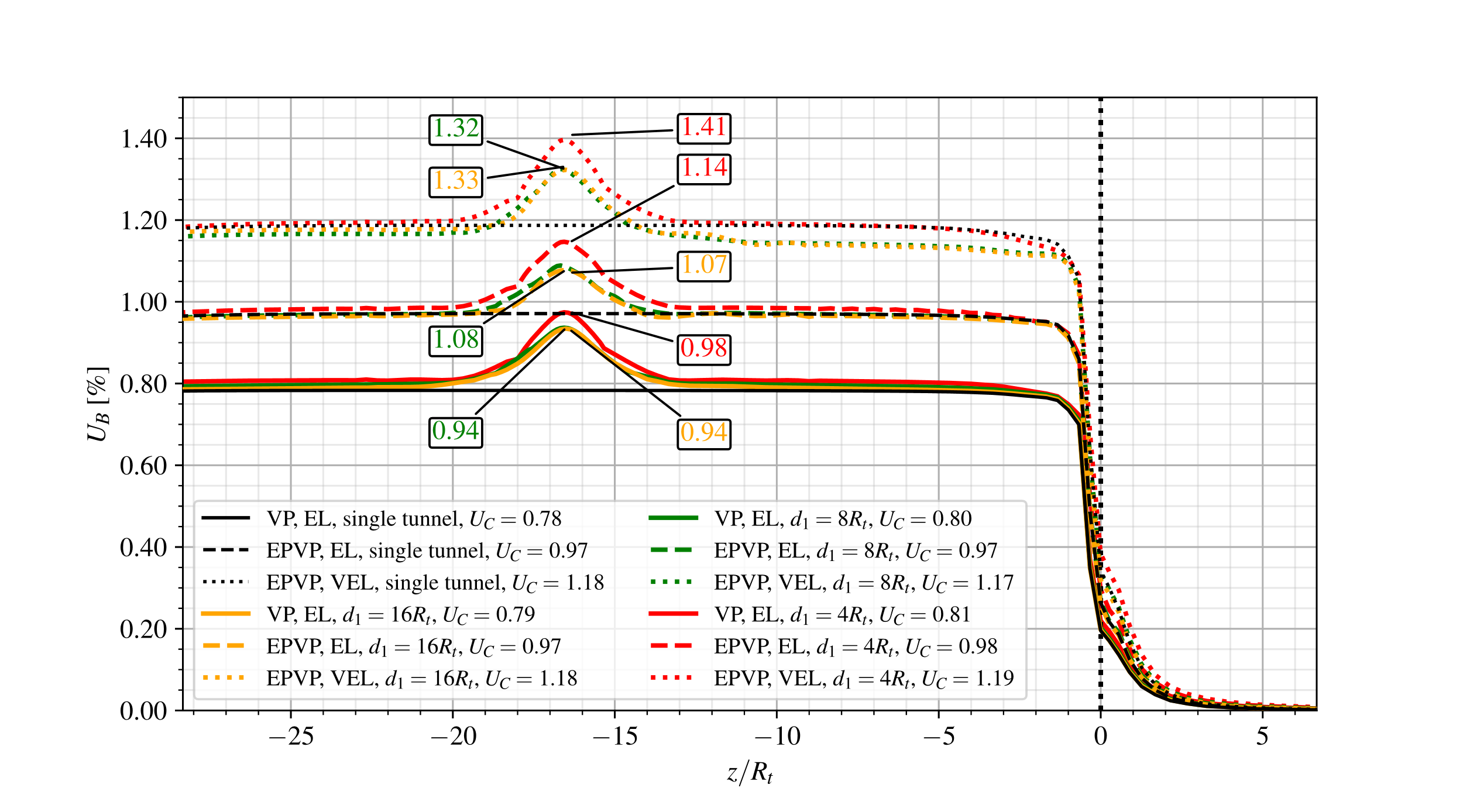


Figura 28: Perfis de convergência de longo prazo para a configuração de túneis gêmeos com galeria transversal (GT): efeito da deformação por fluência do maciço rochoso e do revestimento .

O impacto da deformação por fluência na convergência do túnel pode ser ilustrado alternativamente com base na comparação das previsões numéricas obtidas nos casos de comportamento instantâneo (elastoplástico, elástico) e comportamento dependente do tempo ( viscosplástico , viscoelástico) para os materiais constituintes. A Fig. [29](#EP-EL-EPVP-VEL-WG-ST-LT) descreve a convergência perfis obtidos para e (linhas amarela, verde e vermelha, respectivamente) considerando as configurações de maciço rochoso elastoplástico com revestimento elástico (EP-EL - linhas contínuas), maciço rochoso elastoplástico- viscosplástico com revestimento viscoelástico em análise de curto prazo (EPVP-VEL-ST - linhas pontilhadas) e maciço rochoso elastoplástico- viscosplástico com revestimento viscoelástico em análise de longo prazo (EPVP-VEL-LT - linhas tracejadas). O caso do túnel circular simples ( ) também é analisado como configuração de referência (linhas pretas).

