



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Tiago Frizzera Santos

**EFICIÊNCIA A LONGO PRAZO DA
COLOCAÇÃO DE CORTINAS PARA MITIGAR
AS DEFORMAÇÕES INDUZIDAS POR
TÚNEIS**

ASSESSMENT OF THE LONG-TERM EFFICIENCY OF
EMBEDDED WALLS TO MITIGATE GROUND DEFORMATIONS
INDUCED BY TUNNELLING

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de
Especialização em Geotecnia, orientada pelo Professor Doutor António
Manuel Gonçalves Pedro e pelo Professor Doutor José Carlos Duarte Grazina
e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Outubro de 2021

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Tiago Frizzera Santos

EFICIÊNCIA A LONGO PRAZO DA COLOCAÇÃO DE CORTINAS PARA MITIGAR AS DEFORMAÇÕES INDUZIDAS POR TÚNEIS

**ASSESSMENT OF THE LONG-TERM EFFICIENCY OF EMBEDDED WALLS TO
MITIGATE GROUND DEFORMATIONS INDUCED BY TUNNELLING**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Geotecnia, orientada pelo Professor Doutor António Manuel Gonçalves Pedro e pelo Professor Doutor José Carlos Duarte Grazina

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Outubro de 2021



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a minha família, meus amigos e professores pelo apoio incondicional, principalmente aos meus pais Marcos e Karen, sem eles isso não seria possível.

Gostaria de deixar um agradecimento especial aos meus orientadores, Professor António Pedro e José Grazina por todo o apoio, suporte, conhecimento e atenção desde o início ao final da conclusão desta tese.

RESUMO

A maior demanda dos sistemas de trânsito devido ao crescimento populacional nas grandes cidades levou à busca por soluções de transporte em massa. O uso de túneis provou ser uma solução ideal para este problema, porém a sua construção pode induzir movimentos consideráveis à superfície podendo estes provocar danos nas estruturas localizadas na proximidade. Em virtude deste problema, este estudo tem como objetivo analisar o potencial da utilização de cortinas como medida mitigadora dos deslocamentos induzidos pela construção de um túnel superficial num maciço argiloso sujeito a consolidação. Para tal, realizaram-se análises numéricas 2D, utilizando o software RS2 v2021 e considerando um cálculo acoplado em condições de deformação plana, tendo como base a geometria do caso da Secção 63 da Linha Verde do Metro de Lisboa. Foi realizado um estudo para avaliar a evolução da eficiência de uma cortina impermeável ao longo de todo o processo de consolidação de um maciço argiloso, admitindo-se que o túnel tinha um suporte permeável. Foi igualmente efetuada uma análise paramétrica, na qual se variou a altura e o afastamento da cortina, procurando avaliar como estes parâmetros afetavam a eficiência local e global. Além disso analisou-se o impacto da cortina nos esforços na cortina e no suporte do túnel. O estudo efetuado permitiu avaliar a eficiência da cortina ao longo do processo de consolidação, bem como a influência da sua posição em relação ao túnel na geração e posterior dissipação das pressões intersticiais e também na posição do nível freático atrás e à frente da cortina. Neste estudo, para além de se confirmar a capacidade da cortina em mitigar as deformações do solo, foi observado que a sua eficiência era variável ao longo do tempo, atingindo o pico aproximadamente aos 25 anos após o final da construção do túnel. Também se verificou que a cortina não tem grande impacto na evolução dos esforços no suporte ao longo do processo de consolidação, independente da sua posição.

Palavras-chave: túneis; parede moldada; deformações; consolidação; modelação numérica

ABSTRACT

The increased demand on transit systems due to population growth in large cities has led to the search for mass transportation solutions. The use of tunnels has proven to be an ideal solution to this problem, but their construction can induce considerable movements at the surface, which can cause damage in the structures located in the vicinity. Based on this problem, this study aims to analyse the potential of using embedded walls as a measure to mitigate the displacements induced by the construction of a shallow tunnel in a clayey layer subject to consolidation. To this end, 2D coupled-consolidation numerical analyses using RS2 v2021, under plane strain conditions, and based on the geometry of Section 63 of the Lisbon Metro's Green Line were performed. A study was carried out to evaluate the performance of an impermeable embedded wall throughout the consolidation process caused by the excavation of a permeable tunnel on a clayey layer. A parametric analysis was also performed, in which the depth and offset of the embedded wall was varied, in an attempt to investigate how these parameters affected the local and global efficiency. In addition, the impact of the embedded wall on the forces mobilized in the tunnel lining was analysed. The study allowed the evaluation of the efficiency of the embedded wall throughout the entire consolidation process, as well as the influence of its position in relation to the tunnel on the generation and subsequent dissipation of the excess pore water pressures and also on the position of the water table behind and in front of the embedded wall. In this study, in addition to confirming the embedded wall's merit to mitigate the soil deformations, it was observed that its efficiency was variable with the consolidation time, with a peak being reached approximately 25 years after the end of the tunnel construction. Furthermore, it was also observed that the presence of the embedded wall, regardless of its position, has a minor impact on the tunnel forces during the entire consolidation process.

Keywords: tunnels; embedded walls; deformations; consolidation; numerical modelling

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. Enquadramento.....	9
1.2. Objetivos da dissertação	10
1.3. Estrutura da dissertação	11
2. COMPORTAMENTO DE TÚNEIS EM MACIÇOS ARGILOSOS	12
2.1. Deformações em maciços induzidas por escavação de túneis.....	12
2.2. Efeitos da consolidação do maciço após a escavação de túneis.....	15
2.2.1. Conceitos gerais de consolidação em maciços argilosos.....	16
2.2.2. Influência do processo construtivo de túneis.....	16
2.2.3. Influência da permeabilidade do suporte.....	18
2.3. Utilização de cortinas de contenção como medida de mitigação de deformações	21
2.3.1. Técnicas de mitigação das deformações.....	21
2.3.2. Mecanismo de funcionamento de cortinas	22
2.3.3. Avaliação da eficiência das cortinas.....	25
2.3.4. Estudos efetuados	26
2.3.4.1. Bilotta (2008).....	26
2.3.4.2. Rampello et al. (2019)	27
2.3.4.3. Massicano (2020)	28
2.3.5. Resumo	32
3. MODELAÇÃO NUMÉRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	34
3.1. Considerações iniciais	34

3.2. Modelo de elementos finitos	34
3.2.1. Geometria e malha de elementos finitos.....	34
3.2.2. Condições de fronteira.....	36
3.2.3. Características dos materiais e modelos constitutivos.....	36
3.2.4. Sequência da modelação numérica.....	37
3.3. Influência da permeabilidade do túnel.....	39
3.4. Avaliação da influência da cortina para o cálculo de referência	40
3.4.1 Estado de tensão	40
3.4.2. Deformações no maciço	46
3.4.3. Eficiência da cortina	49
3.4.4. Comportamento dos elementos estruturais.....	52
3.4.4.1. Túnel.....	52
3.4.4.2. Cortina	54
4. ANÁLISE PARAMÉTRICA	58
4.1. Considerações iniciais	58
4.2. Evolução das eficiências com o tempo.....	59
4.2.1. Influência da profundidade.....	59
4.3.2. Influência do afastamento.....	61
4.3. Estudo paramétrico	62
4.3.1. Eficiência da cortina	63
4.3.2. Forças mobilizadas no suporte do túnel	68
4.3.3. Esforços na cortina	72
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	75
5.1. Conclusões.....	75
5.2. Trabalhos futuros.....	77
BIBLIOGRAFIA	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – A Mansion House (Frischmann et al., 2019)	10
Figura 2.1 – Bacia de subsidência devido ao avanço da escavação de um túnel (adaptado de Potts, 2001).....	12
Figura 2.2 – Perfil transversal dos assentamentos superficiais (curva de Gauss) (Almeida e Sousa, 1998)	13
Figura 2.3 – Distribuição dos deslocamentos e das deformações horizontais à superfície do terreno (Almeida e Sousa, 1998)	15
Figura 2.4 – Escavação sequencial feita por máquinas de ataque pontual utilizando o NATM.	17
Figura 2.5 – Tuneladora usada na escavação do trecho Campo Grande – Odivelas (linha Amarela) (Salgueiro Amaral, 2006).	18
Figura 2.6 – Corte geológico-geotécnico e geometria do problema (Lopes et al., 2005).	19
Figura 2.7 – Efeito da permeabilidade do suporte: a) assentamentos na superfície; b) deslocamentos horizontais na superfície; c) assentamentos no alinhamento vertical no plano de simetria; d) esforços axiais no suporte; e) momentos fletores no suporte (Lopes et al., 2005).	20
Figura 2.8 – Exemplo do efeito de uma cortina nos assentamentos atuantes no maciço (adaptado de Bilotta, 2008).	23
Figura 2.9 – Perfil do Pujiang Hotel e do Bund Tunnel (Bai et al., 2014).....	24
Figura 2.10 – Assentamentos na fundação do Pujiang Hotel com e sem cortina de estacas (Bai et al., 2014).....	25
Figura 2.11 – Efeito da altura da cortina: a) na eficiência local; b) na eficiência global (b) ($d=0,8Dt$) (Rampello et al., 2019).	28
Figura 2.12 – Malha de elementos finitos do modelo de referência com a presença da cortina (Massicano, 2020).	29
Figura 2.13 – Valores dos esforços no suporte do túnel em função da distância da cortina para diferentes alturas: a) Esforço axial máximo normalizado; b) Momento fletor máximo normalizado; c) Momento fletor mínimo normalizado (adaptado de Massicano, 2020).....	31
Figura 2.14 – Valores das eficiências em função da distância da cortina para diferentes alturas: a) eficiência global; b) eficiência local atrás da cortina; c) eficiência local à frente da cortina (adaptado de Massicano, 2020).....	32

Figura 2.15 – Valores das eficiências em função da distância da cortina para diferentes valores de α : a) eficiência global; b) eficiência local atrás da cortina; c) eficiência local à frente da cortina (adaptado de Massicano, 2020).	323
Figura 3.1 – a) Modelo de referência 2D com cortina e b) Pormenor com as distâncias e geometria da cortina.	355
Figura 3.2 – Desenvolvimento dos assentamentos para a situação de um suporte de túnel impermeável vs permeável: a) sem cortina; b) com cortina.	40
Figura 3.3 – Variação da pressão intersticial e do N.F. ao longo do processo de consolidação: a) sem cortina; b) com cortina.	422
Figura 3.4 – Análise temporal da variação do NF à frente, atrás da cortina e sem a mesma á uma distância de $d/Dt=1,25$ do eixo do túnel.	433
Figura 3.5 – Análise temporal da diferença de pressões intersticiais atrás e à frente da cortina	444
Figura 3.6 – Variação de p' ao longo do processo de consolidação: a) Campo livre; b) Modelo de referência.	455
Figura 3.7 – Variação do Strenght Factor ao longo do processo de consolidação e dos pontos plastificados do maciço: a) Campo livre; b) Modelo de referência.	466
Figura 3.8 – Evolução temporal dos assentamentos no eixo do túnel.	477
Figura 3.9 – Evolução temporal do formato da bacia de subsidência: a) sem cortina; b) com cortina	477
Figura 3.10 – Diferença do volume das bacias de subsidência com cortina vs sem cortina ..	488
Figura 3.11 – Análise temporal do desenvolvimento do volume total, atrás e à frente da bacia de subsidência normalizada pela área do túnel.	499
Figura 3.12 – Evolução temporal das eficiências global, global atrás e à frente da cortina.	50
Figura 3.13 – Evolução temporal da eficiência local, η_l , da cortina.	511
Figura 3.14 – Deslocamentos totais no túnel ao longo do processo de consolidação para o modelo de referência.	522
Figura 3.15 – Esforços axiais no suporte do túnel ao longo do processo de consolidação: a) sem cortina; b) diferença entre os casos com e sem cortina	533
Figura 3.16 – Momento fletor no suporte do túnel ao longo do processo de consolidação: a) com cortina; b) diferença entre os casos com e sem cortina	544
Figura 3.17 – Deslocamentos na cortina ao longo do processo de consolidação	555
Figura 3.18 – Esforços axiais na cortina ao longo do processo de consolidação	566
Figura 3.19 – Momentos fletores na cortina ao longo do processo de consolidação.	577
Figura 4.1 – Diferentes posições e alturas da cortina consideradas na análise paramétrica. ...	588
Figura 4.2 – Cortina afastada $d/Dt=1,25$ com diferentes alturas - evolução temporal da eficiência: a) global; b) global atrás da cortina; c) local.	60

Figura 4.3 – Cortina com altura $h/Dt=0,5$ com diferentes afastamentos - evolução temporal da eficiência: a) global; b) global atrás da cortina; c) local.....	612
Figura 4.4 – Influência do afastamento da cortina em ηg e $\eta g, be$ para diferentes instantes de tempo e profundidades: a) $h/Dt=-0,5$; b) $h/Dt=0,0$; c) $h/Dt=0,5$; d) $h/Dt=0,75$; e) $h/Dt=1,0$.	644
Figura 4.5 – Condições do maciço no final da construção para cortina com altura $h/Dt=-0,5$ e afastamento $d/Dt=0,75$: a) Zona plastificada; b) Vetores de deslocamentos totais.....	655
Figura 4.6 – Influência do afastamento da cortina em ηl para diferentes instantes de tempo e profundidades: a) $h/Dt=-0,5$; b) $h/Dt=0,0$; c) $h/Dt=0,5$; d) $h/Dt=0,75$; e) $h/Dt=1,0$	677
Figura 4.7 – Influência do afastamento da cortina no esforço axial máximo normalizado no suporte do túnel para diferentes instantes de tempo e profundidades: a) $h/Dt=-0,5$; b) $h/Dt=0,0$; c) $h/Dt=0,5$; d) $h/Dt=0,75$; e) $h/Dt=1,0$.	699
Figura 4.8 – Influência do afastamento da cortina no esforço axial máximo da cortina para diferentes instantes de tempo e profundidades: a) $h/Dt=-0,5$; b) $h/Dt=0,0$; c) $h/Dt=0,5$; d) $h/Dt=0,75$; e) $h/Dt=1,0$.	71
Figura 4.9 – Influência do afastamento da cortina no esforço axial máximo da cortina para diferentes instantes de tempo e profundidades: a) $h/Dt=-0,5$; b) $h/Dt=0,0$; c) $h/Dt=0,5$; d) $h/Dt=0,75$; e) $h/Dt=1,0$.	722
Figura 4.10 – Influência do afastamento da cortina no momento fletor máximo absoluto da cortina para diferentes instantes de tempo e profundidades: a) $h/Dt=-0,5$; b) $h/Dt=0,0$; c) $h/Dt=0,5$; d) $h/Dt=0,75$; e) $h/Dt=1,0$.	74

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Nos dias de hoje, o crescimento populacional nas grandes cidades é um fator global, o que resulta numa exigência maior dos serviços públicos e sistemas de trânsito. O processo de urbanização é a razão por trás de tal crescimento, que acaba por resultar em maiores volumes de tráfego, o que por sua vez afeta as infraestruturas das cidades, principalmente as de transporte. De forma a minimizar este problema, diversas soluções que procuram maximizar a eficiência dos meios de transporte, preservando ou melhorando a qualidade de vida da população e com o menor impacto ambiental possível, têm sido analisadas por especialistas. A construção de túneis demonstrou ser uma solução meritória, permitindo uma capacidade de transporte em massa, sem utilizar o terreno superficial.

O maior desafio na construção de túneis em centros urbanos se encontra no impacto que o mesmo tem nos edifícios e infraestruturas à superfície, uma vez que os movimentos induzidos no maciço podem causar danos que comprometem a sua utilização, pelo que existe a necessidade de se ter uma previsão confiável destes movimentos. Com o fim de minimizar este impacto, diversas medidas protetivas podem ser implementadas, sendo estas mais necessárias quando o túnel é superficial e a sua a construção acontece próxima a edifícios.

Para ilustrar o impacto que pode ter a construção de túneis na proximidade de edifícios foi selecionado um caso exemplificativo, de entre os diversos disponíveis na literatura, e do qual se faz um breve relato. Frischmann et al. (1994) relata que a Mansion House em Londres, Reino Unido, presente na Figura 1.1, devido a construção da Central Line no final do século XIX, sofreu inúmeras deformações, chegando a rachaduras de cerca de 25mm. Mais recentemente, aquando da construção do Light Railway, e para evitar novos problemas optou-se por adotar medidas protetivas, sendo estas a colocação de cortinas formadas por colunas ao norte e a leste do edifício (localizada entre o edifício e o túnel) e o reforço da fundação do mesmo, as quais permitiram minimizar significativamente novas deformações.



Figura 1.1 – A Mansion House (Frischmann et al., 1994).

1.2. Objetivos da dissertação

A dissertação tem como objetivo analisar a influência ao longo do tempo da colocação de uma cortina na mitigação dos deslocamentos induzidos pela escavação num maciço argiloso de um túnel. O estudo foi baseado nas condições geométricas de um caso real, que corresponde ao túnel da Secção 63, que liga as estações do Cais do Sodré e da Baixa-Chiado, da Linha Verde do Metro de Lisboa, assumindo-se que todo o maciço é composto pelas camadas aluvionares aí presentes. Neste estudo pretende-se:

- Avaliar a influência de uma cortina tida como impermeável na dissipação dos acréscimos de pressão intersticial e na evolução do nível freático ao longo do tempo, assim como nos esforços no suporte do túnel e na própria cortina.
- Quantificar o efeito mitigador da cortina nos assentamentos da bacia de subsidência ao longo do tempo, recorrendo-se para tal aos parâmetros de eficiência local e global.
- Efetuar um estudo paramétrico onde se analisa a influência da distância e da altura da cortina em relação ao túnel nos resultados dos parâmetros da eficiência e nos esforços do suporte e da cortina.

Para o efeito são realizadas análises 2D pelo método dos elementos finitos (MEF), utilizando o software de elementos finitos RS2 v2021 (Rocscience, 2021) e efetuando uma análise acoplada de forma a se poder simular o processo de consolidação do maciço.

1.3. Estrutura da dissertação

Para além do presente capítulo (Cap. 1), esta dissertação é composta por mais 4 capítulos que a seguir se descrevem.

No segundo capítulo é apresentada uma visão geral dos impactos que a escavação de um túnel causa em maciços argilosos, descrevendo-se o impacto do método construtivo utilizado para a escavação e o efeito da permeabilidade do suporte no processo de consolidação. São apresentados alguns exemplos de tipos de medidas protetivas que podem ser utilizadas para mitigar os deslocamentos induzidos pela escavação de túneis. Ainda neste capítulo, analisa-se o mecanismo de funcionamento da utilização de uma cortina de contenção como medida mitigadora de proteção, descrevendo-se os parâmetros adimensionais que avaliam a sua eficiência local e global bem como o seu efeito nos esforços no suporte do túnel. Por fim descrevem-se 3 casos de estudo existentes na bibliografia, Bilotta (2008), Rampello et al. (2019) e Massicano (2020), que demonstram a importância da utilização deste tipo de solução.

No terceiro capítulo é descrita a forma como foram realizadas as análises para o estudo do problema abrangido na dissertação, assumindo-se um estado plano de deformação (2D) e considerado um cálculo acoplado para possibilitar a determinação dos acréscimos de pressão intersticial ao longo do tempo. São inicialmente descritos os modelos utilizados, as características dos materiais e a sequência implementada na modelação numérica. Numa primeira fase é analisada a influência da permeabilidade do suporte. Posteriormente é efetuada uma análise aprofundada do efeito da presença de uma cortina adjacente à escavação do túnel, sendo avaliada a sua influência no comportamento do maciço, nomeadamente no que se refere à dissipação dos excessos de pressão intersticial e à evolução dos esforços no suporte ao longo do tempo, tendo por comparação o caso em que não existe cortina (campo livre). Tendo por base os resultados obtidos é avaliada a evolução da eficiência da cortina na mitigação dos movimentos do maciço ao longo do tempo, assim como dos esforços na própria cortina e no suporte do túnel.

No quarto capítulo são apresentados os resultados de um estudo paramétrico no qual se fez variar o afastamento e a altura da cortina em relação ao túnel, num total de 25 diferentes configurações geométricas. Neste estudo é avaliada a influência do posicionamento da cortina nos resultados das eficiências, local e global, e de como estas variam a sua evolução ao longo do tempo. É ainda analisada a influência da posição da cortina nos esforços no suporte do túnel e na cortina.

No quinto e último capítulo são expostas as principais conclusões tiradas ao longo desta dissertação, assim como sugeridas propostas para futuras pesquisas.

2. COMPORTAMENTO DE TÚNEIS EM MACIÇOS ARGILOSOS

2.1. Deformações em maciços induzidas por escavação de túneis

A construção de túneis e escavações profundas é inevitavelmente acompanhada por movimentos do maciço terroso (Burland, 1995). Isto ocorre, pois, o processo de escavação de túneis num maciço traduz-se, no ponto de vista mecânico, na remoção das tensões instaladas na superfície do contorno da escavação, originando movimentos para o interior da cavidade até que um novo estado de equilíbrio de tensões seja atingido.

A Figura 2.1 ilustra os assentamentos em desenvolvimento longitudinal que o avanço da escavação de um túnel provoca na superfície do terreno, sendo tal deformação habitualmente denominada de bacia de subsidência.

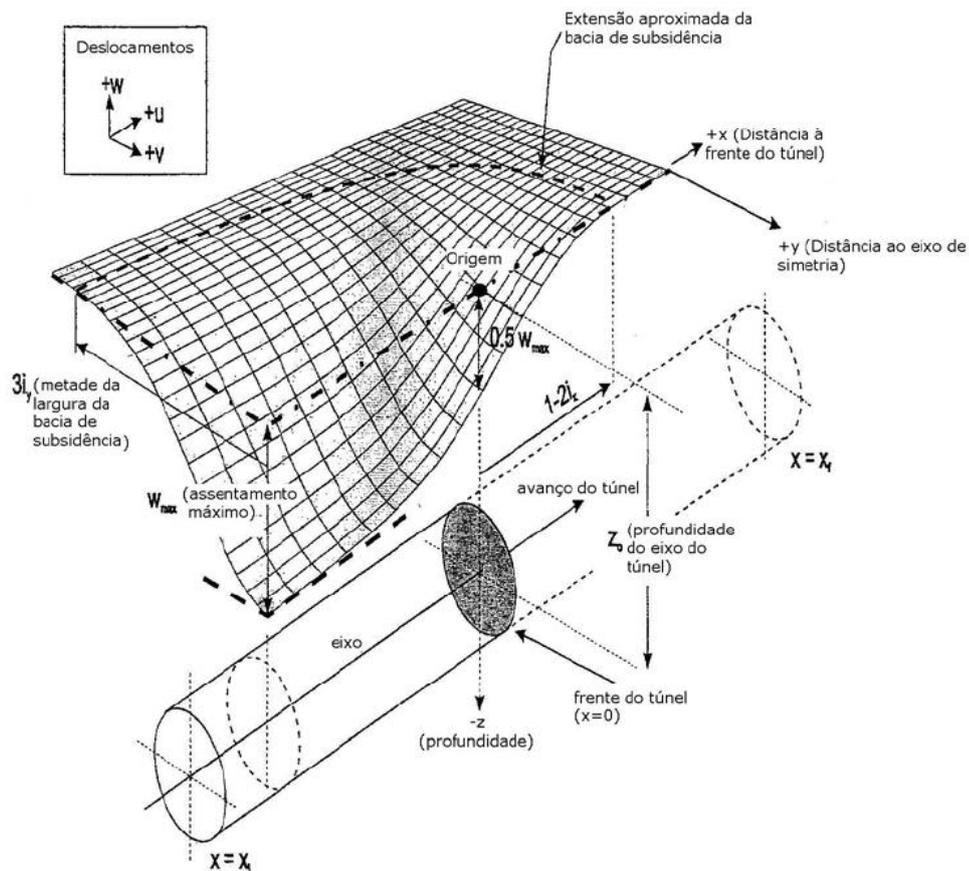


Figura 2.1 – Bacia de subsidência devido ao avanço da escavação de um túnel (adaptado de Potts, 2001).