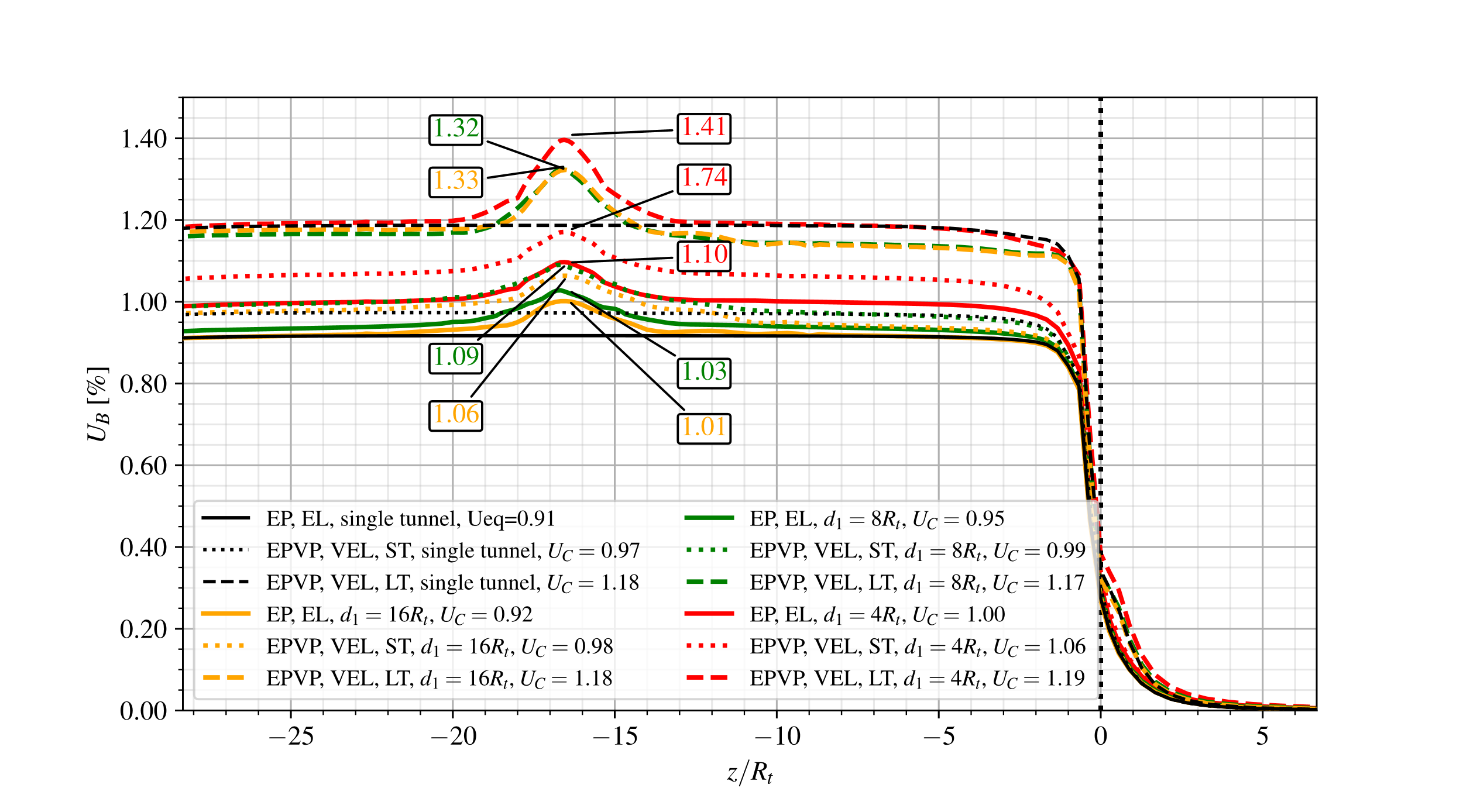


Figura 29: Perfis de convergência de curto e longo prazo obtidos para a configuração de túneis gêmeos com galeria transversal (WG): comportamentos instantâneos versus retardados dos materiais constituintes da rocha e do revestimento.

Mais uma vez, as previsões de resultados mostradas nesta figura enfatizam o impacto significativo do comportamento do revestimento viscoelástico no perfil de convergência de curto prazo dos túneis. No curto prazo (ST), o maciço rochoso elastoplástico- viscosplástico com revestimento viscoelástico (EPVP-VEL - linhas pontilhadas) leva a maiores convergências quando comparado ao maciço rochoso elastoplástico com revestimento elástico (EP-EL - linhas contínuas). Isto é atribuído principalmente ao fato de que o revestimento viscoelástico (VEL) de idade precoce exibe menor módulo de relaxamento do que a rigidez considerada para o revestimento elástico (EL), resultando assim em maior deformação do túnel . Em relação à análise de longo prazo (LT), embora o revestimento viscoelástico (VEL) (linhas tracejadas) exiba módulo de relaxamento crescente devido ao fenômeno do envelhecimento, a deformação por fluência tanto da rocha quanto dos constituintes do revestimento resulta em convergências significativamente maiores no teto do túnel quando comparadas às obtidas para rocha elastoplástica com revestimento elástico (EP-EL - linhas sólidas). Um aumento notável na magnitude de , induzido pela interação com a galeria transversal, também é observado da resposta de curto prazo (linhas pontilhadas) para a resposta de longo prazo (linhas tracejadas), destacando mais uma vez a influência do comportamento retardado da rocha e do revestimento.

## 7.4 Efeito da rigidez do revestimento na convergência do túnel

Em análises de deformação de túneis, o comportamento do revestimento de concreto é classicamente caracterizado pelo parâmetro de rigidez elástica, que relaciona a tensão normal exercida pela massa rochosa circundante e o deslocamento normal do revestimento normalizado (convergência). O parâmetro de rigidez elástica é calculado a partir das propriedades elásticas do material de concreto e da espessura do revestimento (normalizada pelo raio do túnel) [38,39]. Este conceito é aqui estendido ao caso do revestimento viscoelástico, traduzindo o módulo de rigidez instantâneo aos 28 dias. como:

Nas análises acima das seções 7.1, 7.2 e 7.3, a espessura do revestimento foi fixada em , correspondendo à rigidez do revestimento MPa. No que diz respeito à deformação do túnel, o último valor caracteriza um revestimento bastante rígido, o que pode ser um fator predominante para o controle da convergência do túnel.

Para avaliar o efeito da rigidez do revestimento no perfil de convergência, um valor menor , correspondente ao módulo de rigidez do revestimento MPa, estará nas simulações numéricas . Referindo-se ao caso particular de uma massa rochosa exibindo comportamento elastoplástico (EP) , que é apenas comportamento instantâneo, a Fig. [30](#EP_d1_16Ri) e a Fig. [31](#EP_d1_4Ri) exibem os perfis de convergência no teto do túnel previstos respectivamente para e . Três configurações para o revestimento de suporte são consideradas: estrutura não revestida (NL - linhas tracejadas), revestimento elástico com menor rigidez ( - linhas pontilhadas) e revestimento elástico com maior rigidez ( - linhas sólidas). Além disso, as simulações numéricas incluem os casos com galeria transversal (WG - linhas azuis) e sem galeria (NG - linhas amarelas). A configuração de referência de um único túnel também é estudada (linhas pretas ).

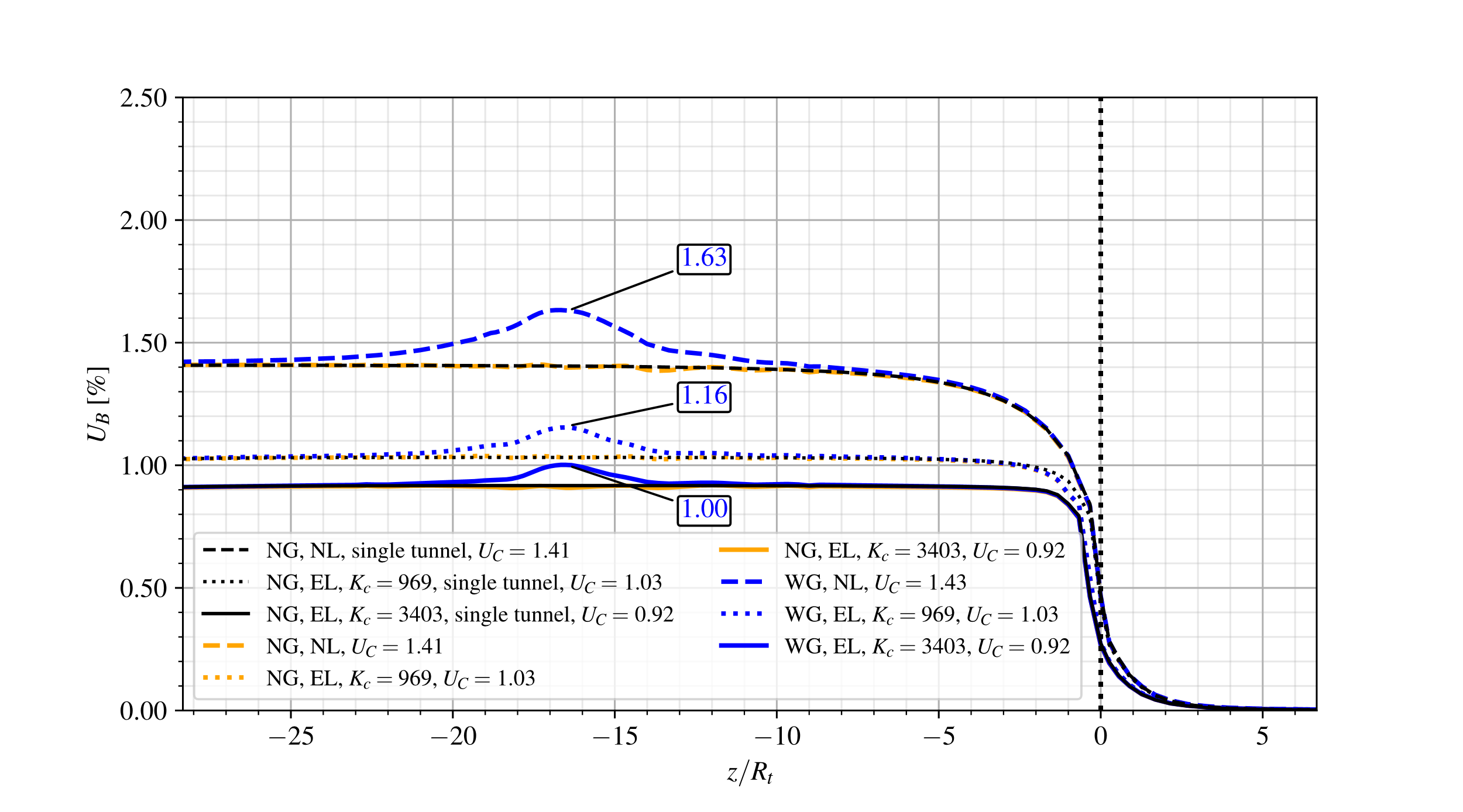


Figura 30: Efeito da rigidez do revestimento nos perfis de convergência para a configuração de túneis gêmeos com e sem galeria transversal e distância entre túneis gêmeos - maciço rochoso elastoplástico, sem e com revestimento elástico