Como demonstrado em alguns casos reais (Frischmann et al., 1994; Selby, 1999) as deformações induzidas pela escavação de túneis podem causar danos significativos nas estruturas presentes à superfície, podendo no caso de solos argilosos prolongar-se por bastante tempo.

Em 1969, Peck, baseado na observação de resultados, verificou que a distribuição Gaussiana poderia representar o assentamento transversal induzido pela construção de um túnel. Tal foi comumente aceite pela “comunidade geotécnica”. Desta forma é usualmente considerado que, na ausência de outros efeitos, o perfil de solo deslocado acima do túnel toma a forma de uma curva de probabilidade normal invertida, com o seu centro acima do eixo vertical do túnel (Frischmann et al., 1994), como mostra a Figura 2.1.

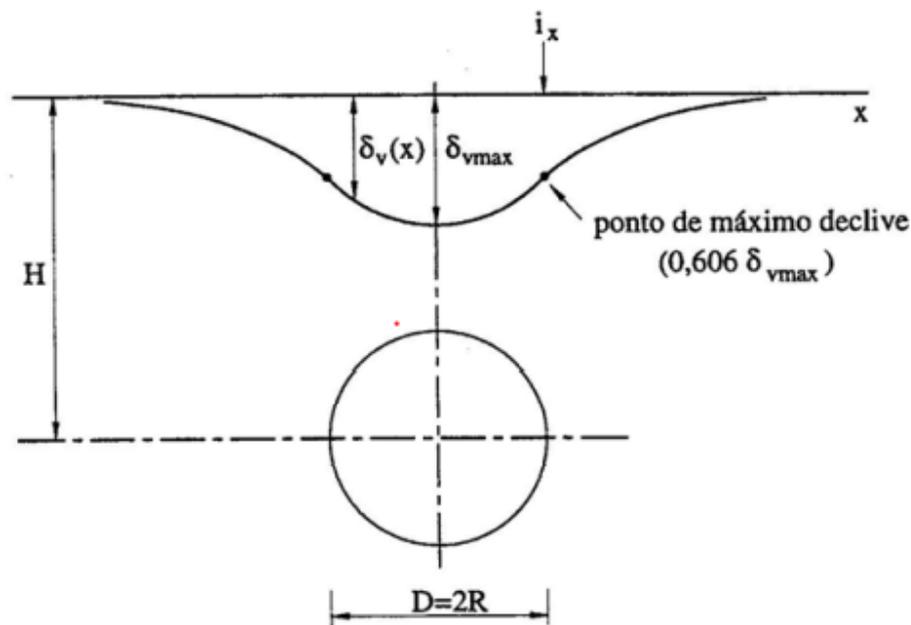


Figura 2.2 – Perfil transversal dos assentamentos superficiais (curva de Gauss) (Almeida e Sousa, 1998).

A curva de Gauss representada na Figura 2.2 pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\delta_v(x) = \delta_{v\text{ máx}} * \exp\left(\frac{x^2}{2 * i_x^2}\right) \quad (2.1)$$

Onde $\delta_{v\text{ máx}}$ é o assentamento máximo no eixo de simetria, δ_v é o assentamento transversal em qualquer ponto da curva a uma distância x do eixo de simetria e i_x a distância ao ponto de inflexão da curva de Gauss, onde ocorre o maior declive, separando a zona de compressão da

zona de tração. É digno de nota que a localização do ponto de inflexão é fundamental para definir os critérios de deformação para avaliação de risco nas proximidades do túnel. Para definir o valor da distância ao ponto de inflexão da curva de Gauss, i_x , O'Rilley & New (1982) propuseram a Eq. 2.2, onde este fator é função da profundidade (z), e do parâmetro adimensional de alargamento da curva (K). O parâmetro K tipicamente varia entre 0,25 e 0,35 para solos granulares (Mair & Taylor, 1996), enquanto em solos coesivos frequentemente assume valores entre 0,4 e 0,6 (Mair & Taylor, 1997a).

$$i_x = K * z \quad (2.2)$$

De acordo com a Eq. 2.1 e conforme representado na Figura 2.2, o assentamento no ponto de inflexão corresponde a $0,606 * \delta_v máx$. Integrando a equação da curva de Gauss (Eq. 2.1) é possível obter a equação do volume da bacia de subsidência, V_{st} :

$$V_{st} = \int \delta_v(x) * dx = \sqrt{2 * \pi} * i_x * \delta_v máx \quad (2.3)$$

Onde V_{st} é o volume da bacia de subsidência por metro linear de desenvolvimento de túnel.

Outro fator que influencia os danos causados nos edifícios localizados à superfície são os deslocamentos horizontais, δ_h . A disposição dos deslocamentos horizontais à superfície, apresentados na Figura 2.3, pode ser estimada pela Eq. 2.4, na qual H é a profundidade do centro do túnel, que tem por base a hipótese de O'Reilly e New (1982), em que os movimentos em qualquer ponto do maciço são radiais com direção ao centro do túnel.

$$\delta_h(x) = \frac{x * \delta_v(x)}{H} \quad (2.4)$$

Derivando a Eq. 2.4 é possível determinar a deformação horizontal à superfície, na direção transversal ao túnel (Eq. 2.5).

$$\varepsilon_h(x) = \frac{d\delta_h(x)}{dx} = \frac{1}{H} * \left(1 - \frac{x^2}{i_x}\right) * \delta_v(x) \quad (2.5)$$

A Figura 2.3 exibe, em perfil, os deslocamentos e deformações horizontais induzidas pela escavação de um túnel, bem como a separação entre a zona de tração e a zona de compressão

das deformações. Como se pode observar os deslocamentos horizontais máximos ocorrem nos pontos de inflexão.

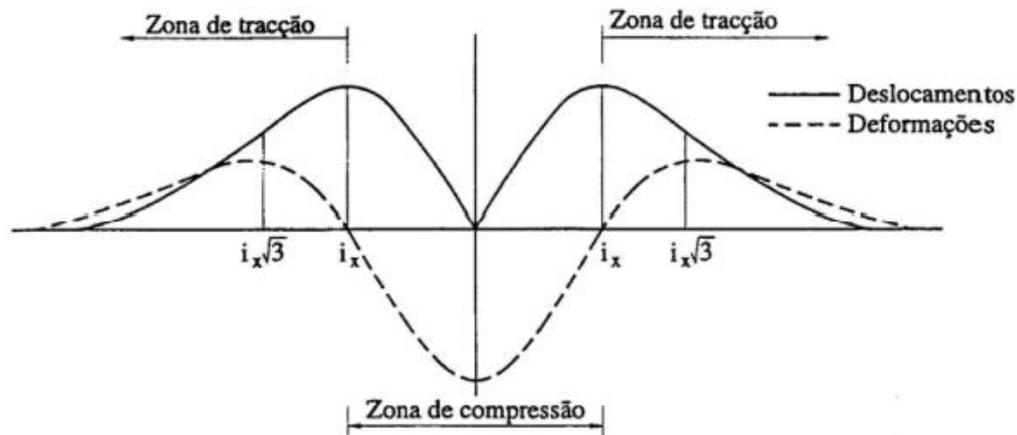


Figura 2.3 – Distribuição dos deslocamentos e das deformações horizontais à superfície do terreno (Almeida e Sousa, 1998).

Quanto à direção longitudinal, de acordo com Massicano (2020), os projetistas de túneis costumam considerar que os deslocamentos induzidos à superfície por conta da escavação costumam ser compensados a longo prazo visto que a inclinação que as edificações sofrem no momento da escavação tendem a ser compensadas com o afastamento do processo de escavação.

2.2. Efeitos da consolidação do maciço após a escavação de túneis

Em solos granulares, dada a sua elevada permeabilidade, a alteração do estado de tensão total originada pela escavação de um túnel reflete-se de imediato no estado de tensão efetiva. O mesmo não ocorre em solos finos. Nestes, devido à sua permeabilidade reduzida, não ocorre uma dissipação imediata dos excessos de pressão intersticial gerados. Com o tempo, estes excessos de pressão intersticial gerados a curto prazo dissipam-se e, conseqüentemente, são alterados os estados de tensão e de deformação no maciço envolvente. Assim, o comportamento de um túnel aberto num maciço argiloso é dependente do tempo, traduzindo-se essa dependência particularmente nas cargas que atuam na estrutura de suporte e nos assentamentos induzidos à superfície do terreno (Lopes et al., 2005).

2.2.1. Conceitos gerais de consolidação em maciços argilosos

O assentamento por consolidação em solos argilosos é diferido no tempo e normalmente evolui com uma taxa de variação decrescente, dado que à medida que o excesso de pressão intersticial tende para zero, o gradiente hidráulico e a velocidade de percolação diminuem significativamente.

A dissipação do excesso de pressão intersticial depende, essencialmente, de três aspectos:

- Permeabilidade da argila
- Espessura do estrato argiloso
- Condições de drenagem nas fronteiras do estrato

Mais especificamente no caso de túneis, como já citado anteriormente, este processo de escavação afeta diretamente o estado de tensões do maciço, causando a curto prazo a geração do excesso de pressões intersticiais, que são distintas consoante o estado de sobreconsolidação do solo.

Oliveira et al. (2002) referem que em maciços constituídos por argilas sobreconsolidadas existe uma componente da redução das pressões intersticiais devido à tendência expansiva destes solos quando sujeitos ao corte (dilatância positiva), para além da causada pela redução da tensão média devido à escavação. Os mesmos autores afirmam que em argilas normalmente consolidadas ou levemente sobreconsolidadas o problema é mais complexo. No caso da escavação de um túnel, tal complexidade reflete-se nos efeitos contraditórios que o decréscimo da tensão normal média e o aumento da tensão de corte causam na geração do excesso de pressão intersticial, podendo este vir a ter um valor negativo ou positivo. Para o caso de o excesso de pressões intersticiais ser positivo, a dissipação da mesma, a longo prazo, acarreta uma diminuição volumétrica do solo, e conseqüentemente maiores assentamentos, podendo estes ser impactantes na vizinhança da escavação. No caso contrário, i.e., na geração de excessos de pressões intersticiais negativos, o processo de consolidação a longo prazo é caracterizado pela expansão do solo o que por sua vez também pode ter impactos negativos na envolvimento do túnel.

2.2.2. Influência do processo construtivo de túneis.

A influência do processo construtivo de túneis, ou seja, do método de escavação utilizado, em maciços que sofrem consolidação tem uma grande influência nos excessos de pressão intersticial gerados a curto prazo (Oliveira et al., 2002).

São principalmente utilizados dois processos construtivos em túneis:

- **Construção sequencial:** Métodos em que o avanço do túnel se faz sequencialmente estando a frente submetida apenas à pressão atmosférica. Oliveira et al. (2002) baseado em resultados de análises (Schimdt, 1989; Mair & Taylor, 1993), ensaios em modelos reduzidos e observações de obras (New & Bowers, 1994) alega que em métodos construtivos sequenciais, em que a frente da escavação se encontra descomprimida, o comportamento da pressão intersticial é dependente do alívio de tensões permitido e das propriedades do solo. Quase todos estes métodos seguem os princípios do chamado NATM (New Austrian Tunneling Method). A Figura 2.4 ilustra um exemplo de construção sequencial.



Figura 2.4 – Escavação sequencial feita por máquinas de ataque pontual utilizando o NATM (Almeida e Sousa, 2020).

- **Construção mecanizada:** Métodos que utilizam tuneladoras (TBM's), capazes de procederem à escavação aplicando pressão na frente e de instalarem suporte logo atrás da frente impedindo assim a descompressão do maciço. Um exemplo de uma máquina tuneladora se encontra na Figura 2.5. Shirlaw (1995) refere que em tuneladoras modernas, com confinamento líquido ou com contra-pressão de terras, o avanço do escudo gera frequentemente excessos de pressão intersticial positivos devido à aplicação de pressões na frente maiores do que as tensões in-situ. Tal ocorre também no perímetro da escavação devido à injeção de argamassa e calda de cimento para o preenchimento de vazios entre o suporte e a superfície.



Figura 2.5 – Tuneladora usada na escavação do troço Campo Grande – Odivelas (linha Amarela) (Salgueiro Amaral, 2006).

2.2.3. Influência da permeabilidade do suporte

Tal como referido anteriormente, a abertura de um túnel em solos finos gera um excesso de pressões intersticiais no maciço alterando assim o estado de tensão inicial do mesmo e fazendo com que, com a passagem do tempo e à medida que o excesso de pressão intersticial se dissipa, haja uma alteração do estado de tensão até à consolidação final do maciço, ou seja, até que as condições hidráulicas de equilíbrio final sejam atingidas. Naturalmente, as condições de equilíbrio hidráulicas finais são dependentes da relação entre a permeabilidade do maciço e do suporte instalado (Lopes et al., 2005).

De acordo com Lopes et al. (2005), se o suporte do túnel for impermeável, o maciço tende a reestabelecer o estado de equilíbrio hidrostático através da dissipação do excesso de pressão intersticial independentemente de esta ser negativa ou positiva. Já para o caso de um suporte permeável, o túnel funciona como um dreno, estabelecendo-se um escoamento com direção ao túnel até que se atinja a consolidação e um regime estacionário de percolação.

Lopes et al. (2005) realizou o estudo numérico da escavação de um túnel circular com 10m de diâmetro, escavado a 20m de profundidade, num estrato de argila sobreconsolidada (Blue Boston Clay) subjacente a uma camada de areia com 5m de espessura. A estrutura de suporte utilizada foi constituída por um anel contínuo de betão de 0,3m de espessura. Problema cuja ilustração se encontra na Figura 2.6.

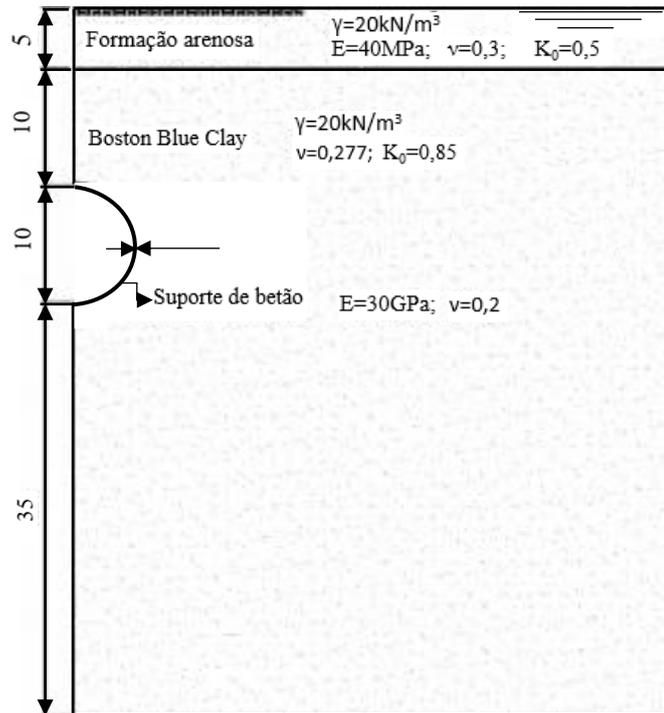


Figura 2.6 – Corte geológico-geotécnico e geometria do problema (Lopes et al., 2005).

Foram realizadas análises de quatro casos, onde se variou a permeabilidade do suporte, nomeadamente o valor da razão $k_{solo}/k_{suporte}$, considerando-se no caso A um túnel impermeável. Os casos analisados encontram-se representados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Resumo das análises efetuadas (adaptado de Lopes et. al., 2005).

Cálculo	Tipo de Suporte	$k_{solo}/k_{suporte}$
A	Impermeável	-
B	Permeável	1000
C	Permeável	100
D	Permeável	10

Lopes et al. (2005) analisou os resultados dos deslocamentos horizontais e assentamentos induzidos na superfície, bem como esforços axiais e momento fletor presentes no suporte do túnel. Os resultados obtidos se encontram no conjunto de figuras a seguir.

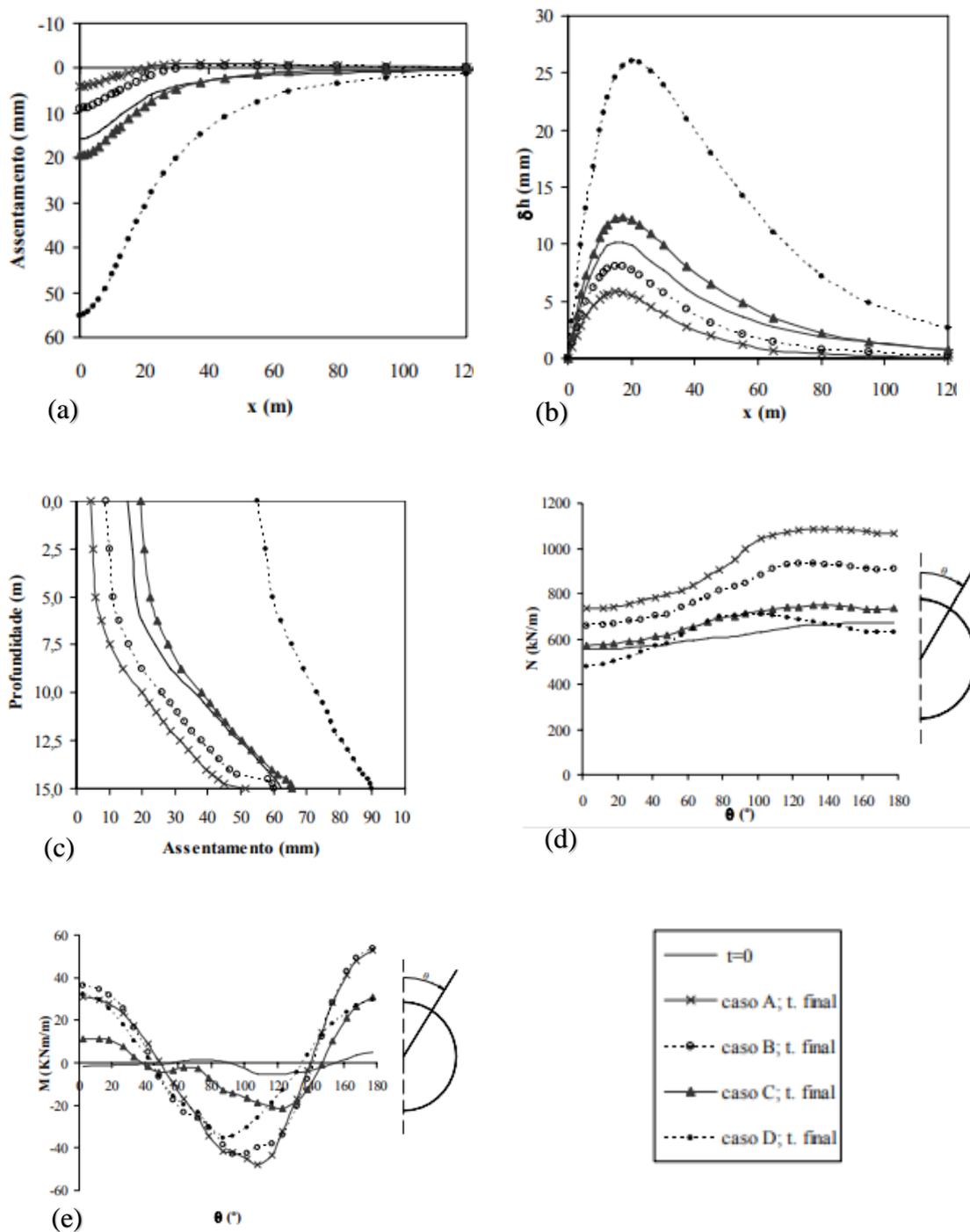


Figura 2.7 – Efeito da permeabilidade do suporte: a) assentamentos na superfície; b) deslocamentos horizontais na superfície; c) assentamentos no alinhamento vertical no plano de simetria; d) esforços axiais no suporte; e) momentos fletores no suporte (Lopes et al., 2005).

A partir da Figura 2.7 pode-se observar nitidamente a influência da permeabilidade relativa entre o solo e o suporte. Nota-se nas Figuras 2.7a), 2.7b) e 2.7c) que tanto os assentamentos quanto os deslocamentos horizontais induzidos à superfície do terreno e os deslocamentos verticais induzidos no plano de simetria vertical são consideravelmente maiores à medida que a razão $k_{solo}/k_{suporte}$ diminui. Para os casos onde $k_{solo}/k_{suporte}=10$, i.e., quando a diferença de permeabilidades é menor, e para o caso de suporte impermeável observa-se existir alguma recuperação dos assentamentos até final da consolidação. Na Figura 2.7d) observa-se que há um acréscimo de esforço axial ao longo do tempo sendo este tanto menor quanto mais próximas forem as permeabilidades do suporte e do solo, sendo o maior valor de N para um suporte impermeável. Com base na Figura 2.7e) pode concluir-se que, de uma forma geral, os momentos fletores positivo e negativo são tanto maiores quanto menor for permeabilidade do suporte.

2.3. Utilização de cortinas de contenção como medida de mitigação de deformações

2.3.1. Técnicas de mitigação das deformações

Antes de considerar a adoção de medidas protetoras próximas à superfície, deve-se dar atenção especial às medidas que podem ser aplicadas no interior do túnel para mitigar a perda de volume de solo. Há uma variedade de medidas que podem ser adotadas, como por exemplo, reforçar o suporte na face ou na sua proximidade, reduzir o tempo de aplicação do suporte após a escavação, aplicação de pregagens na face do túnel, etc (Burland, 1995).