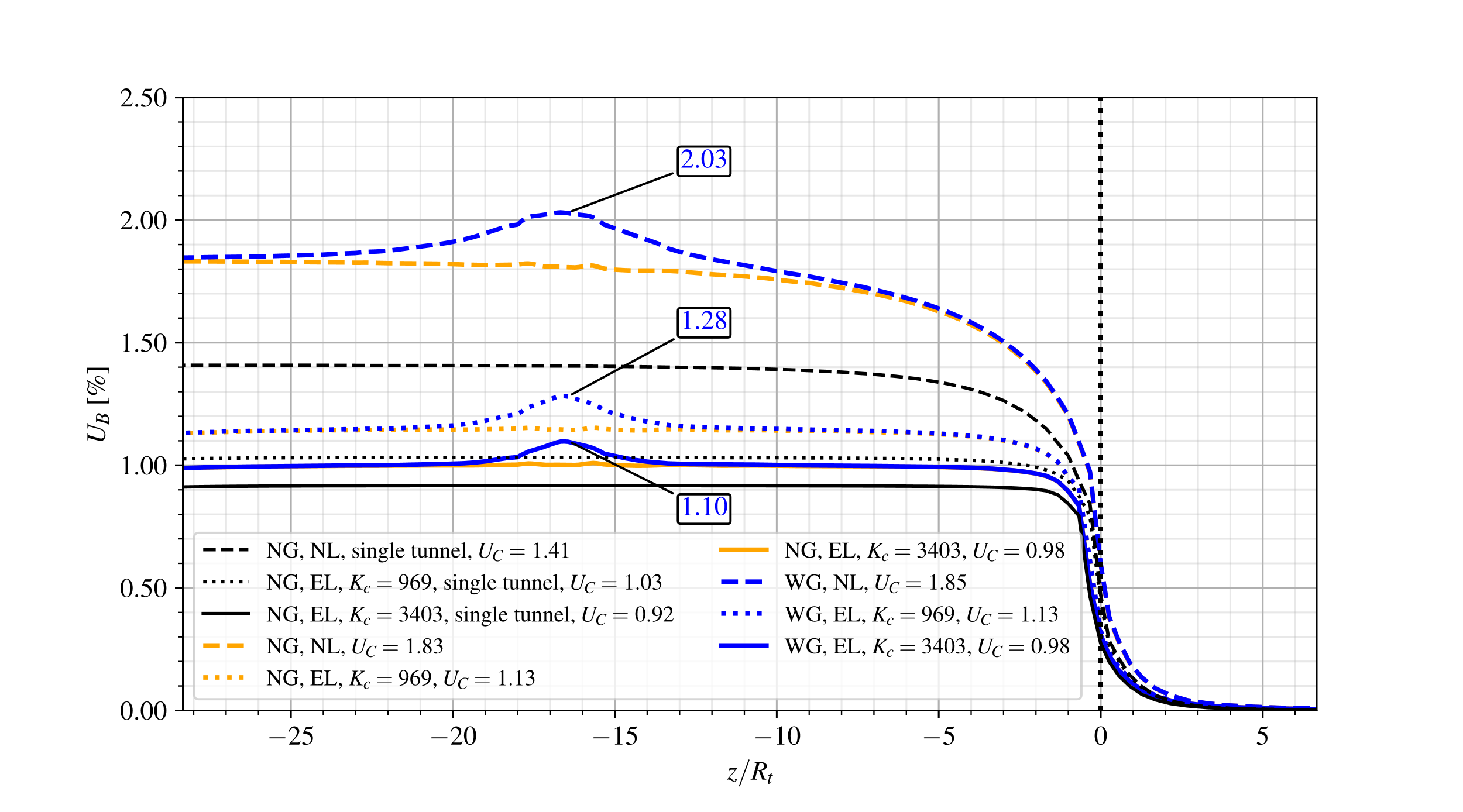


Figura 31: Efeito da rigidez do revestimento nos perfis de convergência para a configuração de túneis gêmeos com e sem galeria transversal e distância entre túneis gêmeos - maciço rochoso elastoplástico, sem e com revestimento elástico

Conforme observado nas simulações das seções anteriores, a convergência de equilíbrio bem atrás da face do túnel quase não é afetada pela presença da galeria transversal.

Em relação ao efeito da rigidez do revestimento na convergência de um único túnel, o revestimento mais rígido (linha preta contínua) leva a uma redução da convergência estabilizada de aproximadamente 35% em relação à estrutura sem revestimento (linha preta tracejada), enquanto essa redução é de apenas 12% para o revestimento de rigidez moderada (linha preta pontilhada).