Conforme Burland (1995), para o caso de algumas edificações específicas, caso as medidas citadas anteriormente não sejam efetivas, deve-se proceder à aplicação de técnicas de proteção à superfície ou no próprio edifício. Algumas das técnicas possíveis de aplicar são as seguintes:

- **Reforço de fundações (ensoleiramento):** Inserção de um sistema de fundação alternativo que elimine ou minimize os assentamentos diferenciais causados pela escavação do túnel (Burland, 1995). Segundo Frischmann et al. (1994), tal sistema foi proposto como medida de proteção da Mansion House cuja fundação era inicialmente composta por estacas de madeira e foi reforçada com concreto ao longo de sua vida útil. Numa primeira fase, se iria desacoplar o edifício das suas fundações e inserir macacos hidráulicos; numa segunda fase, se iniciaria ao restauro da fundação existente e; numa terceira fase, efetuar-se-ia o reforço da fundação restaurada.

- **Reforço por *Grouting*:** a utilização de um reforço através do melhoramento de solo permite reduzir os movimentos que ocorrem devido à escavação de um túnel (Massicano, 2020). De acordo com Mair et al. (1994), o princípio da técnica consiste em injetar calda de cimento entre a fundação do edifício e o túnel para melhorar as características do maciço e compensar os movimentos induzidos pela escavação. Bai et al. (2014) afirma que a utilização de *grouting* é vantajosa uma vez que usa um equipamento simples e de baixo custo que produz pouca vibração e pouco ruído. A injeção de *grouting* foi uma das medidas de reforço do solo utilizadas na construção do Bund Tunnel, com comprimento de 3,3km e 14,27m de diâmetro, que teve início em 2007 na China.
- **Barreira física:** Segundo Ledesma & Alonso (2017), a utilização de paredes de proteção é em geral uma boa técnica para reduzir substancialmente o impacto da escavação de túneis na proximidade de edifícios vulneráveis. Até mesmo em casos onde os movimentos de solo são muito pequenos, as paredes providenciam uma garantia de redução do risco de danos severos em caso de surgimento de problemas inesperados durante a fase de escavação. Em Barcelona a escavação de um túnel de conexão entre as estações de Sants e Sagrera, que se encontram em lados opostos da cidade, afetaria edifícios de património mundial – a Casa Milà (também chamada de La Pedrera) e a basílica da Sagrada Família – o que fez com que medidas protetivas fossem adotadas. A medida adotada para proteger a Sagrada Família e mitigar os efeitos da escavação do túnel de 11,55m de diâmetro consistiu na construção de uma parede de estacas de betão armado com 1,5m de diâmetro, espaçadas 2m, com uma extensão total de 230m. Concluiu-se que a cortina utilizada não reduziu de forma significativa a perda de volume, porém reduziu os assentamentos para metade (Ledesma & Alonso, 2017).

2.3.2. Mecanismo de funcionamento de cortinas

A utilização de cortinas para mitigação de movimentos de solo induzidos pela escavação de túneis tem, normalmente, a função principal de atuar como uma barreira física entre o túnel e o edifício a ser protegido. Uma vez que na escavação do túnel ocorre um alívio de tensões no maciço e os deslocamentos de solo são direcionados à escavação, a barreira atua de forma a oferecer resistência à parcela do maciço que tende a deslocar-se, reduzindo, assim, os assentamentos no tardo da barreira e alterando o formato da bacia de subsidência. A Figura 2.8 ilustra o efeito da presença de uma cortina nos assentamentos induzidos pela escavação de um túnel, onde a linha tracejada representa os assentamentos em situação de campo livre, isto

é, sem cortina, e a linha contínua representa os assentamentos em caso de a escavação ser feita após a instalação da cortina.

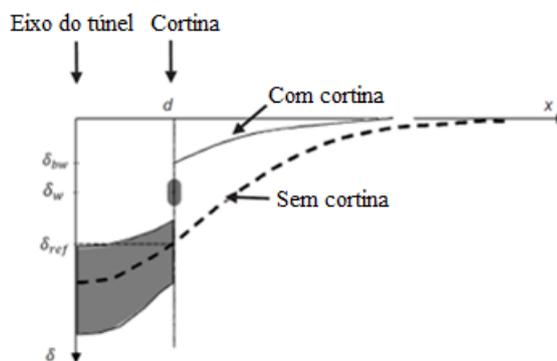


Figura 2.8 – Exemplo do efeito de uma cortina nos assentamentos atuantes no maciço (adaptado de Bilotta, 2008).

Como citado por Rampello et al. (2019) a utilização de cortinas como medida de mitigação de deformações é baseada essencialmente em empirismo ao invés de seguir um processo racional. Como Rampello et al. (2019) também mencionam, tanto barreiras compostas por estacas (Ledesma et al., 2017; Katzenbach et al., 2013; Bai et al., 2014) ou por colunas de jet-grouting (Gens et al., 2006; Di Mariano et al., 2007; Oteo et al., 2007) foram utilizadas para este efeito e tiveram uma eficiência que variou entre 60% e 90% na redução de movimentos de solo induzidos pela construção de túneis próximos à cortina.

A experiência observada em casos reais sugere que é necessário um controle cuidadoso do processo construtivo das barreiras por forma a prevenir que a mesma origine efeitos colaterais indesejados. De uma forma geral, cortinas de estacas não causam grande impacto nas edificações a serem protegidas, enquanto que a elevada pressão associada à construção de colunas de jet-grouting pode induzir deslocamentos significativos nas edificações como ocorreu, por exemplo, nos casos citados por Gens et al. (2006), Di Mariano et al. (2007) e Oteo et al. (2007).

A Figura 2.9 ilustra o caso estudado por Bai et al. (2014) da utilização de uma linha de estacas moldadas para proteção do Pujiang Hotel devido à construção do Bund Tunnel em Shanghai (China). O edifício, na época, estava em serviço há aproximadamente 150 anos e a sua estrutura principal era composta de madeira, alvenaria e betão. O maciço era essencialmente composto por camadas de solos argiloso ou silto-argiloso. Previamente à escavação verificou-se que o hotel continha danos evidentes, nomeadamente rachaduras nas paredes e inclinação da estrutura.

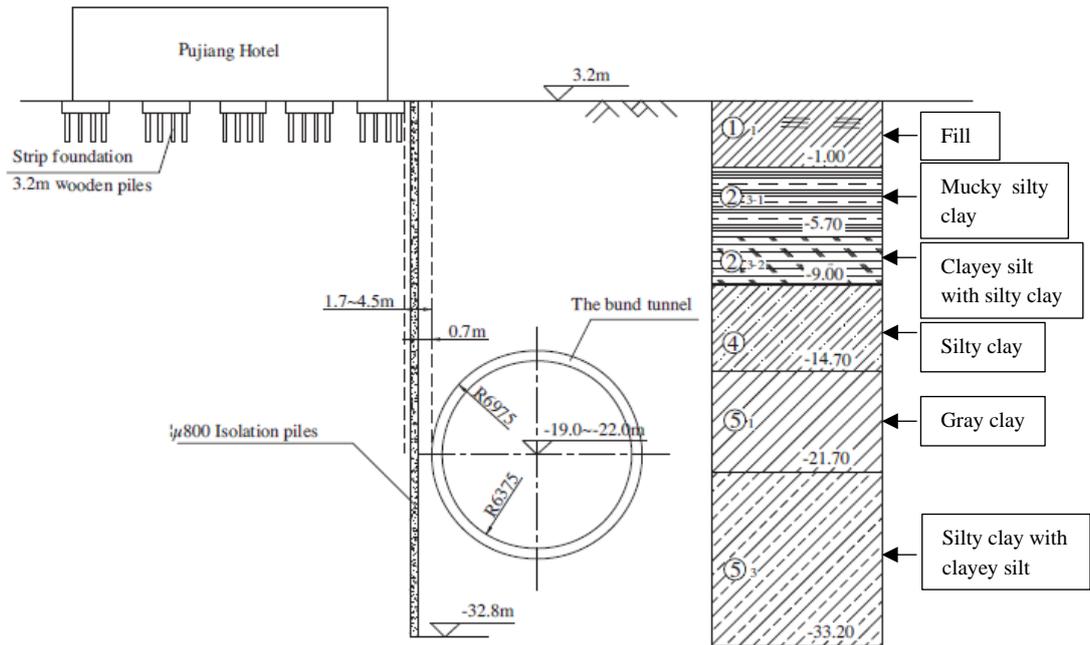


Figura 2.9 – Perfil do Pujiang Hotel e do Bund Tunnel (Bai et al., 2014).

Para a situação de campo livre foram estimados, por métodos empíricos (Peck, 1969) e pelo método dos elementos finitos (MEF), respetivamente, assentamentos máximos de 34mm e 25mm no eixo do túnel. Bai et al. (2014) realizaram uma análise 3D pelo MEF com a instalação de um alinhamento de estacas. A Figura 2.10 mostra o resultado previsto dos assentamentos na fundação do Pujiang Hotel com a existência da cortina (linha vermelha) e na situação de campo livre (linha preta). A linha vermelha tracejada representa a localização da cortina. É de notar que com a cortina, os assentamentos previstos reduzir-se-iam significativamente, obtendo-se uma redução do assentamento máximo previsto de aproximadamente 25mm para apenas 5mm.

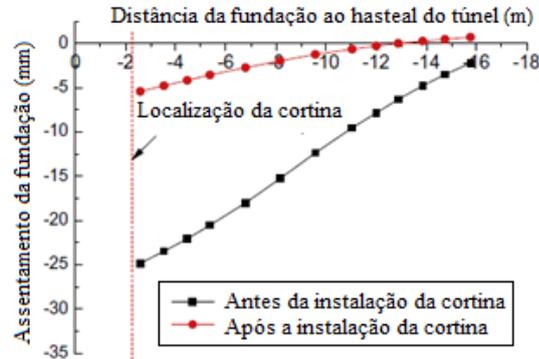


Figura 2.10 – Assentamentos na fundação do Pujiang Hotel com e sem cortina de estacas (Bai et al., 2014).

2.3.3. Avaliação da eficiência das cortinas

Para analisar a eficiência de uma cortina são geralmente utilizados dois parâmetros adimensionais: eficiência local (Bilotta, 2008) e eficiência global (Rampello et al., 2019).

A eficiência local, η_l , expressa pela Eq. 2.6, tem como objetivo representar a influência da cortina nos assentamentos sofridos pelo solo. Essa influência é determinada a partir da comparação entre os assentamentos localizados imediatamente atrás da cortina, $\delta_{v,w}$, em relação à situação sem cortina na mesma localização, $\delta_{v,cl}$.

$$\eta_l = 1 - \frac{\delta_{v,w}}{\delta_{v,cl}} \quad (2.6)$$

Quando $\eta_l=1$, a cortina tem eficiência máxima e anula completamente os assentamentos atrás da parede. Se $\eta_l=0$, a parede não tem qualquer efeito sobre os assentamentos e caso $\eta_l < 0$, então a utilização da cortina é prejudicial. Massicano (2020) analisou a diferença entre η_l atrás e à frente da cortina de maneira a diferenciar a influência da cortina nos assentamentos em ambos os lados.

A eficiência global, η_g , de forma semelhante à eficiência local, também representa a eficiência da cortina através de uma comparação entre a situação de campo livre e a situação com cortina. Todavia tal comparação é efetuada em função do volume da bacia de subsidência de cada situação: $V_{s,w}$ é volume da bacia de subsidência com a inclusão da cortina e $V_{s,cl}$ o volume da bacia de subsidência para a situação de campo livre. A Eq. 2.7 permite o cálculo de η_g , em que

os valores obtidos têm um significado igual ao apresentado anteriormente para a eficiência local.

$$\eta_g = 1 - \frac{V_{s,w}}{V_{s,cl}} \quad (2.7)$$

Como será explicado no decorrer deste estudo, de forma a distinguir a influência da cortina no volume da bacia de subsidência à frente e atrás da cortina, separou-se a eficiência global em duas parcelas: eficiência global à frente da cortina, $\eta_{g,fr}$, que inclui toda a bacia à frente da cortina e sobre o túnel, e eficiência global atrás da cortina, $\eta_{g,be}$, correspondente à bacia localizada na zona onde se pretende mitigar os assentamentos.

Massicano (2020) também analisou a influência da cortina nos esforços do suporte através da comparação dos valores determinados com cortina e dos obtidos em campo livre. Esse cálculo é expresso pelas Equações 2.8 e 2.9, onde N_{max} e M_{max} (M_{min}) são o esforço axial máximo e o momento fletor máximo (mínimo) computado com a cortina instalada, enquanto $N_{max,cl}$ e $M_{max,cl}$ ($M_{min,cl}$) são os respectivos esforços na situação de campo livre.

$$\frac{N_{max}}{N_{max,cl}} \quad (2.8)$$

$$\frac{M_{max}}{M_{max,cl}} ; \frac{M_{min}}{M_{min,cl}} \quad (2.9)$$

2.3.4. Estudos efetuados

2.3.4.1. Bilotta (2008)

Bilotta (2008) fez um estudo com o objetivo de avaliar a eficiência de uma cortina vertical na alteração dos deslocamentos induzidos pela escavação de um túnel num solo argiloso. O estudo envolveu realizar testes em centrífugadora e análises numéricas para simular o comportamento da construção de um túnel com diâmetro $Dt=8m$ e uma relação $C/Dt=1$, onde C representa o recobrimento do túnel. Nesses estudos o autor variou parâmetros como a distância entre a cortina e o eixo do túnel, d , a altura da cortina, L , a espessura da cortina (desde muito flexível a rígida), t , e a rugosidade da interface parede-solo (lisa ou rugosa).

O estudo realizou-se considerando uma perda de volume, V , constante e de valor igual a 1,35%. Os valores da distância analisados foram $d=Dt$ e $d=1,5Dt$. De forma geral a cortina apresentou maiores valores da eficiência local, η_l , com $d=Dt$ para cortinas de maior altura. Na variação entre uma cortina rugosa ou lisa, Bilotta (2008) verificou que paredes rugosas têm um desempenho aparentemente prejudicial na mitigação dos deslocamentos, enquanto paredes lisas apresentam uma eficiência positiva, mesmo para cortinas de menor altura. Em ambos os casos a eficiência tende a aumentar com o aumento da altura da cortina. Foi igualmente concluído que a rigidez da cortina é pouco influente nos resultados de η_l obtidos. Foi feita ainda uma análise para avaliar a influência do peso da cortina que, de acordo com Bilotta (2008), pode ser a responsável por valores negativos de η_l . Tal análise foi feita considerando a cortina (leve) com o mesmo peso volúmico do solo envolvente. Os resultados indicam que cortinas leves apresentam maiores valores para eficiência com menores alturas da cortina do que a correspondente cortina “pesada”. Porém mesmo cortinas leves, com alturas reduzidas, são ineficientes. (Bilotta, 2008). Por fim, Bilotta (2008) chegou a conclusão que a eficiência da cortina depende principalmente da altura da mesma.

2.3.4.2. Rampello et al. (2019)

Rampello et al. (2019) realizou diversas análises numéricas de forma a estudar a eficiência de paredes no controlo de deslocamentos induzidos por túneis. O estudo, baseado nos resultados obtidos por Bilotta & Taylor (2005) e Bilotta (2008), foi efetuado considerando uma cortina contínua e um alinhamento de estacas afastadas. O estudo de Rampello et al. (2019) realizou análises pelo método dos elementos finitos (MEF), que tiveram como base o perfil de solo e do túnel tipicamente encontrados no subsolo de Roma, mais especificamente na Porta Asinaria, perto da Muralha Aureliana.

Rampello et al. (2019) realizou as análises considerando um volume constante da bacia igual a $V_{s,cl}=1\%$, de forma que os assentamentos mínimos, i.e., nas extremidades do modelo, tivessem valor nulo. Para a geometria foi considerado um túnel com diâmetro $Dt=6,7\text{m}$, com a profundidade do eixo $z_0=25\text{m}$, enquanto a cortina é constituída por uma parede contínua com espessura $t=0,6\text{m}$ ou por estacas com diâmetro $Dp=0,6\text{m}$ espaçadas entre eixos de forma variável. Tendo por base estes valores de referência foram feitos variar os seguintes parâmetros: distância entre o eixo do túnel e a cortina, d , com valor variável entre $0,8Dt$ ou $1,5Dt$; altura da cortina, L , com valores de $L=z_0+0,5Dt$, $L=z_0+1,0Dt$ e $L=z_0+1,5Dt$; espaçamento entre estacas, s , de $1,0Dp$, $1,5Dp$ e $2Dp$; e rugosidade da interface parede-solo $R_{int}=1,0$ ou $0,7$, em que R_{int} representa a razão entre os parâmetros de resistência e deformabilidade na interface e os respetivos parâmetros do solo.

Segundo os autores, a influência do peso e da espessura da cortina pode considerar-se, neste caso de estudo, como sendo negligenciável, tanto para os assentamentos quanto para as eficiências local e global. Analisando a Figura 2.11, é possível notar que, para cortinas contínuas, a influência do incremento da altura da cortina nos valores de η_g e η_l é benéfico, e que para um valor menor de R_{int} , ou seja, para paredes menos rugosas se obtém, no geral, uma melhor eficiência global.

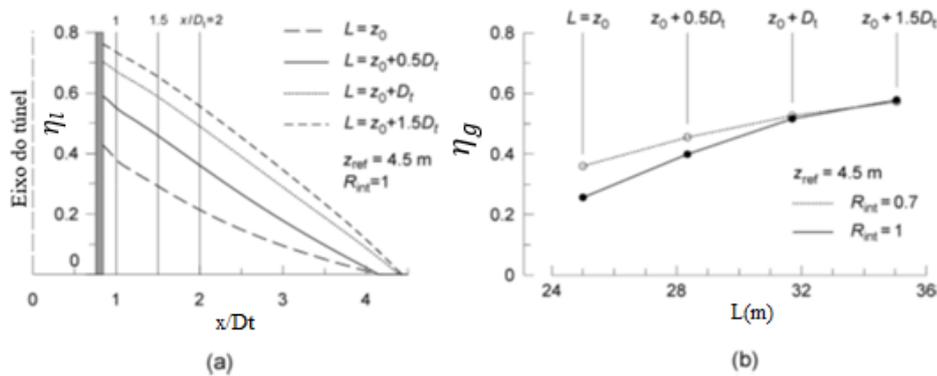


Figura 2.11 – Efeito da altura da cortina: a) na eficiência local; b) na eficiência global ($d=0,8Dt$) (Rampello et al., 2019).

Rampello et al. (2019), no que respeita às análises com estacas, concluiu que se obtêm maiores eficiências local e global quanto maior for a altura das estacas e quanto menor for o espaçamento entre as mesmas, sendo a máxima eficiência obtida para uma parede contínua. De igual modo se obtiveram piores resultados para uma cortina mais rugosa, $R_{int}=1$.

2.3.4.3. Massicano (2020)

Massicano (2020) realizou um estudo no qual apresentou uma análise numérica para investigar o efeito de uma parede contínua do lado de um túnel de forma a mitigar os movimentos do maciço induzidos pela construção deste. O estudo teve por base as condições geométricas, geológicas-geotécnicas e hidrológicas presentes nos perfis transversais P9 e P10A da Secção 63 da Linha Verde do Metro de Lisboa e foi focado na avaliação da eficiência da cortina tendo por base os resultados da instrumentação observados naqueles perfis. O perfil P9 apresentou o maior assentamento (66,9mm), o qual foi usado para calibração dos cálculos de referência. Neste perfil o túnel encontrava-se a uma profundidade de 15m e tinha um diâmetro, $D_t=9,71\text{m}$. A estratigrafia complexa do problema em estudo interessava 3 tipos de solo: solo aluvionar (AL), formações das Areolas da Estefânia (AE) e a formação das Argilas dos Prazeres (AP)

devidamente identificados na Figura 2.12. O modelo de referência adotado foi uma fusão entre os perfis P9 e P10A definindo-se para o túnel um recobrimento $C=11,4\text{m}$, uma distância entre o eixo do túnel e a cortina $d=12,1\text{m}$ ($d/Dt=1,25$) e uma altura da cortina que se estendia $7,28\text{m}$ abaixo do eixo do túnel. A Figura 2.12 ilustra o modelo de referência.

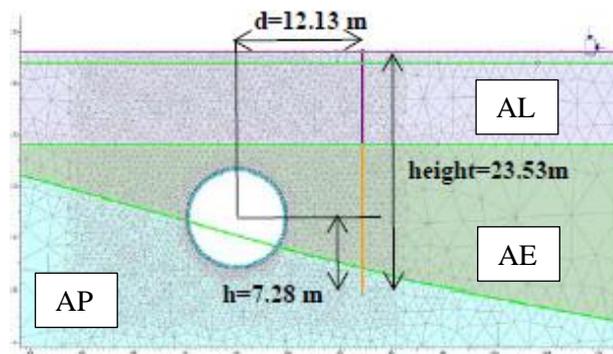


Figura 2.12 – Malha de elementos finitos do modelo de referência com a presença da cortina (Massicano, 2020).

Massicano (2020) realizou análises paramétricas fazendo variar os seguintes fatores:

- Altura (h) da cortina variando entre 5 valores que tinham como altura de referência a profundidade do eixo do túnel ($h=-0,5Dt$; $0,0Dt$; $0,5Dt$; $0,75Dt$; $1,0Dt$).
- Afastamento da cortina relativamente ao túnel (d/Dt) tendo sido estudados 6 valores ($d/Dt=0,75$; 1 ; $1,25$; $1,5$; 2 ; 3).
- Rigidez da cortina, assumindo 3 valores para a espessura ($t=0,4$; $0,6$; 1) de uma parede de betão e uma cortina flexível de estacas-prancha, modelo AU20.
- Fator de alívio (α) tomando valores de $0,41$ (perfil P10A) e $0,789$ (perfil P9).

O estudo paramétrico teve como objetivo observar como os fatores enunciados influenciariam a eficiência local (Eq. 2.6), a eficiência global (Eq. 2.7), tendo-se para a primeira calculado para ambos os valores à frente e atrás da cortina, e os esforços presentes no suporte do túnel e na própria cortina. Observando a Figura 2.14, que ilustra a influência na eficiência da altura da cortina e da distância da mesma ao eixo do túnel, verificou-se que quanto mais profunda for a cortina, maior é a sua capacidade de diminuir o volume de subsidência e os assentamentos, i.e., maiores são os valores de η_g e η_l , com exceção da eficiência local para o caso de $h/Dt=1$. Quanto maior o valor de h/Dt , maior o valor de η_g para os casos com $h/Dt \geq 0,5$, enquanto para $h/Dt \leq 0,0$ o valor basicamente se mantém próximo de zero para qualquer distância da cortina. Já para η_l atrás da cortina (Fig. 2.14b) se obtém valores crescentes com a proximidade ao túnel para os casos de $h/Dt=0$; $0,5$; $0,75$, enquanto para as restantes alturas se têm valores constantes ou mesmo decrescentes com a redução de d/Dt .