Para túneis gêmeos com espaçamento , as previsões de convergência estabilizada (linhas azuis e amarelas) fornecidas na Fig. 3 [0](#EP_d1_4Ri) são próximas para cada configuração de revestimento daquelas obtidas para um único túnel (linhas pretas). Em contraste, a interação entre os túneis gêmeos revela-se significativa quando o espaçamento reduz para . Nesse caso, o impacto combinado do suporte do revestimento e da proximidade dos túneis gêmeos pode ser avaliado comparando na Fig. [31](#EP_d1_4Ri) os valores de convergência previstos para (linhas sólidas amarelas e azuis) e ( túnel único - linhas pretas). Comparado à convergência de túnel único, o aumento na convergência induzido pela proximidade de túneis gêmeos atinge valores de 30% para estrutura não revestida, 10% para o revestimento de rigidez moderada e 6,5% para o revestimento de rigidez mais alta.

Analisando o efeito da rigidez do revestimento na região perturbada associada ao longo do perfil de convergência com a presença da galeria transversal, observa-se primeiramente que o aumento da rigidez reduz em todas as configurações estudadas a extensão da região perturbada, enquanto o espaçamento dos túneis gêmeos tem pouco impacto. Para a configuração de espaçamento , onde se espera que a interação devido à proximidade dos túneis gêmeos seja menor, a razão que define a variação relativa entre o valor de pico e a convergência estabilizada do teto do túnel é de cerca de 14%, 12,5% e 8,7% de acordo com o valor da rigidez do revestimento: (sem revestimento), MPa e MPa. Os valores desta relação são alterados para cerca de 9,7%, 13% e 12% para a configuração com espaçamento em que ambos os efeitos da rigidez do revestimento e da proximidade dos túneis atuam simultaneamente .

Em consonância com a análise anterior investigando o impacto do módulo de rigidez instantâneo do revestimento, a Fig. [32](#EPVP_VEL_d1_16Ri) e a Fig. [33](#EPVP_VEL_d1_4Ri) apresentam os resultados de convergência de longo prazo nas configurações de massa rochosa elastoplástica- viscosplástica (EPVP) e revestimento viscoelástico (VEL) com galeria (WG - linhas azuis) e sem galeria (NG - linhas amarelas), considerando espaçamento de túneis gêmeos e , respectivamente . Os resultados obtidos para a configuração de túnel único de referência também são fornecidos (linhas pretas).

Semelhante à análise anterior envolvendo materiais constituintes que exibem apenas comportamentos instantâneos, os resultados da Fig. 3 [2](#EP_d1_4Ri) indicam que as previsões de convergência estabilizada no caso de túneis gêmeos com espaçamento são muito próximas das obtidas para túnel único.

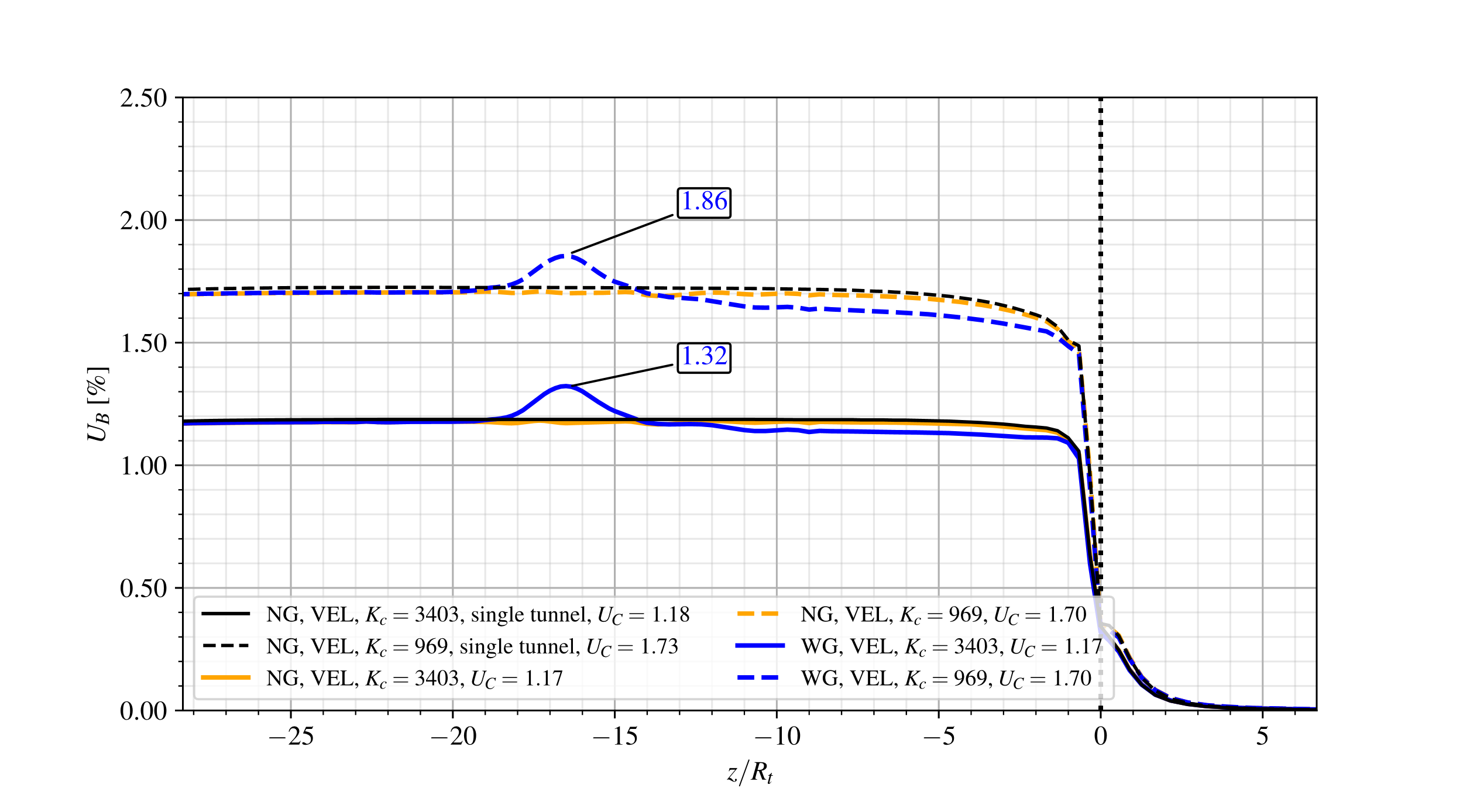


Figura 32: Efeito da rigidez instantânea do revestimento nos perfis de convergência de longo prazo para a configuração de túneis gêmeos com e sem galeria transversal e distância entre túneis gêmeos - elastoplástico - massa rochosa viscoplástica , sem e com revestimento elástico viscoelástico

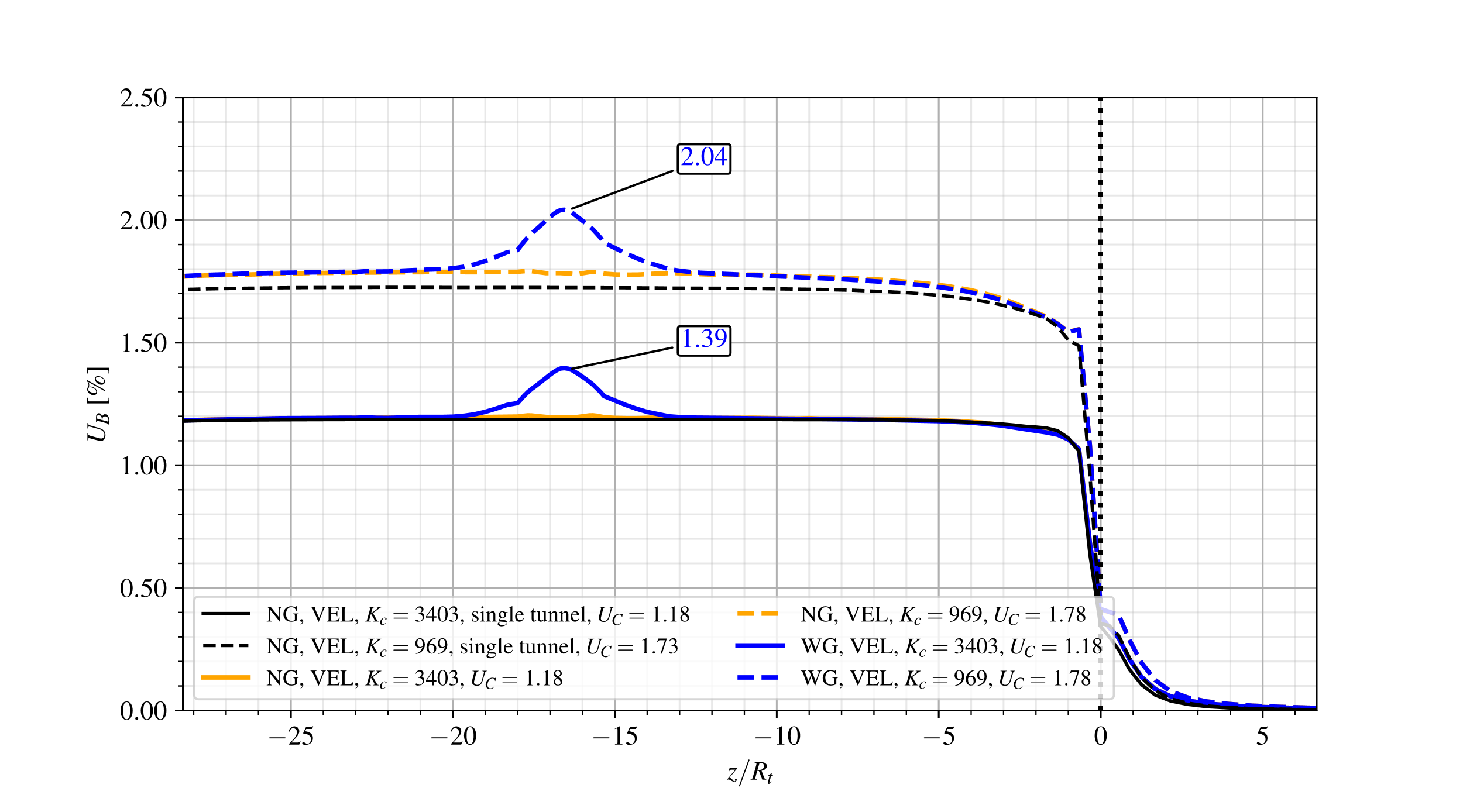


Figura 33: Efeito da rigidez instantânea do revestimento nos perfis de convergência de longo prazo para a configuração de túneis gêmeos com e sem galeria transversal e distância entre túneis gêmeos - elastoplástico - massa rochosa viscoplástica , sem e com revestimento elástico viscoelástico

Mesmo no caso específico em que seria esperada uma forte interação entre túneis gêmeos, o papel do revestimento com maior rigidez na convergência estabilizada (linhas sólidas azuis e amarelas na Fig. 33) é predominante com valores próximos aos obtidos para o túnel único (linha sólida preta na Fig. 33), mascarando assim tal efeito de interação. Para menor rigidez do revestimento, os resultados numéricos (linhas tracejadas azuis e amarelas) indicam um pequeno aumento no valor quando comparado ao túnel único (linha tracejada preta).