Em relação aos esforços no revestimento do túnel, quanto mais distante se encontra a cortina, mais os esforços se aproximam aos da condição de campo livre, como seria de esperar, como pode-se notar na Figura 2.13. Além disso, Massicano (2020) conclui que a variação do esforço axial é desprezável no túnel e independente do valor de d/Dt e h/Dt . No que respeita aos esforços na cortina, observou-se que quanto mais profunda for a cortina e quanto mais próxima estiver do túnel maiores são os esforços axiais e os momentos fletores.

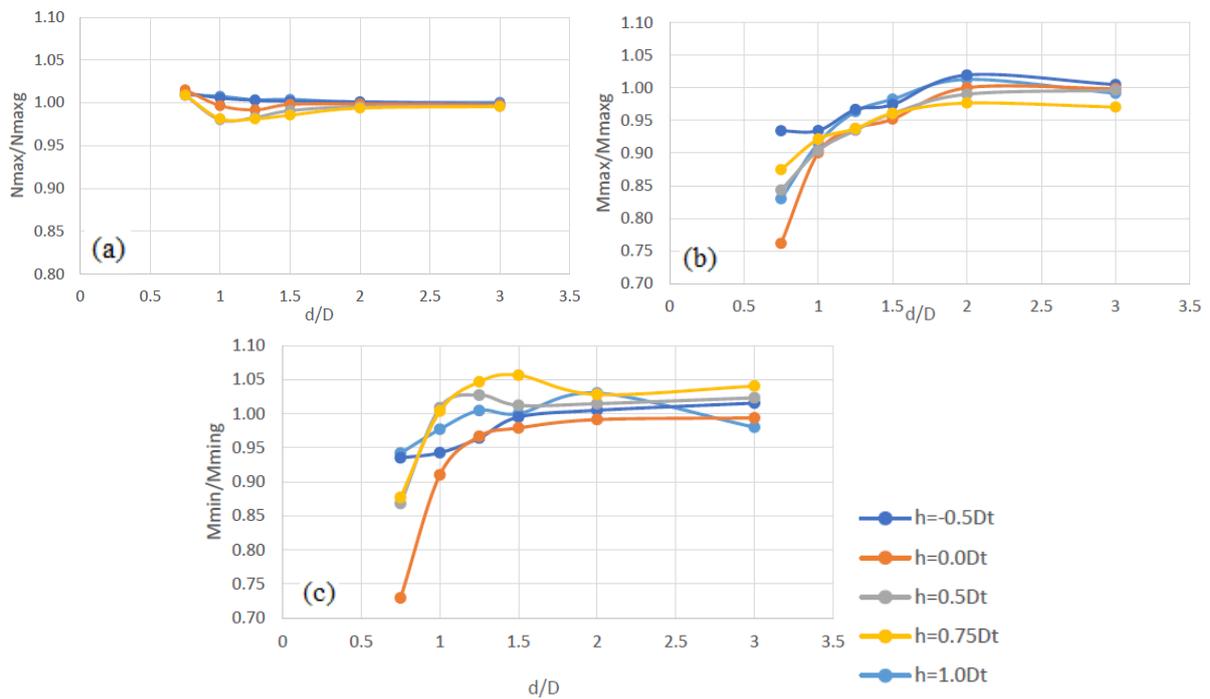


Figura 2.13 – Valores dos esforços no suporte do túnel em função da distância da cortina para diferentes alturas: a) Esforço axial máximo normalizado; b) Momento fletor máximo normalizado; c) Momento fletor mínimo normalizado (adaptado de Massicano, 2020).

O autor observou que a rigidez da cortina não afetava significativamente a eficiência global bem como a eficiência local. A rigidez da cortina também não tem grande influência nos esforços do túnel, porém, de forma geral, observou-se, relativamente aos momentos fletores máximos do túnel, estes são tanto mais baixos quanto maior a rigidez da cortina, observando-se o inverso para os momentos mínimos. Os esforços axiais na cortina, bem como os momentos fletores máximos, são tanto maiores quanto mais rígida for a cortina e mais próxima estiver do túnel. Já os valores dos momentos fletores mínimos são inversamente proporcionais à rigidez (Massicano, 2020).

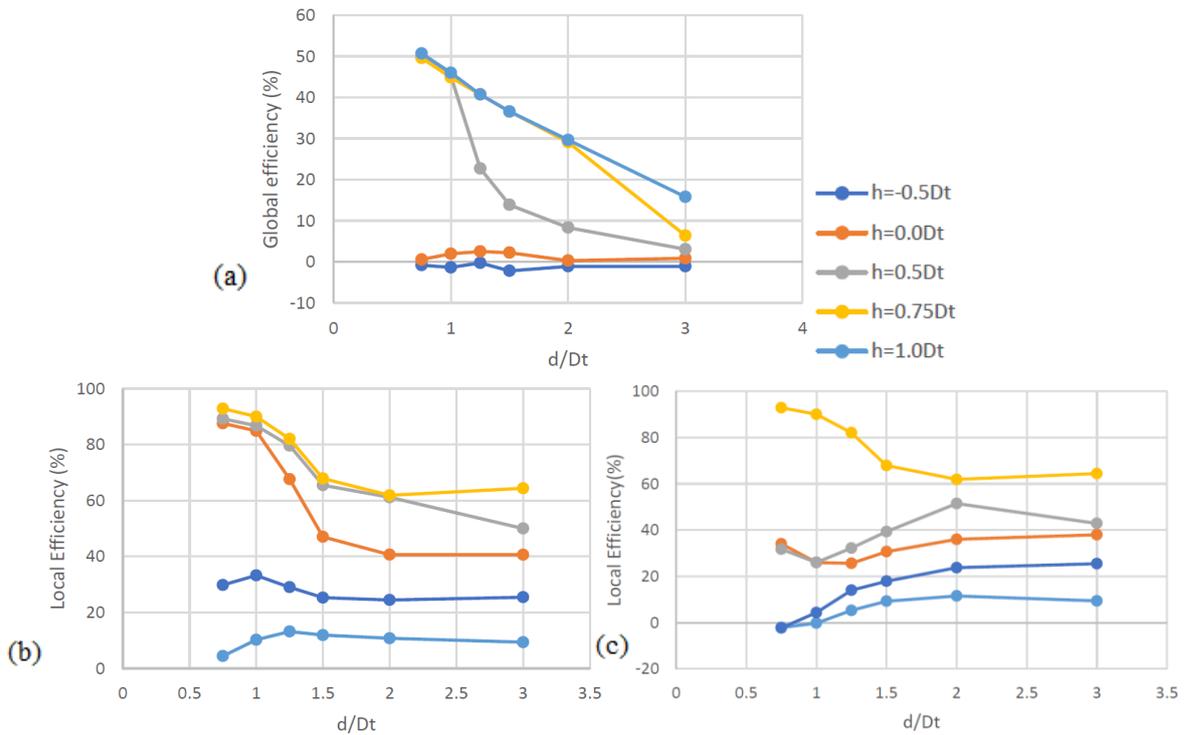


Figura 2.14 – Valores das eficiências em função da distância da cortina para diferentes alturas: a) eficiência global; b) eficiência local atrás da cortina; c) eficiência local à frente da cortina (adaptado de Massicano, 2020).

Por último, Massicano (2020) analisou o efeito do fator de alívio, α , assumido com os valores de 0,789 e de 0,41 na análise numérica das Secções P9 e P10A, respetivamente. Pelo resultado da Figura 2.15, o estudo da sua influência em η_g e η_l permite concluir que quanto maior o valor de α menor é a eficiência, e que esta tende naturalmente a diminuir com o afastamento da cortina. De forma geral, os resultados alcançados sugerem um impacto negligenciável do parâmetro α , na variação das forças mobilizadas no revestimento do túnel em relação ao campo livre (Massicano, 2020). Já os esforços na cortina são tendencialmente maiores, de forma absoluta, quanto maior for o valor do fator de alívio, e que o efeito deste parâmetro diminui à medida que a cortina se distancia do túnel.

É importante salientar que os resultados obtidos por Massicano (2020) são altamente influenciados pela estratigrafia complexa presente no caso de estudo, bem como pelas condições hidrogeológicas existentes.

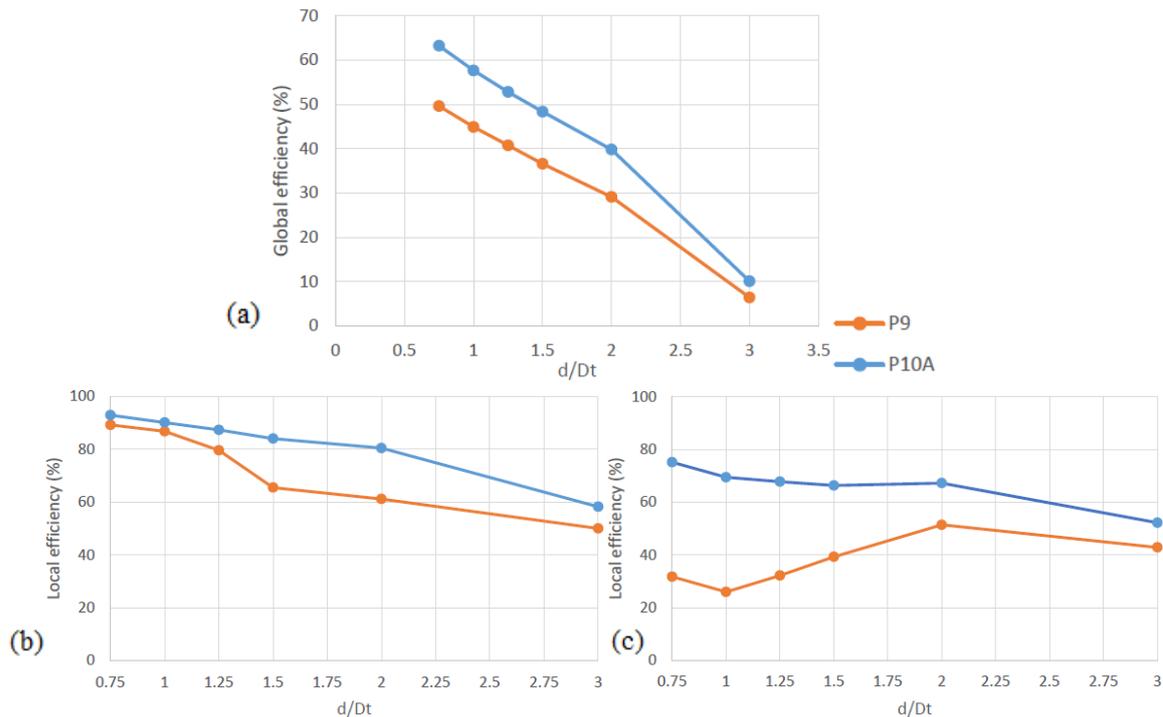


Figura 2.15 – Valores das eficiências em função da distância da cortina para diferentes valores de α : a) eficiência global; b) eficiência local atrás da cortina; c) eficiência local à frente da cortina (adaptado de Massicano, 2020).

2.3.5. Resumo

A partir dos artigos publicados e tendo como referência principal os estudos realizados por Bilotta (2008), Rampello et al. (2019) e Massicano (2020), é possível identificar os parâmetros que mais influenciam o comportamento e eficiência das cortinas. Tendo por base os resultados obtidos nesses estudos podem sumarizar-se os seguintes aspetos:

- Efeito da distância da cortina (d): no geral, a cortina apresenta uma maior eficiência quanto menor for a sua distância ao túnel.
- Efeito da altura da cortina (h): os estudos sugerem que uma altura prolongada abaixo da base do túnel melhora significativamente a eficiência local e global.
- Efeito da rigidez da cortina: todos os estudos concluem que a rigidez da cortina tem um efeito negligenciável nas eficiências global e local bem como nos esforços mobilizados nos elementos estruturais.

- Efeito da rugosidade da interface: nos estudos de Bilotta (2008) e Rampello et al. (2019) conclui-se que a eficiência diminui com a rugosidade embora tenha uma influência praticamente marginal.
- Efeito do peso e rigidez do edifício: Rampello et al. (2019) alega que este efeito altera o formato da bacia de subsidência, o que acaba por reduzir a eficiência local da parede.
- Efeito do peso da cortina: Bilotta (2008) e Rampello et al. (2019) concluem que o peso da cortina tem um efeito pouco relevante.
- Efeito do fator de alívio (α): Massicano (2020) sugere que maiores valores de α originam menores eficiências global e local e também provocam menores esforços na cortina, sendo que este parâmetro tem um efeito negligenciável nos esforços do túnel.

É de se salientar que nenhum dos referidos estudos apresenta uma análise a longo prazo da influência dos parâmetros indicados e que, em alguns casos, pode considerar-se que as análises não englobam todos os fatores presentes ou que são fortemente influenciadas pela estratigrafia local, pelo que é sempre necessária cuidada interpretação na aplicação das conclusões e recomendações existentes dos estudos de Bilotta (2008), Rampello et al. (2019) e Massicano (2020).

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

3.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados da influência ao longo do tempo de uma cortina utilizada para minimizar as deformações induzidas pela escavação de um túnel aberto num maciço argiloso. Para o efeito é realizada uma modelação numérica 2D pelo método dos elementos finitos com consolidação acoplada, a qual permite a determinação da evolução das pressões intersticiais ao longo do tempo, assim como do comportamento do maciço e dos elementos estruturais. De modo a analisar a influência da cortina, foram desenvolvidos dois modelos:

- Modelo de campo livre, no qual se considera apenas a construção do túnel.
- Modelo com cortina, em que esta é instalada previamente à escavação do túnel, a uma distância e profundidade pré-definidas. Este é designado por “modelo de referência” por os seus resultados servirem de referência para a análise paramétrica que se apresenta no Cap. 4.

Nestas análises é assumido um túnel com parâmetros geométricos semelhantes aos existentes na Secção 63 da linha Verde do Metro de Lisboa, que liga as estações do Cais do Sodré e Baixa-Chiado. O perfil do terreno foi simplificado considerando apenas uma única camada de solo aluvionar (AL) de modo a tornar o estudo mais simples, sem o impacto de uma estratigrafia complexa nos resultados. As características do solo estão detalhadas na Secção 3.2.3.

A análise numérica foi realizada recorrendo ao programa de elementos finitos, RS2 v2021 (Rocscience, 2021), na qual a eficiência da cortina foi avaliada tendo por base o seu impacto na alteração dos assentamentos e do volume da bacia de subsidência ao longo do tempo. Os esforços e deslocamentos mobilizados na cortina e no suporte do túnel, no decorrer do processo de consolidação do maciço, são igualmente apresentados e analisados.

3.2. Modelo de elementos finitos

3.2.1. Geometria e malha de elementos finitos

A geometria dos modelos com e sem cortina é praticamente idêntica, diferenciando-se apenas pela presença da cortina no modelo de referência. A geometria do modelo é definida por um comprimento de 150m e uma altura de 33m. O túnel, circular com um diâmetro $D_t=9,71m$,

encontra-se no centro do modelo, com um recobrimento $C=11,4\text{m}$ ($C/Dt=1,17$), o que corresponde a uma distância entre a superfície e o eixo do túnel de $16,26\text{m}$. Os modelos estão representados na Figura 3.1.

No modelo de referência a cortina encontra-se à direita do túnel, a uma distância de $d=12,14\text{m}$ ($d/Dt=1,25$) do seu eixo, tendo uma altura de $L=21,11\text{m}$ e com a base ao nível da soleira do túnel. Nos modelos utilizados, a altura da cortina é descrita adimensionalmente por h/Dt , em que h representa a diferença de cota entre a base da cortina e o eixo do túnel (podendo ser positivo ou negativo), sendo no modelo de referência $h/Dt=0,5$. A Figura 3.1b) ilustra os valores indicados.

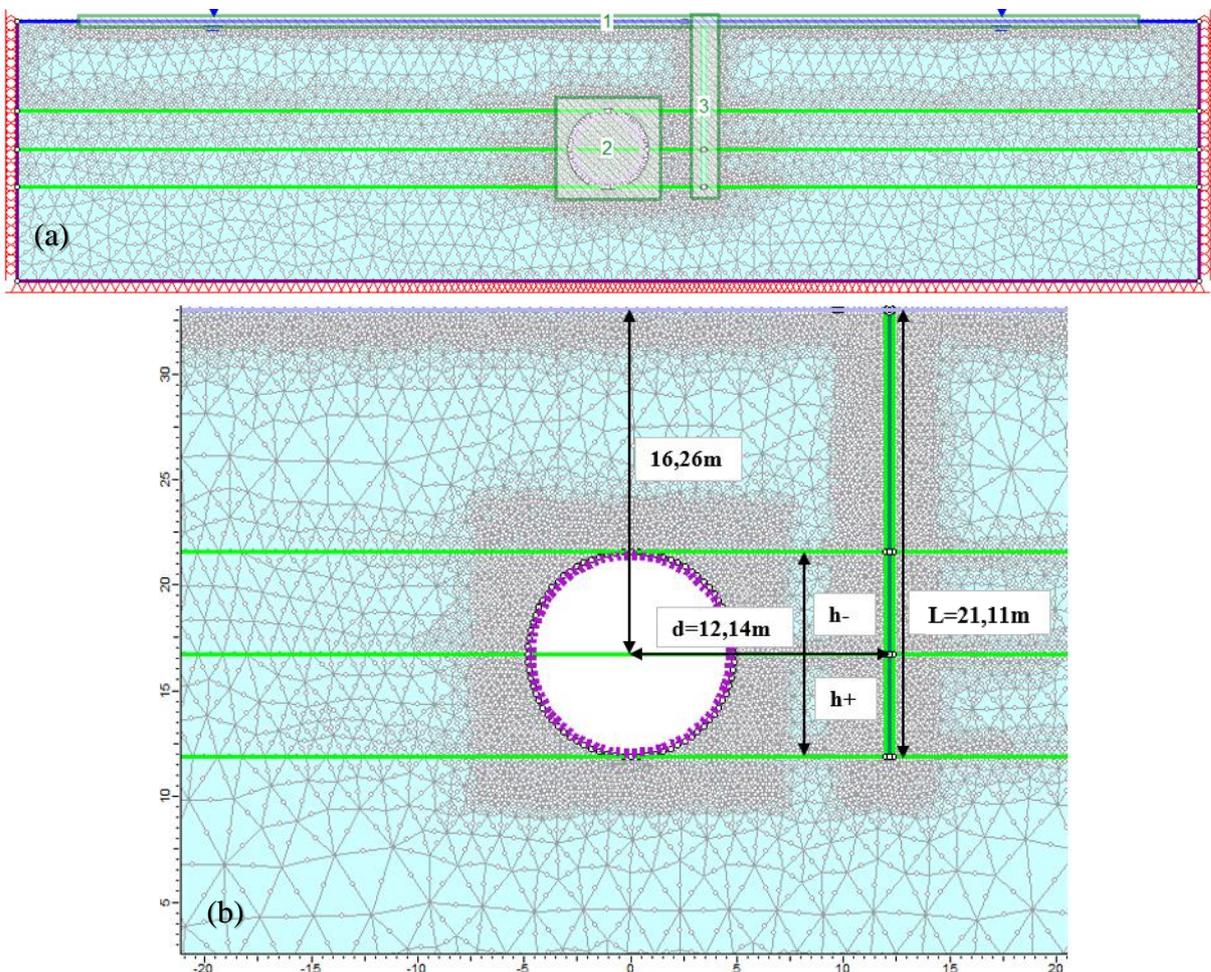


Figura 3.1 – a) Modelo de referência 2D com cortina e b) Pormenor com as distâncias e geometria da cortina.

Tanto o suporte do túnel quanto a cortina foram simulados utilizando elementos de viga. No que se trata da discretização do maciço, foi utilizada uma subdivisão em elementos finitos triangulares de 6 nós, com o número de elementos variável em função do modelo. Por forma a controlar-se a permeabilidade da cortina colocaram-se elementos de junta rígidos entre esta e o solo adjacente. De forma a se obter uma maior precisão nos resultados, à superfície e no contorno do túnel e da cortina, foi adotada uma discretização mais refinada nas zonas destacadas na Figura 3.1a). É de se notar que para os cálculos no modelo de campo livre não foi considerada a zona 3, visto que não existe cortina.

3.2.2. Condições de fronteira

As condições de fronteira consideradas em ambos os modelos assumem uma superfície livre no limite superior do modelo, enquanto que nas laterais foi imposto um deslocamento horizontal nulo e na base do modelo restringiram-se ambos os deslocamentos horizontais e verticais. As condições de fronteiras estão visíveis na Figura 3.1a).

O nível freático está localizado à superfície, tendo-se imposto uma cota piezométrica de 33m nas fronteiras laterais do modelo, constante em todas as fases de cálculo, de forma a simular um fluxo constante e permanente para o interior do modelo. A cortina foi considerada impermeável, enquanto que o suporte do túnel foi considerado permeável, funcionando como um dispositivo de drenagem, com exceção da análise em que se avalia o efeito do suporte ser impermeável (Secção 3.3). As condições hidráulicas no contorno do túnel encontram-se explicitadas na Secção 3.2.4, juntamente com a apresentação do faseamento construtivo para uma melhor percepção das hipóteses adotadas. Em termos genéricos a escolha das condições hidráulicas foi elaborada de modo a permitir simular adequadamente o comportamento do maciço a curto e longo prazo, bem como os assentamentos induzidos pela escavação do túnel e os esforços presentes na cortina e no suporte do túnel.

3.2.3. Características dos materiais e modelos constitutivos

De modo a simular o comportamento do solo, foi utilizado um modelo elástico perfeitamente plástico associado ao critério de rotura de Mohr-Coulomb, pela sua simplicidade e vasto reconhecimento na modelação de obras geotécnicas. Neste modelo constitutivo o comportamento do solo é considerado linear e isotrópico na fase elástica, sendo definido pelo módulo de Young, E 's, a variar em função da profundidade, e pelo coeficiente de Poisson, ν . Os parâmetros de resistência são a coesão, c ' e o ângulo de resistência ao corte, ϕ '. A dilatação plástica foi considerada nula, i.e., foi definido um ângulo de dilatação $\psi = 0$.

Os parâmetros adotados para representar o solo aluvionar de Lisboa (AL) são fundamentados nos estudos efetuados por Mateus de Brito & Matos Fernandes (2006). A Tabela 3.1 apresenta os valores adotados para o perfil de solo, Formação AL, e para o solo colocado no contorno da cortina, Parede AL, com características de resistência e deformabilidade reduzidas em 60% relativamente à Formação AL. Tal foi definido com o intuito de simular a usual redução da resistência ao corte e da deformabilidade na interface da ligação solo-cortina, que se admitiu estender por uma espessura de 40cm.