No que diz respeito ao impacto na convergência de pico e extensão da zona de influência da galeria (porção perturbada do perfil de convergência), os resultados mostram que para cada valor do espaçamento dos túneis gêmeos , a última extensão é ligeiramente afetada pelo módulo de rigidez do revestimento instantâneo. Em contraste, a razão é significativamente afetado pelos valores de e Para a configuração com ele assume respectivamente os valores = 14,5% e 18% menor e maior rigidez do revestimento , enquanto que para a configuração com ele assume respectivamente os valores 9,5% e 13%

Finalmente, os resultados fornecidos na Fig. [34](#EPVP_EL_VEL_d1_16Ri) e Fig. [35](#EPVP_EL_VEL_d1_4Ri) referem-se a configurações definidas pelo comportamento da rocha dependente do tempo (EPVP) juntamente com material de revestimento instantâneo. (EL).

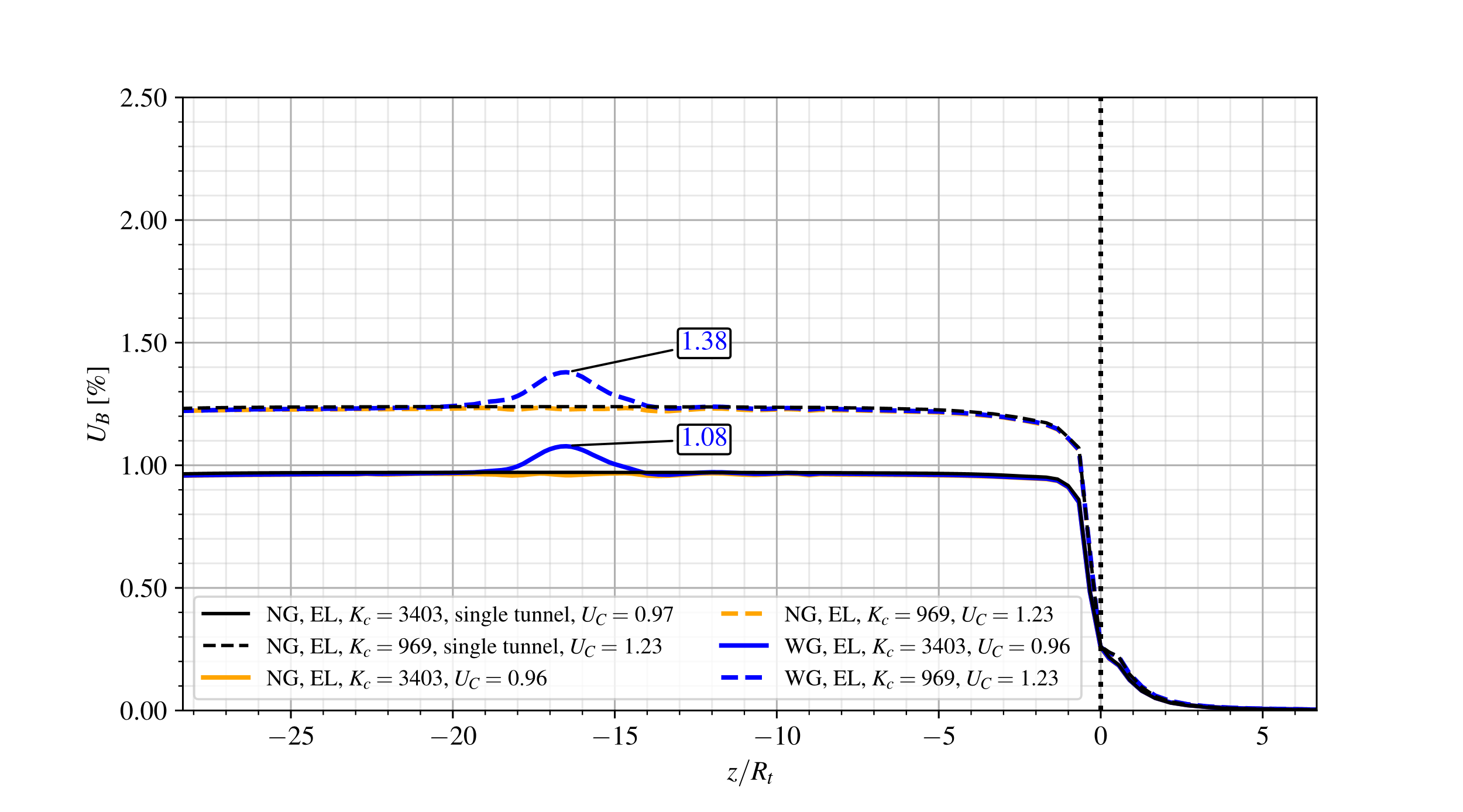


Figura 34: Efeito da rigidez do revestimento nos perfis de convergência de longo prazo para a configuração de túneis gêmeos com e sem galeria transversal e distância entre túneis gêmeos - elastoplástico - massa rochosa viscoplástica , sem e com revestimento elástico