A espessura do suporte do túnel foi considerada igual a 0,36m, tal como indicado por Amaral (2006). Para a cortina foi adotada uma espessura de 0,6m. A Tabela 3.2 sumariza as propriedades mecânicas e geométricas do suporte do túnel e da cortina. É de se salientar que se considerou que os elementos estruturais têm um comportamento elástico linear, com propriedades elásticas equivalentes às de um betão.

Tabela 3.1 – Parâmetros do solo considerados no modelo numérico.

Camada de solo	γ (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	ψ (°)	E_s (kN/m ²)	ν	K_0	k (m/s)
Formação AL	18	5	33	0	$6960+612^*z$	0.3	0.5	2.00E-10
Parede AL		3	22		$4640+408,3^*z$			

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas e geométricas do suporte do túnel e da cortina.

Elemento	Características geométricas da cortina e do túnel		Parâmetros elástico da cortina e do túnel		
	Permeabilidade	t-cortina (m)	E (GPa)	γ (kN/m ³)	ν
Cortina	Impermeável	0.6	30.0	25.0	0.2
Túnel	Permeável	0.36			

3.2.4. Sequência da modelação numérica

A sequência construtiva implementada no modelo de campo livre e no modelo de referência pode ser resumida em 4 etapas, frisando que no modelo de campo livre é inexistente a etapa correspondente à instalação da cortina:

- **Estado de tensão inicial:** Estado de tensão no qual o maciço se encontra no seu estado atual, previamente a qualquer intervenção. Considerou-se um carregamento geostático determinado tendo por base o peso volúmico do solo e o coeficiente de impulso em repouso para a determinação das tensões horizontais.

- **Instalação da cortina:** Fase em que a cortina é ativada no modelo. Neste estudo não se considerou a influência da fase de instalação da cortina nos deslocamentos, uma vez que se estima que o seu impacto seja negligenciável em comparação com a perturbação induzida pela escavação do túnel (Rampello et al., 2019).
- **Escavação do túnel:** Etapa onde ocorre a escavação do túnel e conseqüentemente o alívio de tensão no contorno da escavação. O alívio das tensões foi definido através da utilização do fator de alívio das tensões, α , o qual tem um impacto condicionante nas deformações do maciço, sendo estas tanto maiores quanto maior o valor de α . Após uma calibração prévia com base nos registos dos assentamentos (Amaral, 2006), foi considerado um valor de $\alpha=0,35$. De forma a simular a drenagem parcial causada pela escavação do túnel, foi considerada uma redução da carga hidráulica proporcional ao alívio de tensões no perímetro do túnel. Por conseguinte admitiu-se o mesmo fator de alívio para ambas as condições, pressões de terras e hidráulicas, no contorno do túnel.
- **Instalação do suporte do túnel:** Na última fase do processo construtivo foi instalado o suporte do túnel e aliviadas as tensões remanescentes no contorno da escavação ($1 - \alpha$). Para reproduzir a situação de drenagem no contorno do túnel, foi considerada uma condição de fronteira dupla, em que ou entra água no túnel e a pressão no contorno é nula ($P=0$) ou então existe uma pressão de água atuante no suporte e o caudal que afluí ao interior do túnel é nulo ($Q=0$). Tal condição foi mantida durante todo o processo de consolidação do maciço.

Após as fases descritas, respeitantes ao faseamento construtivo, foi considerada uma sequência de instantes de tempo definidos criteriosamente, conforme representado na Tabela 3.3.

Para além da fase inicial, considerou-se igualmente um regime estacionário para a fase de cálculo da instalação da cortina, assumindo-se que a sua instalação é efetuada muito tempo antes da construção do túnel e, por isso, estão já dissipados os acréscimos de pressão intersticiais gerados pela sua construção. A partir desta fase foi considerado um cálculo transiente em que existe geração de excessos de pressão intersticial causados pela construção do túnel ocorrendo a sua posterior dissipação ao longo do tempo. Por forma a monitorizar a evolução das deformações do maciço e dos esforços e deslocamentos nos elementos estruturais foram analisados diversos intervalos de tempo, os quais foram definidos tendo por base a expectável evolução da dissipação dos excessos de pressão intersticial no maciço, mais rápida inicialmente e a diminuir com o tempo até se atingir a consolidação final. O período entre os 5 e os 25 anos foi examinado com mais detalhe uma vez que se constatou que a descida do nível

de água que ocorria neste período condicionava fortemente os resultados. Um período importante de análise é o que decorre até aos 100 anos, por se poder considerar como um marco para a vida útil de uma obra, tendo sido também calculados períodos posteriores a este para melhor se perceber a evolução do comportamento da obra ao longo do processo de consolidação. É de ressaltar que todos os deslocamentos foram calculados assumindo que a instalação da cortina não induzia deformações no maciço.

Tabela 3.3 – Síntese das fases adotadas na análise numérica.

Fase	Descrição	Instante de tempo (anos)	Cálculo
1	Estado de tensão inicial	0/365	Estacionário
2	Instalação da cortina	0/365	Estacionário
3	Escavação do túnel	1/365	Transiente
4	Instalação do suporte	2/365	Transiente
5	t=5 dias	5/365	Transiente
6	t=50 dias	50/365	Transiente
7	t=1 ano	1	Transiente
8	t=5 anos	5	Transiente
9	t=10 anos	10	Transiente
10	t=15 anos	15	Transiente
11	t=20 anos	20	Transiente
12	t=25 anos	25	Transiente
13	t=100 anos	100	Transiente
14	t=250 anos	250	Transiente
15	t=1000 anos	1000	Transiente
16	t=27397 anos	27397	Transiente
17	t=250685 anos	250685	Transiente
18	Final da consolidação	--	Estacionário

3.3. Influência da permeabilidade do túnel

Conforme referido anteriormente (Secção 2.2.3) a permeabilidade relativa entre o solo e o suporte tem uma influência significativa no processo de consolidação do maciço argiloso (Lopes et al., 2005). De forma a compreender a influência da permeabilidade do suporte no processo de consolidação foi realizado um estudo no qual se comparam os resultados obtidos para um suporte do túnel permeável e impermeável, tanto para o caso com cortina quanto para

a situação de campo livre (sem cortina). Na Figura 3.2 apresentam-se os assentamentos em ambos os casos imediatamente após a construção do túnel e para a fase final da consolidação.

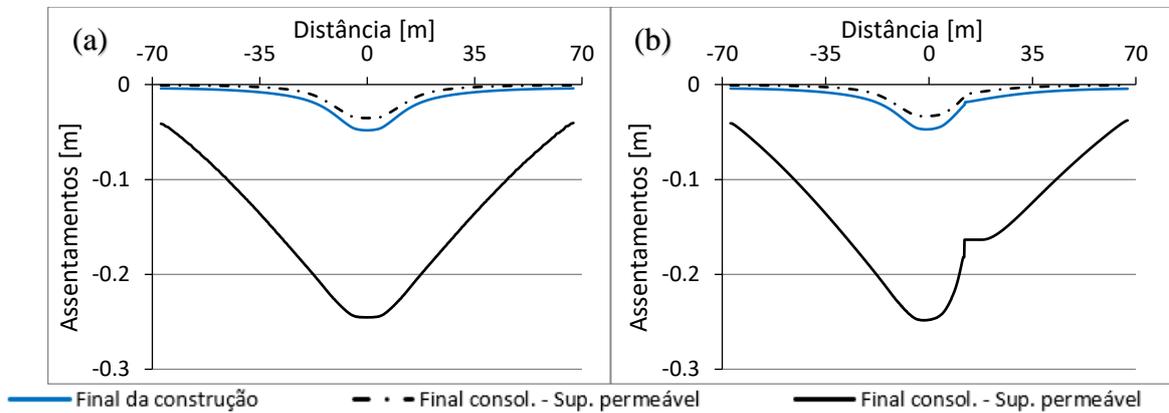


Figura 3.2 – Desenvolvimento dos assentamentos para a situação de um suporte de túnel impermeável vs permeável: a) sem cortina; b) com cortina.

É de se notar que os assentamentos para o caso com o túnel permeável são significativamente maiores a longo prazo, pois neste caso a água continua a fluir para o interior do túnel, provocando o rebaixamento do nível de água, enquanto para o túnel impermeável são repostas as pressões hidráulicas e nível de água originais no maciço, para uma situação de equilíbrio final. Portanto o caso mais desfavorável a considerar no estudo é o de um túnel com suporte permeável, como ressaltou Lopes et al. (2005). Como o caso de estudo tem como objetivo a avaliação da eficiência a longo prazo da cortina, é de maior interesse analisar o caso mais desfavorável na qual os assentamentos são significativamente maiores, i.e., a situação em que o suporte do túnel é permeável, pelo que nos próximos pontos apenas se apresentam resultados para este cenário.

3.4. Avaliação da influência da cortina para o cálculo de referência

3.4.1 Estado de tensão

Para melhor se compreender a evolução do estado de tensão, começa-se por apresentar na Figura 3.3 o desenvolvimento das pressões intersticiais ao longo do processo de consolidação do maciço. Na figura encontra-se igualmente representado o nível de água observado para os diversos instantes. Na coluna da esquerda apresenta-se o caso sem cortina enquanto que à direita podem visualizar-se os resultados para os mesmos instantes temporais obtidos no cálculo com cortina. Complementarmente a esta figura, é também apresentada na Figura 3.4 e na Tabela 3.4 a evolução do nível freático (NF) ao longo do tempo à frente e atrás da cortina, assim como no

modelo em campo livre no mesmo perfil vertical da cortina (distância $d/Dt=1,25$ ao eixo do túnel).

É de se notar que o NF em ambos os casos, com e sem cortina, tende com o avançar da consolidação a rebaixar apresentando, porém, evoluções distintas em cada caso, como seria de esperar. Pode-se notar que no final da construção do túnel a cortina não tem qualquer impacto no NF e nas pressões intersticiais, permanecendo o NF à frente e atrás da cortina praticamente inalterado até aos 5 anos, conforme se pode ver na Figura 3.4. Ao fim de 5 anos já se torna perceptível a diferença das pressões intersticiais à frente e atrás da cortina, ainda que a variação do NF não seja significativa. Como se pode observar na Figura 3.4, a partir dos 5 anos inicia-se uma descida evidente do NF à frente da cortina, com o túnel a deixar de estar completamente submerso, verificando-se algo similar no cálculo em campo livre (Fig. 3.3). Na parte de trás da cortina, essa descida inicia-se mais tardiamente, por volta de $t=10$ anos, embora com uma evolução mais lenta. As diferentes condições hidráulicas à frente e atrás da cortina, nomeadamente a presença do túnel que funciona como um dreno, resultam em assimetrias na dissipação dos excessos de pressões intersticiais e no fluxo de água, o que se manifesta nessa diferença entre a posição do NF em ambos os lados da cortina. No período dos 15 aos 25 anos é atingida a maior diferença de cotas do NF, conforme se pode constatar na Figura 3.4 e na Tabela 3.4. Pela Figura 3.3 pode-se notar que à frente da cortina o NF já atingiu a zona do hasteal do túnel, enquanto para a situação de campo livre ainda converge para a zona do coroamento. Aos 100 anos o NF chega ao nível dos hasteais do túnel, em ambos os modelos com e sem cortina, ainda que no caso com cortina, no hasteal direito, a cota do NF quase não se tenha alterado quando comparada com os 25 anos. No entanto, atrás da cortina verifica-se ter continuado a existir uma descida do NF, que se traduz numa redução da diferença entre NF à frente e atrás da cortina, passando a ser de 7,8m, assim como numa tendência de aproximação dos valores das pressões intersticiais. Ao fim de 250 anos (Fig. 3.4) a diferença de NF nos dois lados da cortina é mais reduzida e praticamente mantém-se até ao final da consolidação. Para este momento é possível observar a nova configuração do equilíbrio hidráulico presente no maciço, com diferentes posições do NF em função da existência ou não de cortina, verificando-se que a posição do NF é muito semelhante junto ao túnel em ambos os casos.

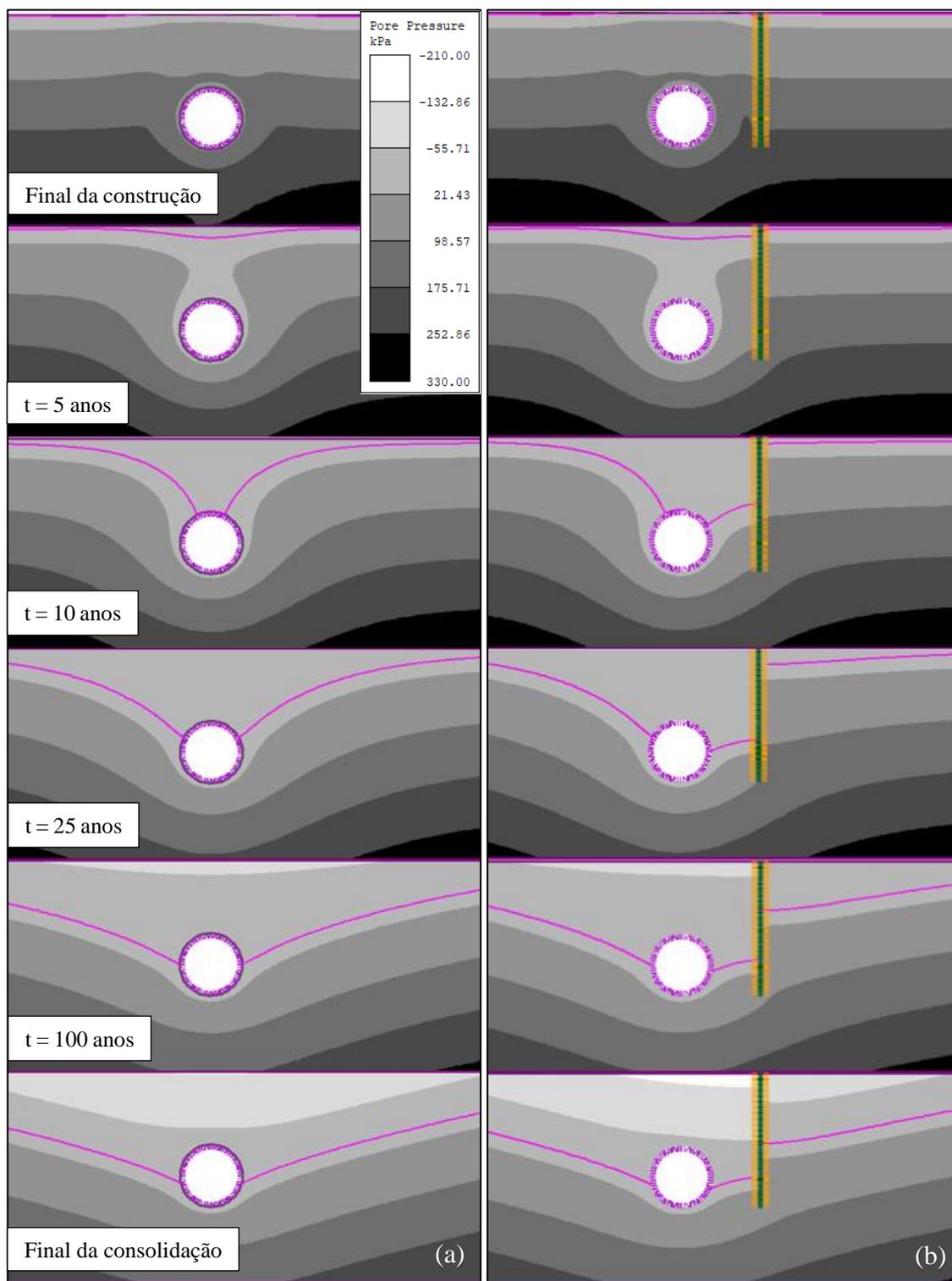


Figura 3.3 – Variação da pressão intersticial e do N.F. ao longo do processo de consolidação: a) sem cortina; b) com cortina.

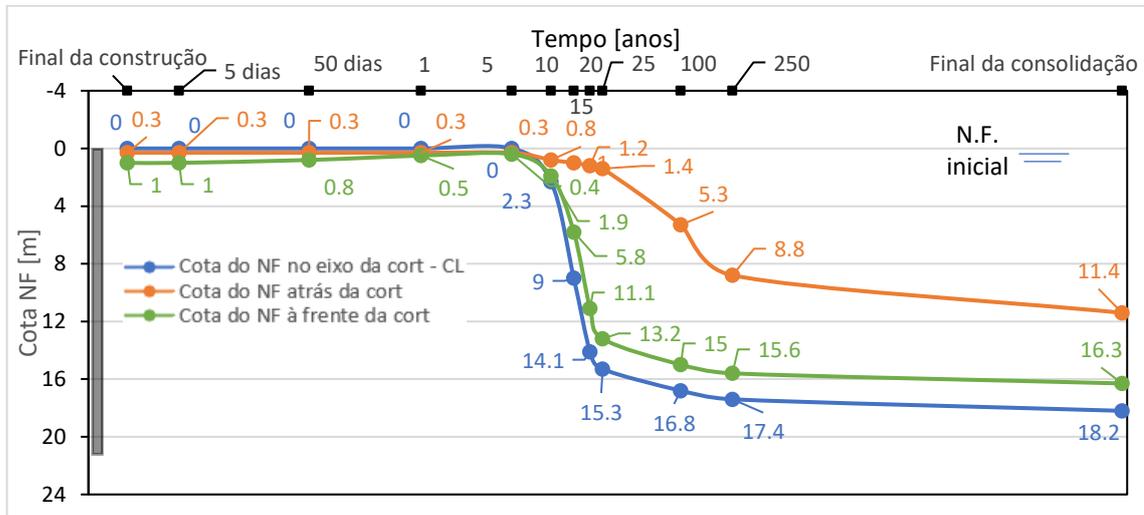


Figura 3.4 – Análise temporal da variação do NF à frente, atrás da cortina e sem a mesma a uma distância de $d/Dt=1,25$ do eixo do túnel.

Tabela 3.4 – Diferença entre os NF à frente e atrás da cortina para cada intervalo de tempo considerado.

Tempo	Fim da construção	Dias					Anos					Fim da consolidação
		5	50	1	5	10	15	20	25	100	250	
Diferença do NF[m]	0.6	0.6	0.5	0.2	1	9.4	12.3	12.2	11.8	7.8	5.8	5.3

A diferença do NF entre os lados da cortina, com a conseqüente diferença de pressões intersticiais, condiciona o comportamento da cortina. Para ilustrar melhor essa diferença apresenta-se na Figura 3.5 o diagrama com a diferença entre as pressões intersticiais atrás e à frente da cortina, ao longo da sua altura, para alguns instantes de tempos considerados relevantes. É possível notar que ao fim de 1 ano já se nota uma diferença no comportamento quando comparados os 2 períodos iniciais, tornando-se evidente o efeito da sucção imposta pelo suporte do túnel à frente da cortina. Pode-se notar que este efeito se agrava ao longo do processo de consolidação, onde aos 25 anos se atinge um pico máximo de aproximadamente 96kPa/m de diferença entre pressões à profundidade de 13,3m, o que deverá estar relacionado com a maior diferença do NF em ambos os lados da cortina (Figura 3.4 e Tabela 3.4) ocorrida nesta fase. Com o passar do tempo, para 100 anos e depois para 250 anos, com a descida do NF atrás da cortina, o valor de pico atingido a essa profundidade tende a reduzir, aumentando a diferença de pressões para zonas da cortina mais superficiais da cortina, acima de 6,7m. No final da consolidação o perfil da diferença de pressões é bastante distinto do observado para $t=25$ anos,

com o valor máximo a ocorrer junto da superfície (55kPa/m), decrescendo ligeiramente até uma profundidade de 15m, a partir da qual se reduz mais rapidamente até se atingir a base da cortina. Esta evolução representada na Figura 3.5 está relacionado com a avaliação das eficiências que serão apresentadas na Secção 3.4.3 e nos esforços atuantes na cortina na Secção 3.4.4.

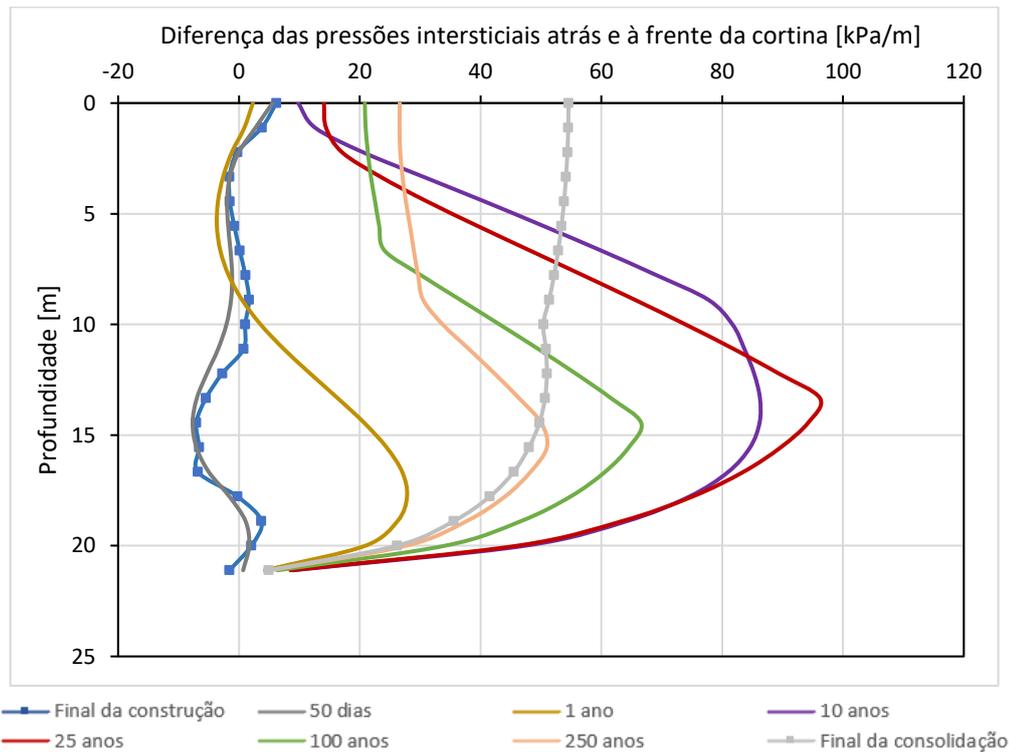


Figura 3.5 – Análise temporal da diferença de pressões intersticiais atrás e à frente da cortina.

A Figura 3.6 ilustra a variação da tensão média efetiva, p' , ao longo do processo de consolidação para o caso sem e com cortina. Como esperado, após a construção do túnel, o valor de p' cresce ao longo do tempo devido quer ao processo de consolidação do maciço quer à descida do nível freático, podendo este efeito ser mais facilmente notado pela diferença entre o caso com e sem cortina, onde os valores de p' são menores atrás da cortina. Naturalmente o valor de p' aumenta em função da diminuição da pressão intersticial, e como tal na zona à frente da cortina cresce mais rapidamente.

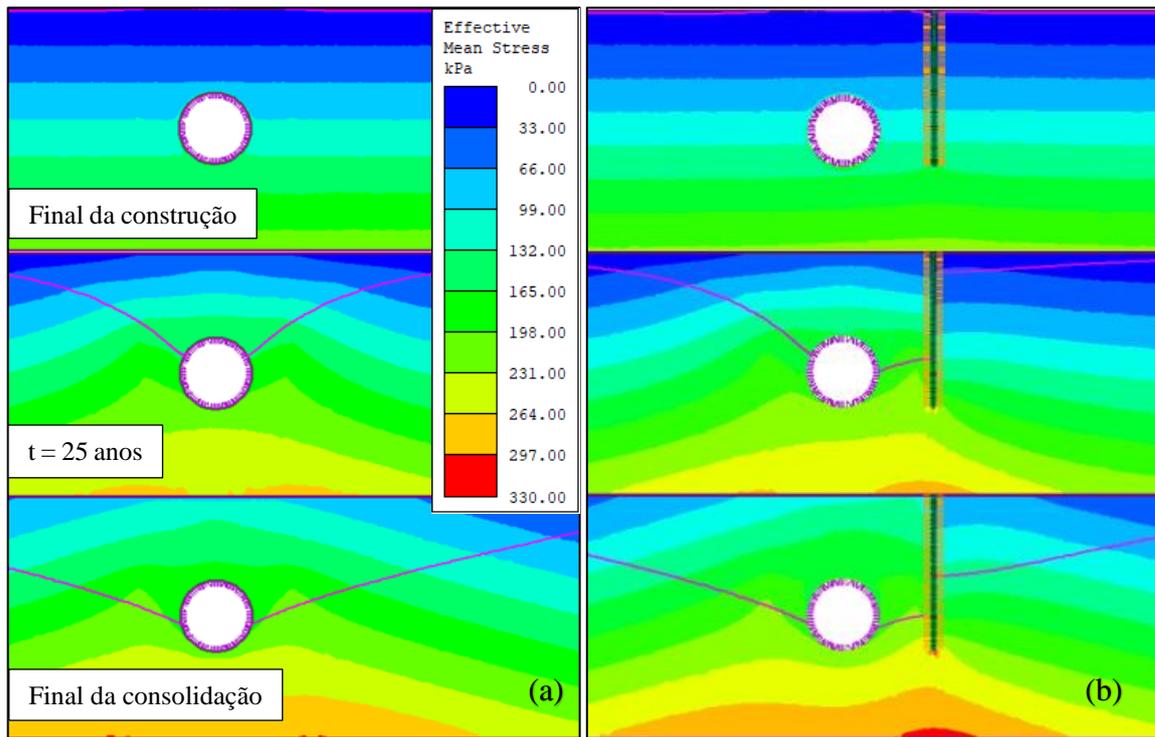


Figura 3.6 – Variação de p' ao longo do processo de consolidação: a) Campo livre; b) Modelo de referência.

A Figura 3.7 representa a variação do Strength Factor (SF) ao longo do processo de consolidação para o caso de campo livre e do modelo de referência, bem como os pontos plastificados no maciço. O SF traduz a razão entre resistência disponível e a tensão de corte induzida, em cada ponto do maciço. Portanto, o SF para materiais com comportamento plástico sempre assume valores maiores ou iguais a 1. Valores de SF menores que 1 indicam que a resistência máxima do maciço não suporta as tensões induzidas pela escavação do túnel, ou seja, que existiu plastificação nesse ponto. No final da construção é possível observar que, no contorno do túnel e da cortina, SF assume valores próximos a 1 em ambos os casos, tendo tendência a aumentar com a evolução da consolidação devido ao aumento da tensão efetiva. É de se salientar que na presença da cortina o número de pontos plastificados no maciço aumenta ligeiramente ao redor do túnel.

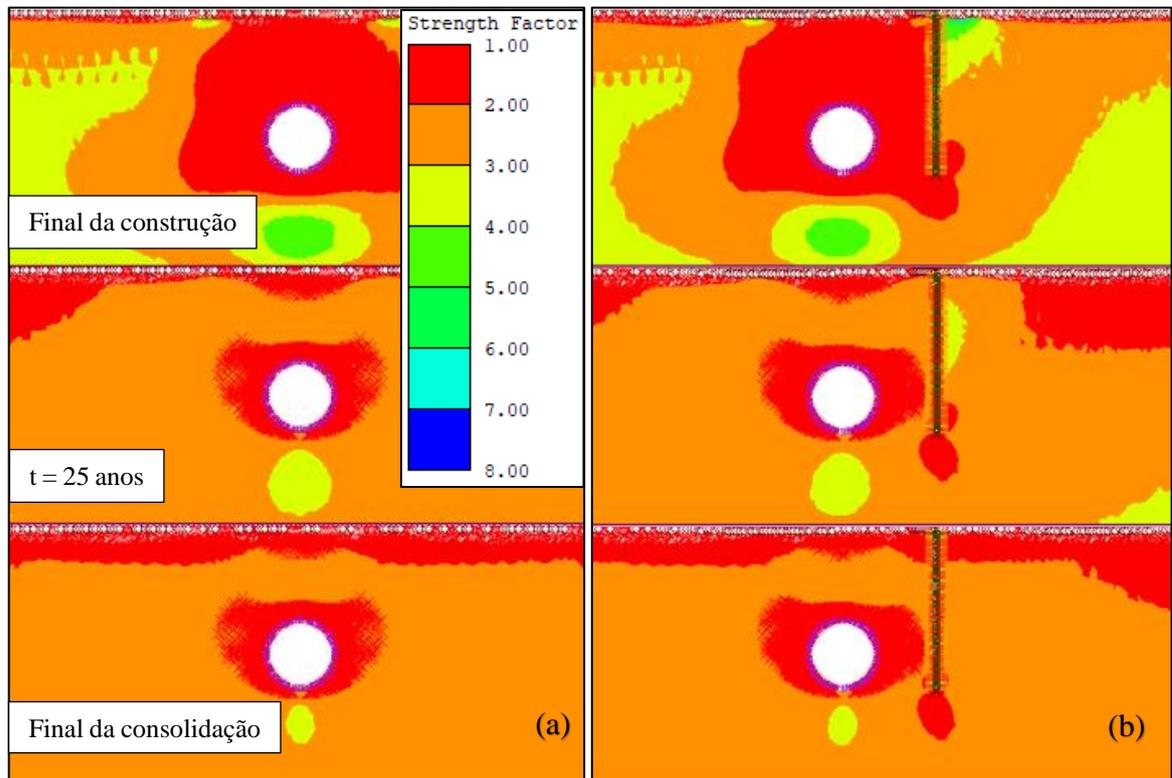


Figura 3.7 – Variação do Strength Factor ao longo do processo de consolidação e dos pontos plastificados do maciço: a) Campo livre; b) Modelo de referência.

3.4.2. Deformações no maciço

O processo de deformação de um maciço argiloso saturado ocorre ao longo do tempo, à medida que os excessos das pressões intersticiais geradas pela construção de um túnel dissipam. Para o caso de estudo, o excesso de pressões intersticiais gerado é positivo, pelo que se verifica um aumento nos assentamentos, devido à descida do NF e às sucções geradas acima do NF devido à descida deste. Os assentamentos no eixo do túnel, e o seu desenvolvimento ao longo do processo de consolidação para o caso de referência e de campo livre, encontram-se presentes na Figura 3.8.

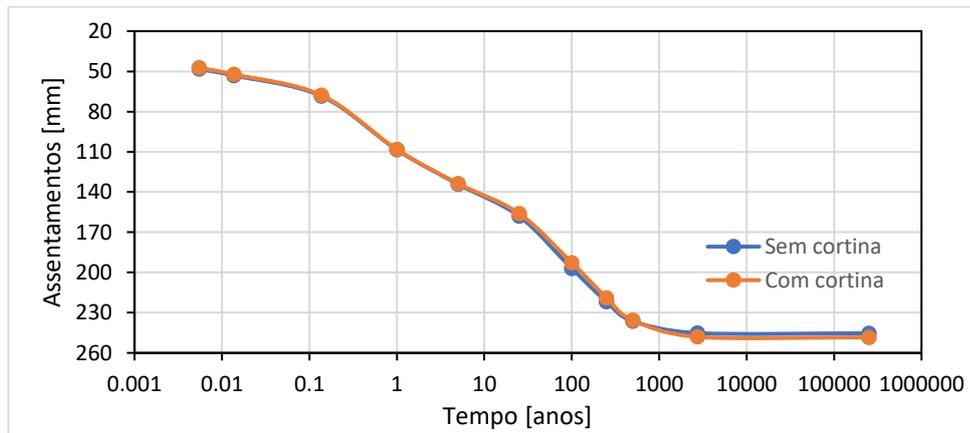


Figura 3.8 – Evolução temporal dos assentamentos no eixo do túnel.

Como se pode notar, o desenvolvimento dos assentamentos, para ambos os casos, é quase igual no decorrer do tempo, o que indica que a cortina para o modelo de referência ($h=0,5Dt$ e $d=1,25Dt$) não aparenta ter um grande impacto na mitigação dos assentamentos no eixo do túnel. Observa-se que no final do processo de consolidação o assentamento do modelo de referência é apenas um pouco maior quando comparado com o observado em campo livre, sendo estes 248mm e 245mm, respectivamente.

A evolução da bacia de subsidência durante o processo de consolidação, para diferentes intervalos temporais, encontra-se ilustrada na Figura 3.9 para os cálculos com e sem cortina.

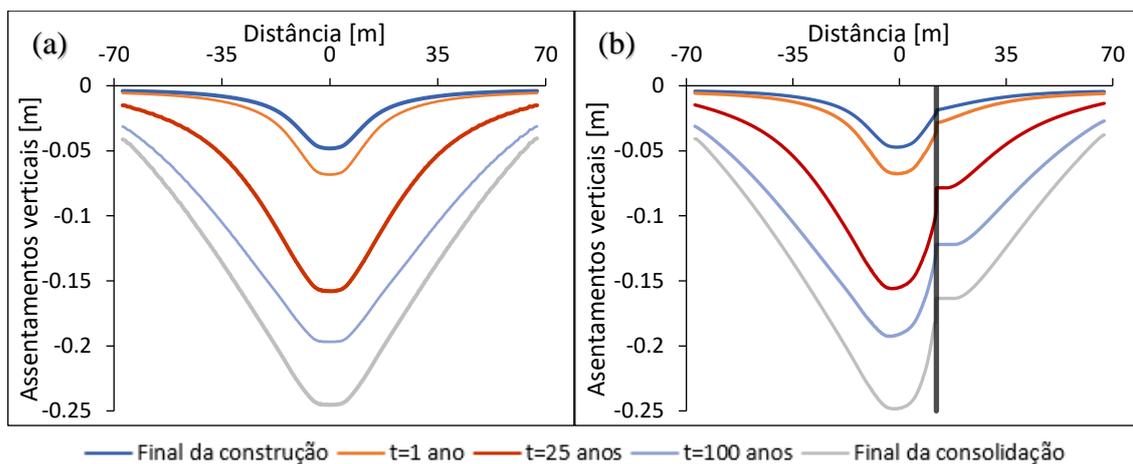


Figura 3.9 – Evolução temporal do formato da bacia de subsidência: a) sem cortina; b) com cortina.

Assim como explicitado pela Figura 3.8, a diferença entre os assentamentos no eixo do túnel é irrelevante entre os dois modelos. Contudo, o efeito da presença da cortina pode ser observado

na Figura 3.9b), com a existência de uma descontinuidade no perfil da bacia de subsidência na localização da cortina (linha vertical preta). Nessa zona os assentamentos são marcadamente distintos à frente e atrás da cortina, sendo naturalmente menores atrás da cortina, pois esta restringe os movimentos naturais do solo.

Para facilitar esta interpretação, na Figura 3.10 apresenta-se a diferença, através da área sombreada entre as curvas, entre a bacia de subsidência do caso onde a cortina está presente e do cenário de campo livre, para um tempo de 25 anos após a construção e para o final do processo de consolidação.

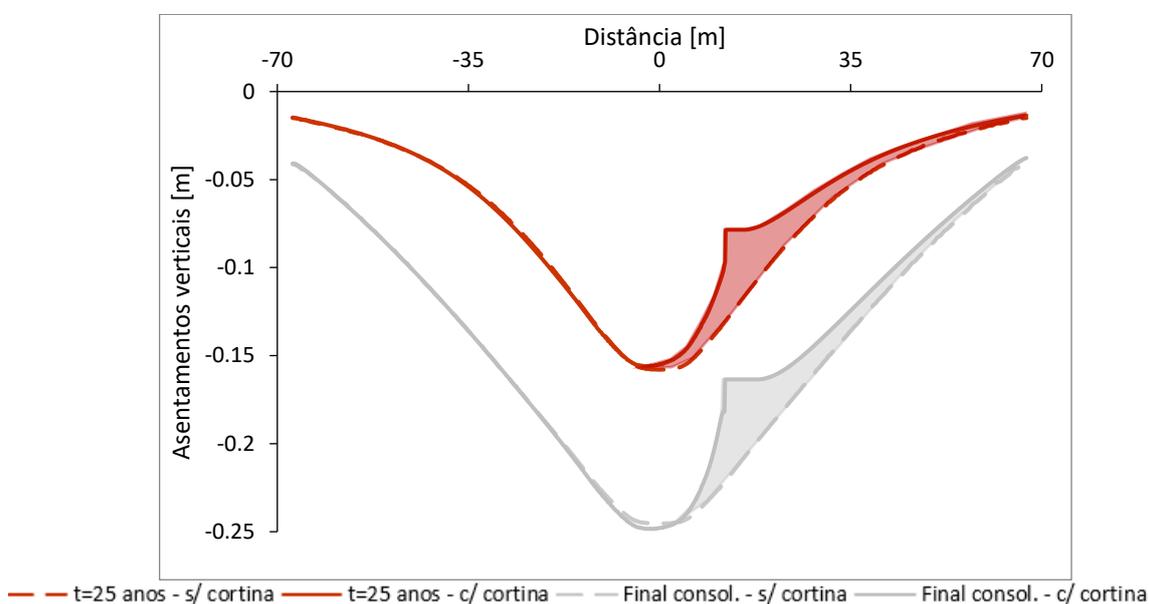


Figura 3.10 – Diferença do volume das bacias de subsidência com cortina vs sem cortina.

A diferença entre as curvas com e sem cortina é bastante evidente, tanto para o período de 25 anos, quanto para o final da consolidação. Nota-se que com a cortina, além da mitigação local dos assentamentos, existe um impacto direto no volume da bacia de subsidência em ambos os casos. A diferença entre o volume das bacias de subsidência do modelo de referência e de campo livre, é de menos 1,0% aos 25 anos e de menos 1,2% no final da consolidação.

É de se enfatizar que a variação do volume da bacia de subsidência no decorrer do tempo está ligada à evolução dos assentamentos do maciço, que por sua vez se relacionam com a dissipação do excesso de pressões intersticiais e a descida do nível freático.

3.4.3. Eficiência da cortina

A influência da cortina na bacia de subsidência do modelo de referência foi analisada a partir dos parâmetros citados no Capítulo 2, nomeadamente a eficiência local, η_l , (Eq. 2.6) (Bilotta, 2008) e a eficiência global, η_g , (Eq. 2.7) (Rampello et al., 2019).

Consoante citado previamente, o estudo da eficiência global foi feito globalmente e separando as bacias de cada lado da cortina, de forma a se ter melhor compreensão da influência da cortina. A Figura 3.11 apresenta a evolução temporal do volume da bacia, normalizado pela área da secção de escavação do túnel, atrás da cortina, à frente e na sua globalidade.

Ao analisar a Figura 3.11, é nítido que a influência da cortina na redução do volume da bacia de subsidência se deve quase exclusivamente à redução de assentamentos atrás da cortina. Esta redução torna-se particularmente visível a partir dos 5 anos, período no qual se inicia a descida do NF (Figura 3.4), e cresce até aproximadamente até aos 100 anos, período em que a diferença entre a cota do NF à frente e atrás da cortina começam a estabilizar, mantendo-se a diferença de volume aproximadamente constante a partir desse ponto. Posto que o valor da eficiência global da cortina é diretamente relacionado ao volume da bacia de subsidência, pode-se afirmar que é do interesse do presente estudo investigar a diferença entre a eficiência global à frente e atrás da cortina. Pode-se assim concluir que o valor dos volumes de subsidência é influenciado pela descida no NF e pela dissipação do excesso de pressões intersticiais, visto que estes são responsáveis pelo processo de consolidação do maciço argiloso, alterando o volume do mesmo, de forma diferente atrás e à frente da cortina.

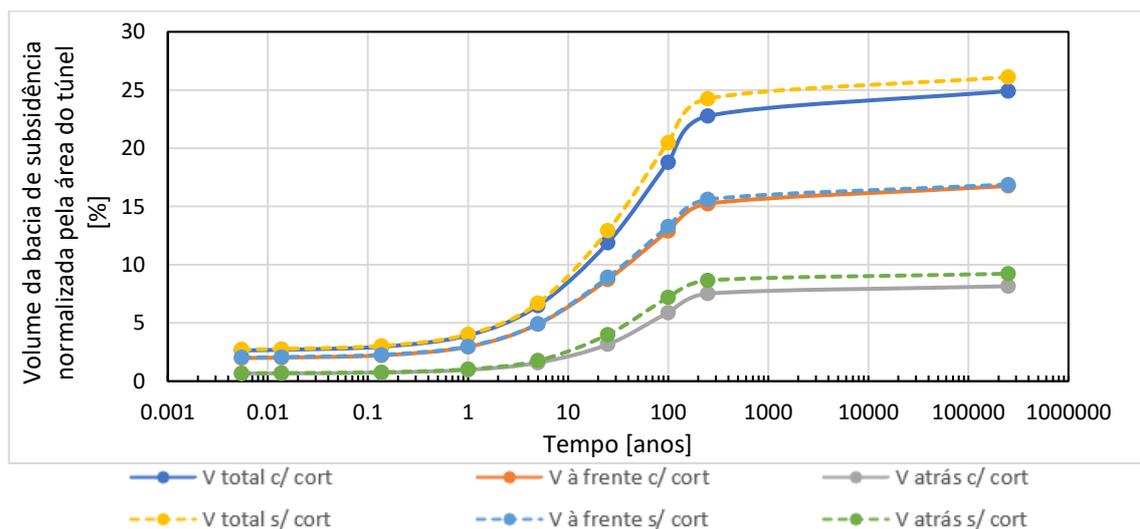


Figura 3.11 – Análise temporal do desenvolvimento do volume total, atrás e à frente da bacia de subsidência normalizada pela área do túnel.

A Figura 3.12 mostra a evolução das eficiências globais, η_g , $\eta_{g,be}$ e $\eta_{g,fr}$ ao longo do processo de consolidação do maciço. Como era de se esperar, após a prévia análise da Figura 3.11, o valor da eficiência global ao longo do processo de consolidação é baixo, nunca ultrapassando os 10%, devido ao elevado volume da bacia de subsidência determinado no cálculo. Quando separado o volume atrás e à frente da cortina, este fato torna-se perceptível nas diferenças entre $\eta_{g,be}$ e $\eta_{g,fr}$, os quais chegam a valores de aproximadamente 22% e 4%, com a parcela de maciço associada a $\eta_{g,fr}$ relacionada com o maior volume. Pode-se observar que no decorrer do tempo todas as curvas tendem inicialmente a diminuir, atingindo valores mínimos de $\eta_g=2,1\%$ e $\eta_{g,be}=3,6\%$ (ao fim de 1 ano) e $\eta_{g,fr}=1,1\%$ (ao fim de 10 anos). Após o valor mínimo, os valores de η_g e $\eta_{g,be}$ crescem significativamente até atingir os respectivos picos de 9,5% aos 25 e 22,4% aos 25 anos, respetivamente. Após verifica-se que a eficiência diminui, primeiro rapidamente e depois linearmente, até que no final da consolidação têm valores de 4,6% e 11,6% para η_g e $\eta_{g,be}$, respetivamente. Também $\eta_{g,fr}$ tem o seu pico aos 25 anos de 3,6% e no final da consolidação apresenta um valor de 0,8%. É de se salientar que a parcela com maior contribuição para o crescimento da eficiência global é $\eta_{g,be}$. O pico da eficiência global por volta dos 25 anos pode estar relacionado com diferença de pressões intersticiais nos lados da cortina, que ocorre com valores máximos neste período (Figura 3.5) e também devido à diferença do NF à frente e atrás da cortina (Figura 3.4). Também a redução nos valores das eficiências ao fim de 100 anos estará relacionada com a dissipação do excesso de pressões intersticiais na parte de trás da cortina.

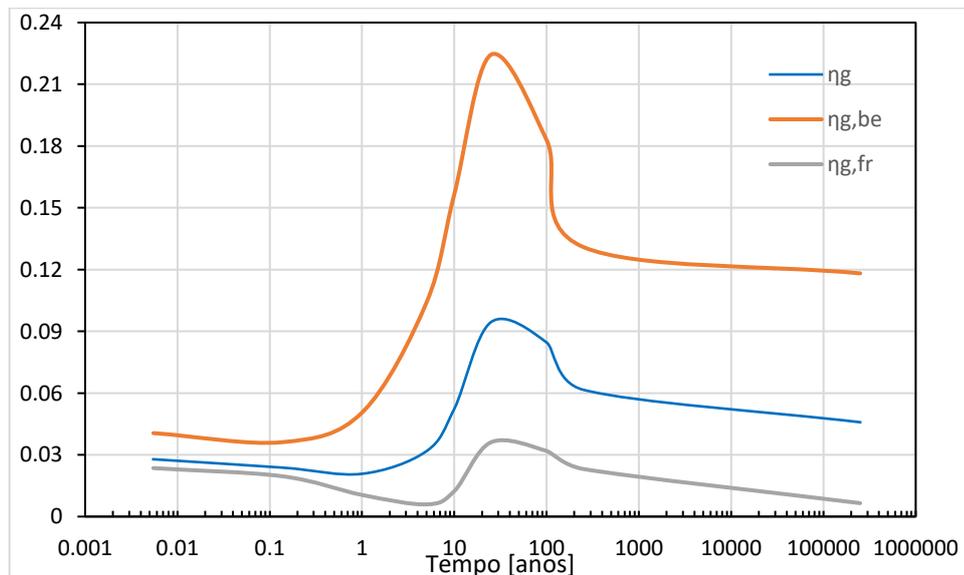


Figura 3.12 – Evolução temporal das eficiências global, global atrás e à frente da cortina.