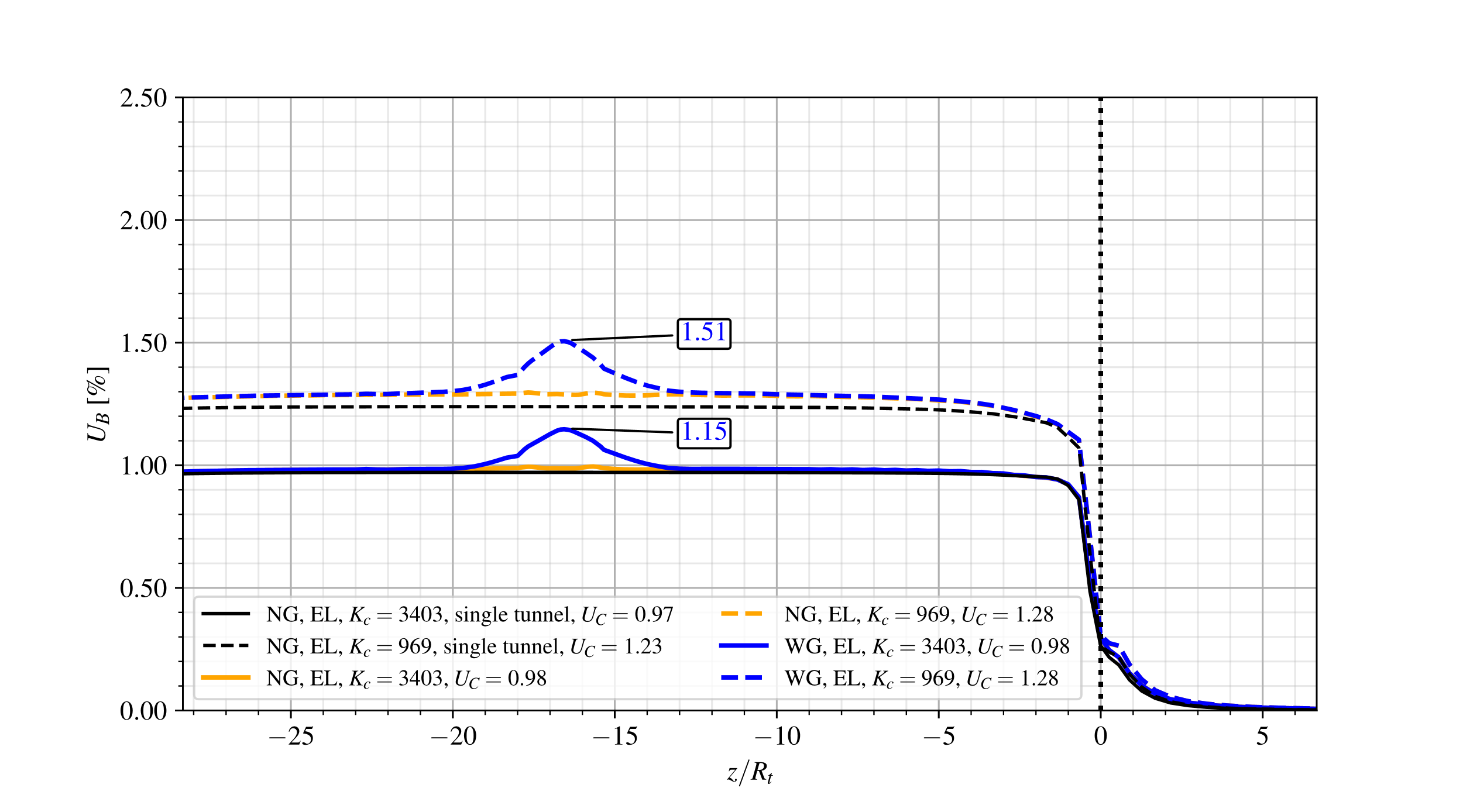


Figura 35: Efeito da rigidez do revestimento nos perfis de convergência de longo prazo para a configuração de túneis gêmeos com e sem galeria transversal e distância entre túneis gêmeos - elastoplástico - massa rochosa viscoplástica , sem e com revestimento elástico .

No geral, as mesmas observações formuladas nas análises anteriores sobre o efeito do espaçamento de túneis duplos na convergência estabilizada ainda são válidas: com relação à configuração de túnel único, é quase não afetado pela rigidez do revestimento e ligeiramente aumentado (até 4%) para .

Com o revestimento elástico, o aumento da rigidez de MPa para MPa leva a uma redução na convergência estabilizada em 28% para espaçamento de túneis duplos e em 16% para , enfatizando mais uma vez a forte interação mecânica entre os diferentes componentes da estrutura do túnel.

O valor de pico da convergência do teto do túnel que reflete o acoplamento associado à galeria transversal de intersecção, o acoplamento associado à intersecção é quase não afetado pela rigidez do revestimento, pelo menos para os parâmetros de dados considerados. A esse respeito, o valor da razão computado na configuração (resp. ) é de aproximadamente 12% (resp. e 18%) para ambos os valores de rigidez do revestimento, o que corrobora o efeito predominante da proximidade dos túneis na convergência de pico .

Referência adicional

[39] E. Hoek e ET Brown, *Escavações subterrâneas em rocha* , 1ª ed. Londres: E&FN Spon, 1980.