A evolução da eficiência local, η_l , é representada na Figura 3.13. Face ao efeito significativo na redução dos assentamentos atrás da cortina, conforme se observa na Figura 3.9, os valores de η_l são de muito maior magnitude do que os obtidos para η_g . É possível notar que a partir do final da construção, onde se atinge um valor de 34,1%, a curva da eficiência local diminui ligeiramente, assim como para η_g , até cerca de 32% ao fim de 0,6 anos. A partir desse instante, η_l cresce consideravelmente até alcançar o pico máximo de 41,2% ao fim de 25 anos. A partir desse ponto a eficiência decresce acentuadamente sendo de apenas 25,9% aos 100 anos, estabilizando até se atingir o final da consolidação onde η_l tem o valor de 26,2%. Assim como para η_g , o efeito da diferença das pressões e do NF atrás e à frente da cortina tem impacto no valor do pico de η_l aos 25 anos, bem como no decréscimo do seu valor após o pico.

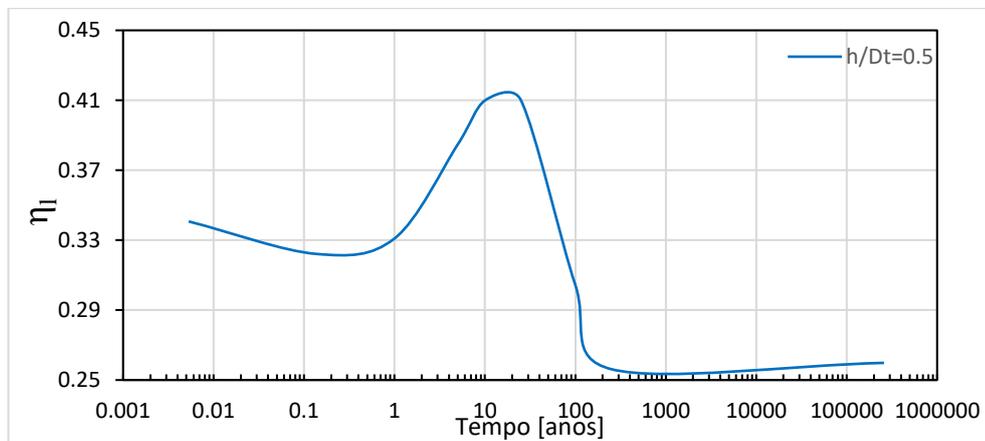


Figura 3.13 – Evolução temporal da eficiência local, η_l , da cortina.

Ao observar as Figuras 3.3a), 3.4 e 3.5 em conjunto com a Tabela 3.4, é possível relacionar o pico das curvas das eficiências globais e local com a descida assimétrica do nível de água que ocorre após os 5 anos e com a diferença das pressões intersticiais nos dois lados da cortina. O atraso na descida do NF, associado também às menores sucções, conduz a menores assentamentos atrás da cortina e conseqüentemente a um aumento da eficiência neste período. O pico da eficiência é, assim, coincidente com o instante em que se atinge uma das maiores diferenças de NF à frente e atrás da cortina e ocorre a maior diferença de pressões intersticiais ao nível do eixo do túnel. Após esse período a diferença dos níveis de água começa a diminuir devido ao rebaixamento do nível de água atrás da cortina, verificando-se também uma redução da diferença das pressões em ambos os lados da cortina abaixo do coroamento do túnel e o oposto acima, causando estes efeitos uma progressiva redução da eficiência. Para a diminuição do valor das eficiências também deverá contribuir a ineficácia da cortina em mitigar os deslocamentos horizontais do maciço a partir dos 25 anos, como se irá apresentar na Secção 3.4.4.2.

3.4.4. Comportamento dos elementos estruturais

3.4.4.1. Túnel

Os deslocamentos totais mobilizados no contorno do túnel para 3 períodos temporais encontram-se representados na Figura 3.14 para o cálculo de referência. No final da construção é possível notar que os deslocamentos totais são aproximadamente simétricos em relação ao eixo vertical do túnel, sendo ligeiramente maiores no coroamento e nos hasteais, quando comparados com os determinados na soleira. Todos os vetores apontam para o interior do túnel indicando que o mesmo se encontra totalmente à compressão. Ao fim de 25 anos já se nota um achatamento no túnel, com maiores deslocamentos no coroamento. O mesmo comportamento se mantém no final da consolidação, onde a forma achatada do túnel é ainda mais visível devido aos maiores deslocamentos no coroamento.

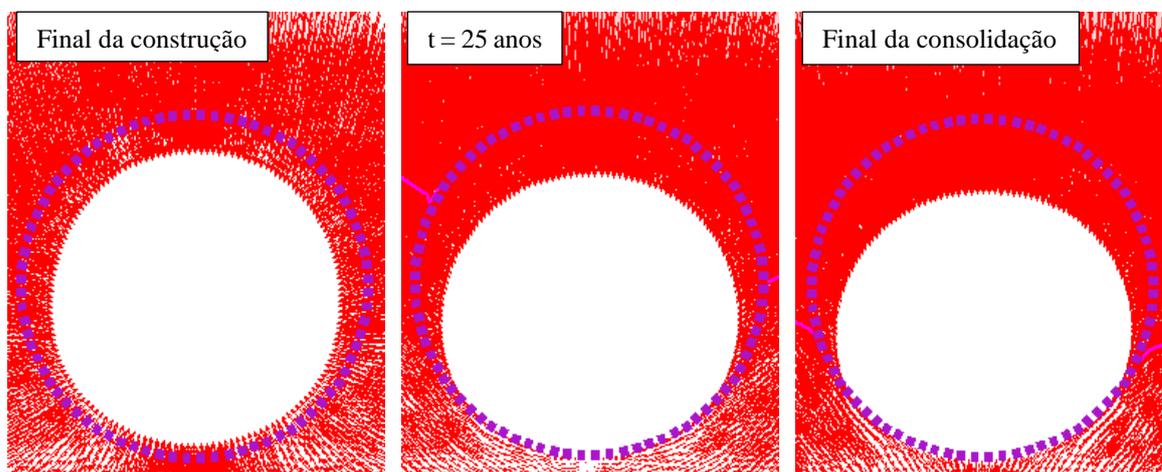


Figura 3.14 – Deslocamentos totais no túnel ao longo do processo de consolidação para o modelo de referência.

Na Figura 3.15a) estão representados os esforços axiais mobilizados ao longo do suporte do túnel durante o processo de consolidação do maciço para o modelo de campo livre enquanto que na Figura 3.15b) se apresenta a diferença entre a situação com cortina, N_{cort} , e sem cortina, N_{cl} . Observando a Figura 3.15a) nota-se que o efeito da consolidação no suporte do túnel tende a aumentar o valor de N nos hasteais e reduzir no coroamento e na soleira, embora esta redução seja aqui menor magnitude. Isto está relacionado com o achatamento do suporte ao longo da consolidação do maciço, tal como observado na Figura 3.14. O valor máximo de N obtido para o caso de campo livre, no fim da consolidação, encontra-se nos hasteais e é de 1046kN/m. Por sua vez o mínimo no final da consolidação está situado no coroamento do túnel (270°) e tem valor de 494kN/m. A Figura 3.15b) mostra que a maior variação negativa acontece no hasteal do lado da cortina (180°) ao fim de 100 anos, com valor de -39kN/m, enquanto a maior variação

positiva tem apenas um valor de 7kN/m e ocorre entre o hasteal mais afastado da cortina (0°) e a soleira (90°). Embora seja evidente uma tendência para a redução de N na zona do suporte mais próxima da cortina, ao longo da consolidação, globalmente as variações existentes entre os dois cálculos podem considerar-se bastante reduzidas quando comparadas com a magnitude dos esforços, pelo que neste caso concreto a cortina tem pouca influência nos esforços axiais do túnel.

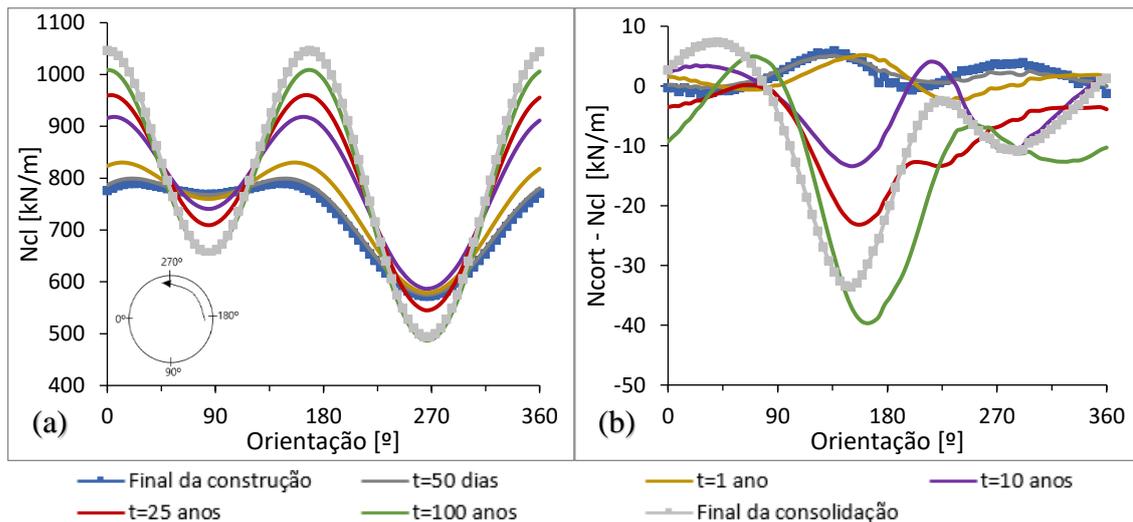


Figura 3.15 – Esforços axiais no suporte do túnel ao longo do processo de consolidação: a) sem cortina; b) diferença entre os casos com e sem cortina.

Os momentos fletores no contorno do suporte do túnel durante o processo de consolidação do maciço para o modelo de campo livre e para a diferença entre a situação com cortina, M_{cort} , e sem cortina, M_{cl} podem ser analisados na Figura 3.16. O mesmo tipo de análise referida para N deve ser feito para M . Aqui verifica-se que a consolidação provoca um aumento positivo de M no coroamento e soleira e negativo nos hasteais, o que está igualmente relacionado com a evolução do achatamento do suporte. A Figura 3.16b) mostra que com a cortina existe um aumento de M na zona entre a soleira e o hasteal do lado da cortina ($\approx 140^\circ$) atingindo uma diferença máxima, no final da consolidação de 19kNm/m, e próximo ao coroamento do túnel de 13kNm/m. Também se observa um incremento no momento mínimo entre o hasteal mais próximo da cortina e o coroamento ($\approx 210^\circ$) de -20kNm/m no final da consolidação. O que se pode concluir, de forma geral, é que a consolidação do maciço afeta ambos os esforços N e M , agravando ambos, mas que a presença da cortina não provoca alterações significativas nestes esforços quando comparadas com a sua magnitude.

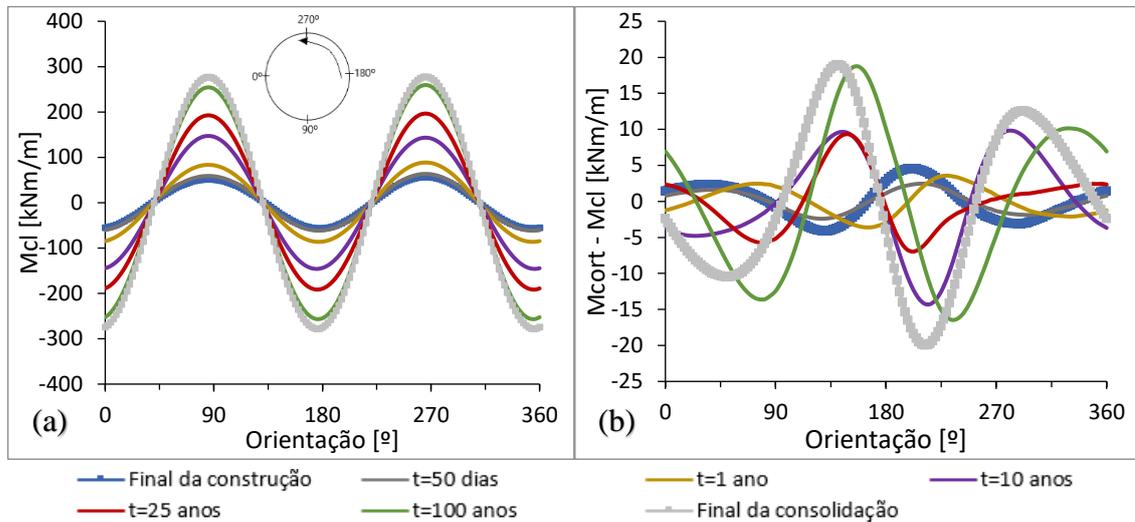


Figura 3.16 – Momento fletor no suporte do túnel ao longo do processo de consolidação: a) com cortina; b) diferença entre os casos com e sem cortina.

3.4.4.2. Cortina

Na Figura 3.17 estão representados os deslocamentos horizontais da cortina (traço contínuo com símbolo quadrado), bem como os de campo livre (CL) no mesmo alinhamento ($d/Dt=1,25$) (traço não contínuo). Pode-se observar que os deslocamentos têm o sentido sempre em direção ao túnel e que os seus valores máximos se encontram no topo da cortina. Do final da construção até ao fim de 10 anos os valores dos deslocamentos à superfície são menores no cálculo de referência do que em campo livre, passando a ser o contrário a partir dos 25 anos. Este efeito pode ser causado pela diferença crescente até ao fim de 25 anos entre os NF e as pressões intersticiais em ambos lados da cortina e atrás e à frente do túnel (Figuras 3.4 e 3.5). Com o evoluir da consolidação os deslocamentos horizontais da cortina tendem continuamente a crescer, bem como a diferença entre estes e os de campo livre, atingindo uma diferença de 15mm ao nível da superfície no final da consolidação. O aumento desta diferença pode ser, em parte, justificado pelo facto de a diferença de pressões intersticiais, entre a parte de trás e a parte da frente da cortina, tender a aumentar nas zonas superiores da cortina a partir dos 100 anos (Figura 3.5). É de se salientar que o sentido e direção dos deslocamentos horizontais ao longo do processo de consolidação do maciço são condizentes com o esperado após a escavação do túnel. Nota-se, contudo, um ligeiro recuo na base da cortina, associado a uma rotação da cortina no final da consolidação, o que parece estar associado com o alívio das pressões hidráulicas na parte de trás da cortina.

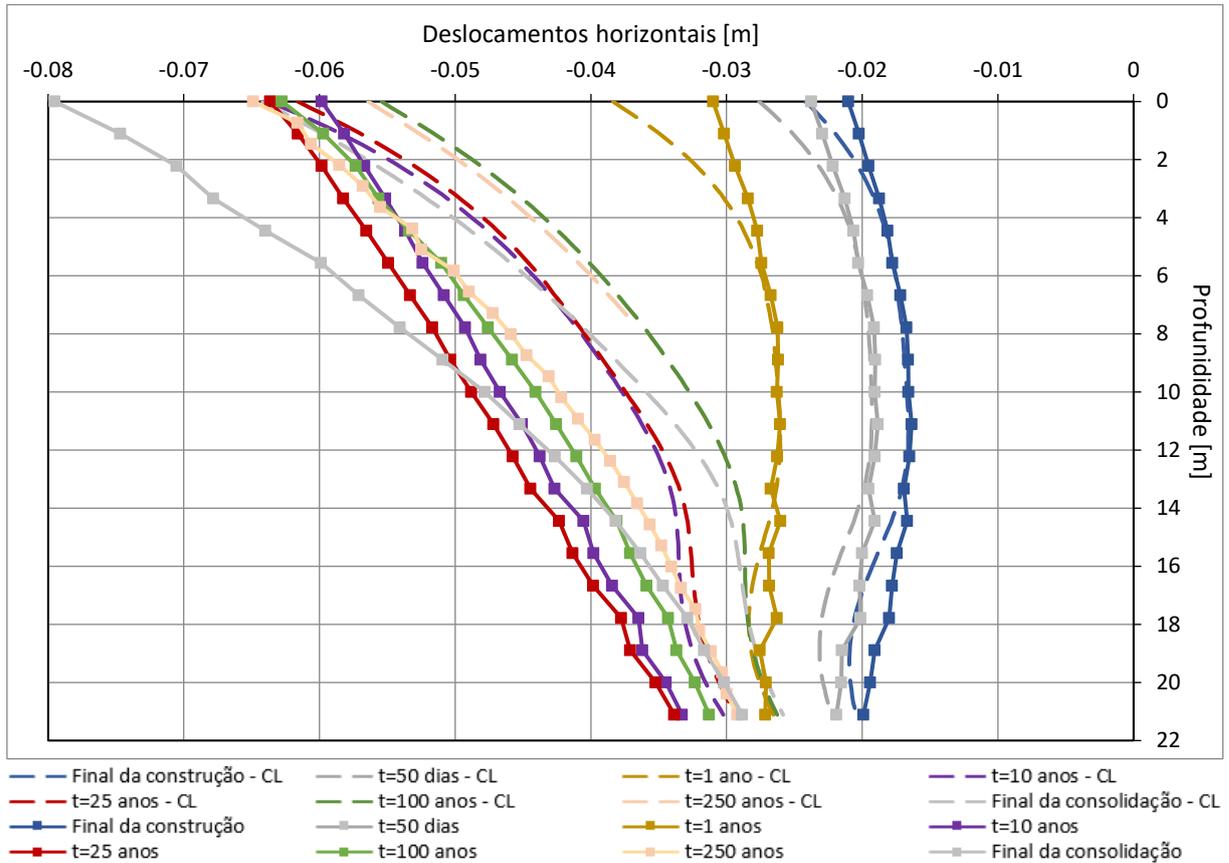


Figura 3.17 – Deslocamentos na cortina ao longo do processo de consolidação.

A Figura 3.18 mostra a evolução dos esforços axiais em toda a altura da cortina ao longo do tempo. Imediatamente após a construção verifica-se que o valor de N cresce em profundidade até aos 15,3m, atingindo aí um valor de 285kN/m, passando a diminuir até ao pé da cortina até um valor de 115kN/m. Esta redução deve-se ao facto de a escavação do túnel, e o conseqüente alívio de tensões no maciço, tender a provocar um levantamento do maciço nesta zona que se traduz na geração de tensões tangenciais com o mesmo sentido transmitidas à cortina. Também se observa que o valor de N cresce com o decorrer do processo de consolidação, com o pico a passar da profundidade de 15,3m no fim da construção para 13,5m no final da consolidação, na qual atinge um valor de 790kN/m, devido ao efeito do atrito negativo provocado pela consolidação e assentamento do maciço. Tal obriga a que também haja uma maior mobilização da resistência da interface (atrito positivo), o que faz estender-se da base até a cota de 13,5m com maiores tensões tangenciais. É de se notar que a diferença entre o pico do valor de N no final da de construção e no final da consolidação é de 505kN/m, i.e., uma variação positiva de 277% no valor de N máximo na cortina.

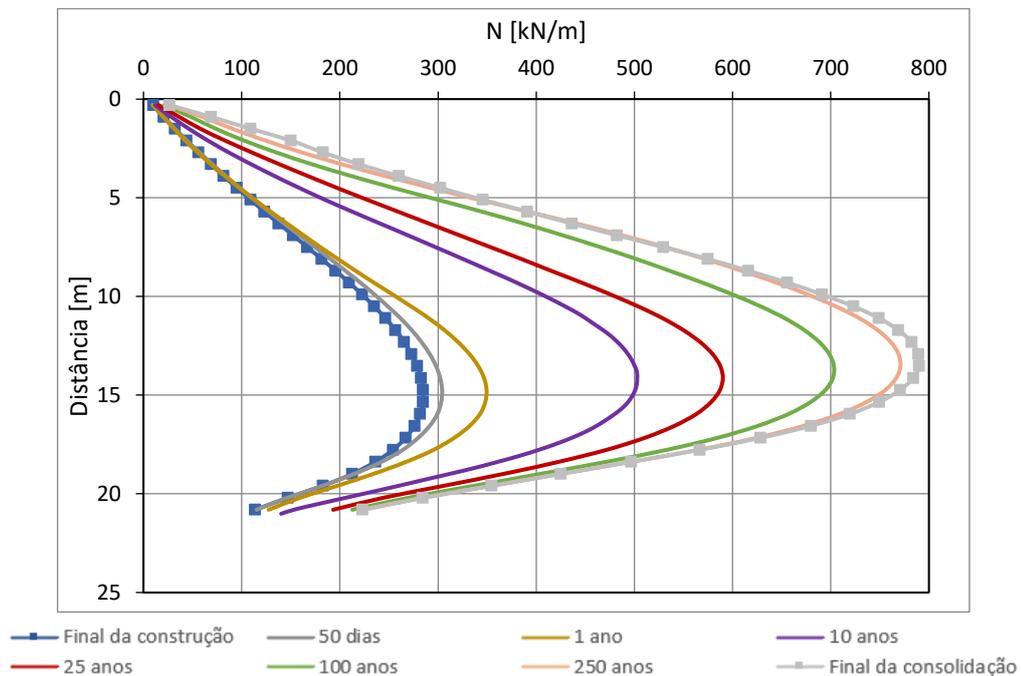


Figura 3.18 – Esforços axiais na cortina ao longo do processo de consolidação.

A Figura 3.19 mostra o comportamento dos diagramas de momentos fletores da cortina para vários instantes temporais. É possível notar o impacto que a descida assimétrica do NF entre os dois lados da cortina tem neste esforço, principalmente no período entre os 5 e os 25 anos (ver Figuras 3.3 e 3.4 e Tabela 3.4). O valor máximo situa-se a uma profundidade de aproximadamente 5m ao final do primeiro ano, havendo uma migração deste pico, com forte alteração no padrão da distribuição de M , entre os 5 e 10 anos, para uma posição final por volta dos 13m de profundidade. Tal mudança abrupta pode ser associada à descida desigual do NF à frente e atrás da cortina. Ao fim de 15 anos o pico desloca-se novamente para aproximadamente 5m, estando tal associado a uma diferença de 12,3m da cota do NF em ambos os lados da cortina. Até ao período de 25 anos não se verificam variações significativas na magnitude e padrão de distribuição de M na cortina. O comportamento constante no período de 15 a 25 anos é possivelmente justificado pela semelhança no desnível do NF à frente e atrás da cortina (Figura 3.4) enquanto a migração do pico pode estar relacionada com a diferença de pressões intersticiais e do NF atrás e à frente da cortina. A partir de 100 anos o padrão de distribuição de M altera-se novamente até ao final da consolidação verificando-se que o pico do M máximo desce até à profundidade de aproximadamente 13m, atingindo aí o valor de 86kNm/m. O comportamento de M para maiores tempos está associado à visível diminuição do NF em ambos os lados da cortina. Já o valor negativo do momento tem o seu pico sempre entre, aproximadamente, 18m e 20m de profundidade, atingindo um valor máximo ao final de 5 anos de -49kNm/m.

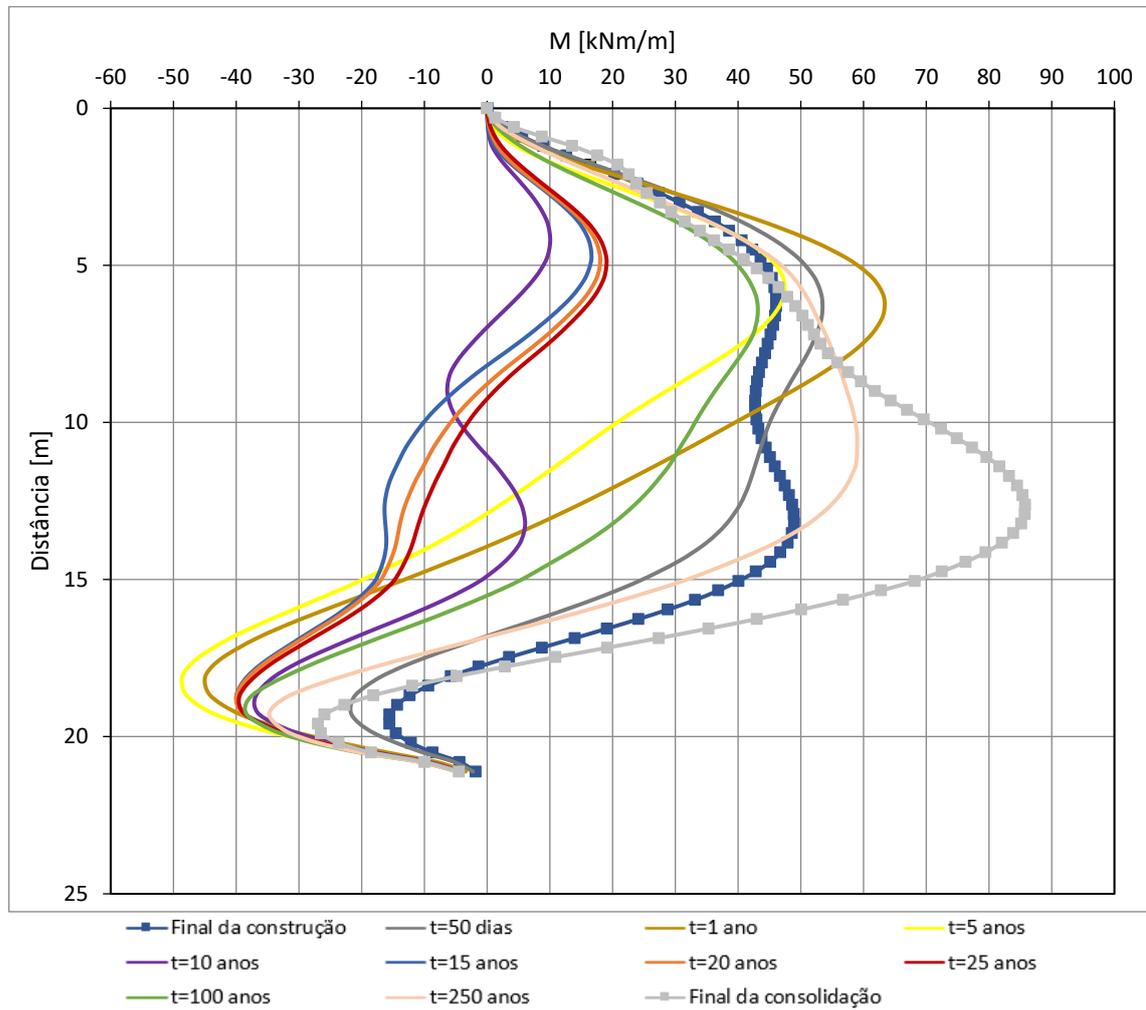


Figura 3.19 – Momentos fletores na cortina ao longo do processo de consolidação.

4. ANÁLISE PARAMÉTRICA

4.1. Considerações iniciais

Neste capítulo o desempenho da cortina ao longo do processo de consolidação do maciço é avaliado através de uma análise paramétrica onde se faz variar a posição da cortina em relação ao túnel e a sua altura. A influência da posição da cortina na evolução da bacia de subsidência ao longo do tempo, foi avaliada através dos parâmetros de eficiência previamente apresentados (Eqs. 2.6 e 2.7). Também o seu impacto na mobilização dos esforços máximos atuantes nos elementos estruturais, tanto na cortina como no suporte do túnel, foi estudado através das Eqs. 2.8 e 2.9.

Os valores normalizados das diferentes alturas (h/Dt) e afastamentos (d/Dt) da cortina em relação ao eixo do túnel, considerados no estudo paramétrico, encontram-se representadas na Figura 4.1 e sumarizadas na Tabela 4.1. Os afastamentos adotados na análise foram de $d/Dt=0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0$ e, adicionalmente, para as alturas consideraram-se as 5 possibilidade seguintes: $h/Dt=-0,5$ (coroamento do túnel); $0,0$ (eixo do túnel); $0,5$ (soleira do túnel); $0,75$; e $1,0$ (ambos abaixo da soleira). Portanto, foram consideradas um total de 25 configurações geométricas, cada qual correspondente a uma posição da cortina. É importante enfatizar que as propriedades mecânicas da cortina e do suporte (Tabela 3.2), bem como as propriedades do maciço e da interface da ligação solo-cortina foram mantidas iguais às do modelo de referência (Tabela 3.1), variando-se apenas a altura e o afastamento da cortina em relação ao túnel.

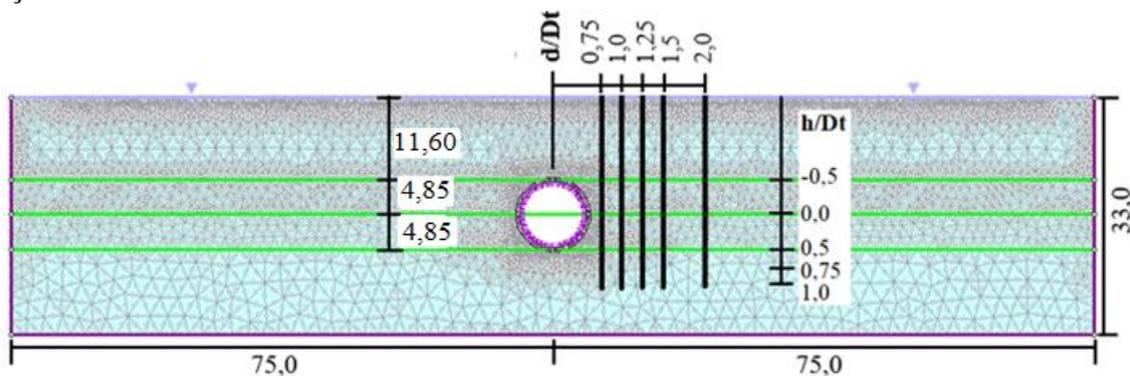


Figura 4.1 – Diferentes posições e alturas da cortina consideradas na análise paramétrica.

Tabela 4.1 – Posições da cortina no estudo paramétrico.

d/Dt	h/Dt
0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0	-0,5; 0,0; 0,5; 0,75; 1,0

4.2. Evolução das eficiências com o tempo

Após se ter constatado que o pico das eficiências ocorre ao fim de 25 anos no modelo de referência, e face à relevância da ocorrência destes picos na análise do comportamento do maciço, é aqui realizado um estudo prévio para estimar o instante de tempo para o qual ocorre o valor máximo das eficiências em função das diferentes posições da cortina analisadas no estudo paramétrico. Para o efeito foram considerados os instantes de tempo correspondentes ao final da construção, a 1, 10, 20, 25, 100 anos e final da consolidação. Uma análise mais abrangente das eficiências, para todas as posições da cortina e para os instantes de tempo que se consideram mais relevantes, é apresentada em pormenor mais à frente, na Secção 4.3.1.

4.2.1. Influência da profundidade

Nesta análise é considerada a cortina a uma distância de $d/Dt=1,25$, igual ao caso de referência, para as diversas alturas da cortina ($h/Dt=-0,5; 0,0; 0,5; 0,75; 1,0$). A Figura 4.2 mostra os resultados obtidos para η_l , η_g e $\eta_{g,be}$, para cada uma das alturas da cortina ao longo do tempo.

Numa primeira observação dos resultados, pode verificar-se que, de forma geral e independentemente da profundidade, tal como no modelo de referência, as curvas da eficiência são praticamente paralelas, tendo-se que quanto mais profunda for a cortina maior a sua eficiência, podendo esta crescer globalmente até 15% (33% se considerarmos somente a influência atrás da cortina) e quase 55% localmente. Em termos de comportamento a eficiência é praticamente constante ou decresce ligeiramente até aos 10 anos após a construção do túnel, aumentando em seguida até atingir o pico no período compreendido entre os 20 e os 30 anos. Após este pico observa-se, na generalidade, um decréscimo da eficiência até aos 100 anos. A partir deste instante, as eficiências são praticamente constantes para as cortinas menos profundas ou tendem a decrescer para as cortinas mais profundas, até ao final da consolidação. Também se observa existirem eficiências negativas no caso de a cortina ser menos profunda. Tal comportamento irá ser explicado em pormenor mais adiante. Pela análise da figura conclui-se que os valores de pico ocorrem no período compreendido entre os 20 e os 30 anos após a construção do túnel, independentemente do parâmetro de eficiência analisado.

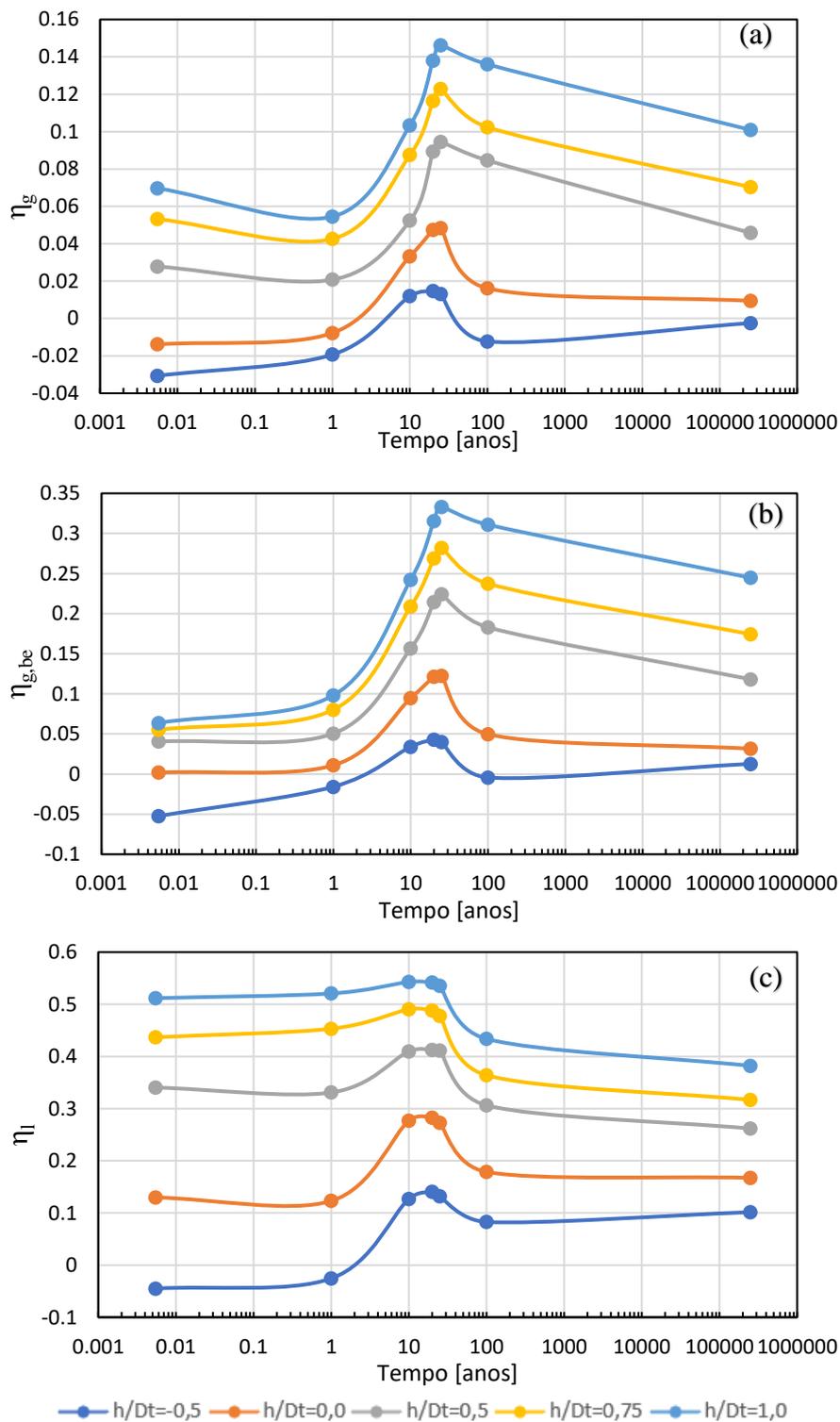


Figura 4.2 – Cortina afastada $d/Dt=1,25$ com diferentes alturas - evolução temporal da eficiência: a) global; b) global atrás da cortina; c) local.

4.3.2. Influência do afastamento

A Figura 4.3 apresenta a evolução temporal das eficiências para uma cortina colocada ao nível da soleira ($h/Dt=0,5$), tal como no caso de referência, para diferentes afastamentos em relação ao túnel ($d/Dt=0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0$).

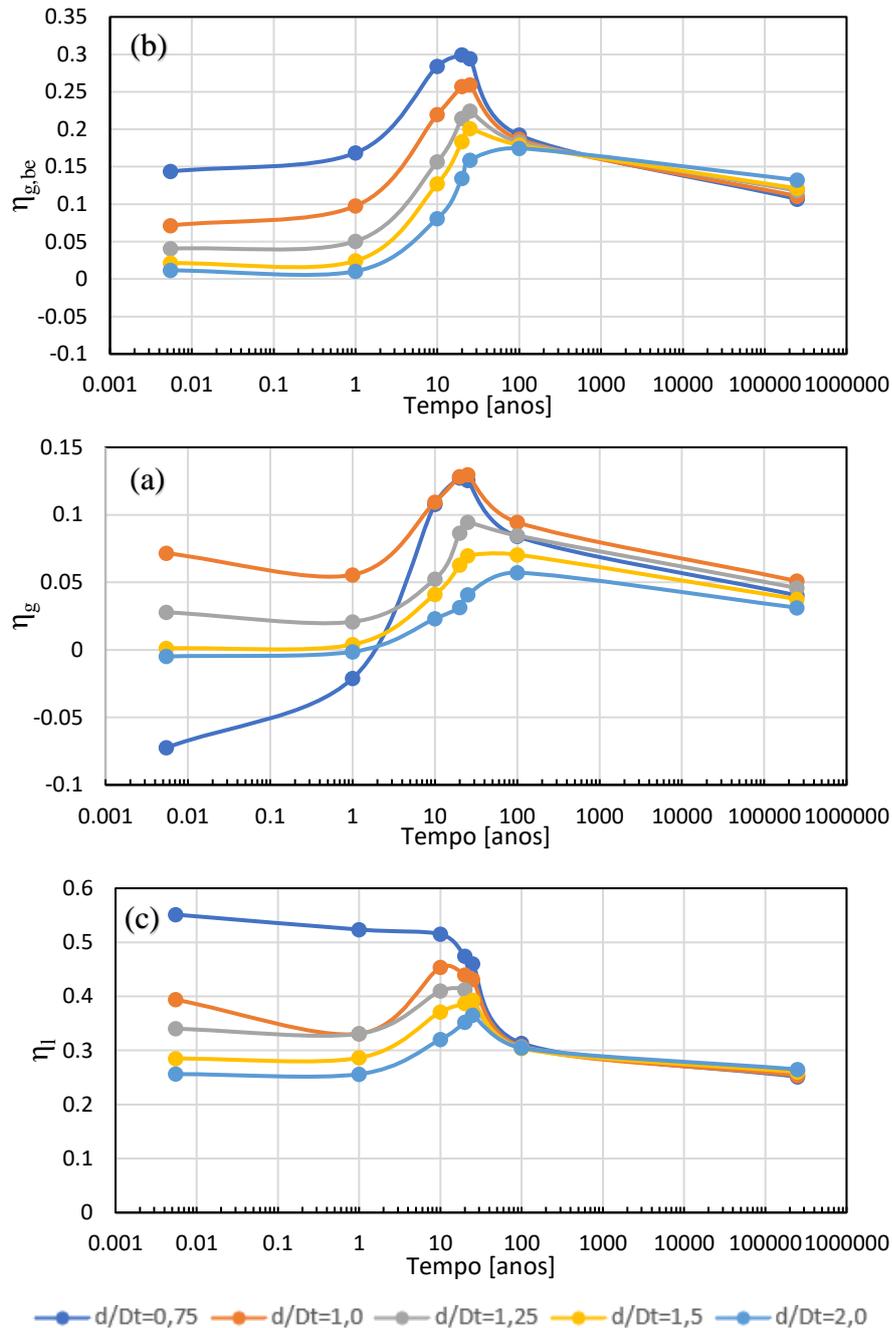


Figura 4.3 – Cortina com altura $h/Dt=0,5$ com diferentes afastamentos - evolução temporal da eficiência: a) global; b) global atrás da cortina; c) local.

De forma geral, as eficiências tendem a crescer com o aproximar da cortina ao túnel. Pode-se notar que a partir dos 100 anos as curvas são praticamente iguais em termos de eficiência global atrás da cortina e local, já as da eficiência global são paralelas. O único comportamento diferente se repete na cortina mais próxima ao túnel ($h/Dt=0,75$), e tal será alvo de análise mais detalhada nas Secções seguintes. Também nesta análise, os resultados revelam que a maioria dos picos das eficiências ocorrem entre os 20 e os 30 anos após a construção do túnel. Contudo, observa-se uma tendência para o pico de η_g ocorrer mais tardiamente com o afastamento da cortina, sendo atingido para $t=100$ anos no caso de $d/Dt=2,0$, assim como uma tendência para o pico de η_l ocorrer mais cedo para cortinas mais próximas ao túnel. Em relação a este último caso, para $d/Dt=0,75$, verifica-se mesmo que a eficiência local, η_l , é máxima imediatamente após a construção do túnel, diminuindo depois ao longo do tempo.

Face ao observado nas Figuras 4.2 e 4.3, conclui-se que os valores máximos da eficiência ocorrem na janela temporal compreendida entre os 20 e os 100 anos para a generalidade das posições da cortina, com maior incidência entre os 20 e os 30 anos, sendo apenas exceção o caso com a cortina mais próxima ao túnel ($d/Dt=0,75$) em que o valor de η_l é máximo imediatamente após a construção do túnel.

4.3. Estudo paramétrico

Para o estudo paramétrico que se apresenta e tendo por base os resultados anteriores foram selecionados os instantes de tempo que se consideram ser relevantes para a análise do comportamento do maciço e dos elementos estruturais. Estes instantes são: i) imediatamente após a construção do túnel; ii) ao fim de 25 anos, que se pode considerar como representativo do período em que é atingido o máximo das eficiências na generalidade das posições da cortina; iii) ao fim de 100 anos, tido como o período de vida útil das estruturas; e iv) no final da consolidação, para melhor se perceber a tendência do comportamento do maciço e dos elementos estruturais com a evolução da consolidação.

4.3.1. Eficiência da cortina

A Figura 4.4 mostra a variação de η_g (coluna da esquerda) e de $\eta_{g,be}$ (coluna da direita) com o afastamento da cortina em relação ao túnel, para os instantes de tempo referidos e para as diversas alturas analisadas. Verifica-se haver comportamentos muito distintos em função da altura da cortina. Quando o pé da cortina se situa ao nível do eixo do túnel ou acima deste ($h/Dt \leq 0,0$), a eficiência global η_g assume valores negativos de grande amplitude para $d/Dt \leq 1,0$, tanto mais negativos quanto maior a proximidade ao túnel, enquanto para distâncias superiores ($d/Dt \geq 1,25$) esse parâmetro passa a ser muito próximo de 0. Já para $\eta_{g,be}$, esse efeito é mais notório apenas para a cortina ao nível do coroamento ($h/Dt = -0,5$), apesar de ainda presente imediatamente após a construção do túnel, na cortina posicionada ao nível do seu eixo ($h/Dt = 0,0$). O efeito nocivo da presença da cortina para estas posições está relacionado com o peso da cortina, uma vez que quando esta se situa acima do túnel, está a carregar o maciço abaixo induzindo maiores movimentos para o interior da escavação (Figura 4.5) e, por consequência, maiores perdas de volume, principalmente evidentes à frente da cortina. Este fenómeno está relacionado com a plastificação do maciço na proximidade do túnel após a escavação, como representado na Figura 4.5.

Para cortinas mais profundas ($h/Dt \geq 0,5$), o valor de η_g tende a crescer com o aumento da altura da cortina, com os maiores valores a serem atingidos para $t=25$ anos, tal como observado anteriormente na Secção 4.2. Neste caso, para a cortina de maior altura ($h/Dt=1,0$) o valor de η_g atinge os 17%. Na generalidade, estes valores máximos são semelhantes para as posições mais próximas da cortina, tendendo a diminuir com o afastamento da cortina em relação ao túnel. A exceção acontece para a posição mais próxima do túnel ($d/Dt=0,75$) imediatamente após a escavação, em que η_g tem valores sempre negativos, independentemente da altura da cortina. Tal deve-se ao fato da presença da cortina criar um plano de descontinuidade que promove o deslizamento na interface entre o solo e a cortina, fazendo aumentar os assentamentos na frente da cortina. Já para o volume por detrás da cortina, $\eta_{g,be}$ assume valores elevados para as cortinas de maior altura ($h/Dt \geq 0,5$), em todos os instantes de tempo analisados, atingindo 44% para a cortina de maior altura e mais próxima do túnel, quando $t=25$ anos, com este parâmetro a tender a diminuir com o afastamento ao túnel. Verifica-se, também, que para maiores distâncias ambas as eficiências tendem a assumir os valores mais elevados para $t=100$ anos. Este facto pode estar relacionado com a influência da posição da cortina na rede de percolação gerada, a qual vai influenciar o processo de consolidação e a descida do NF.

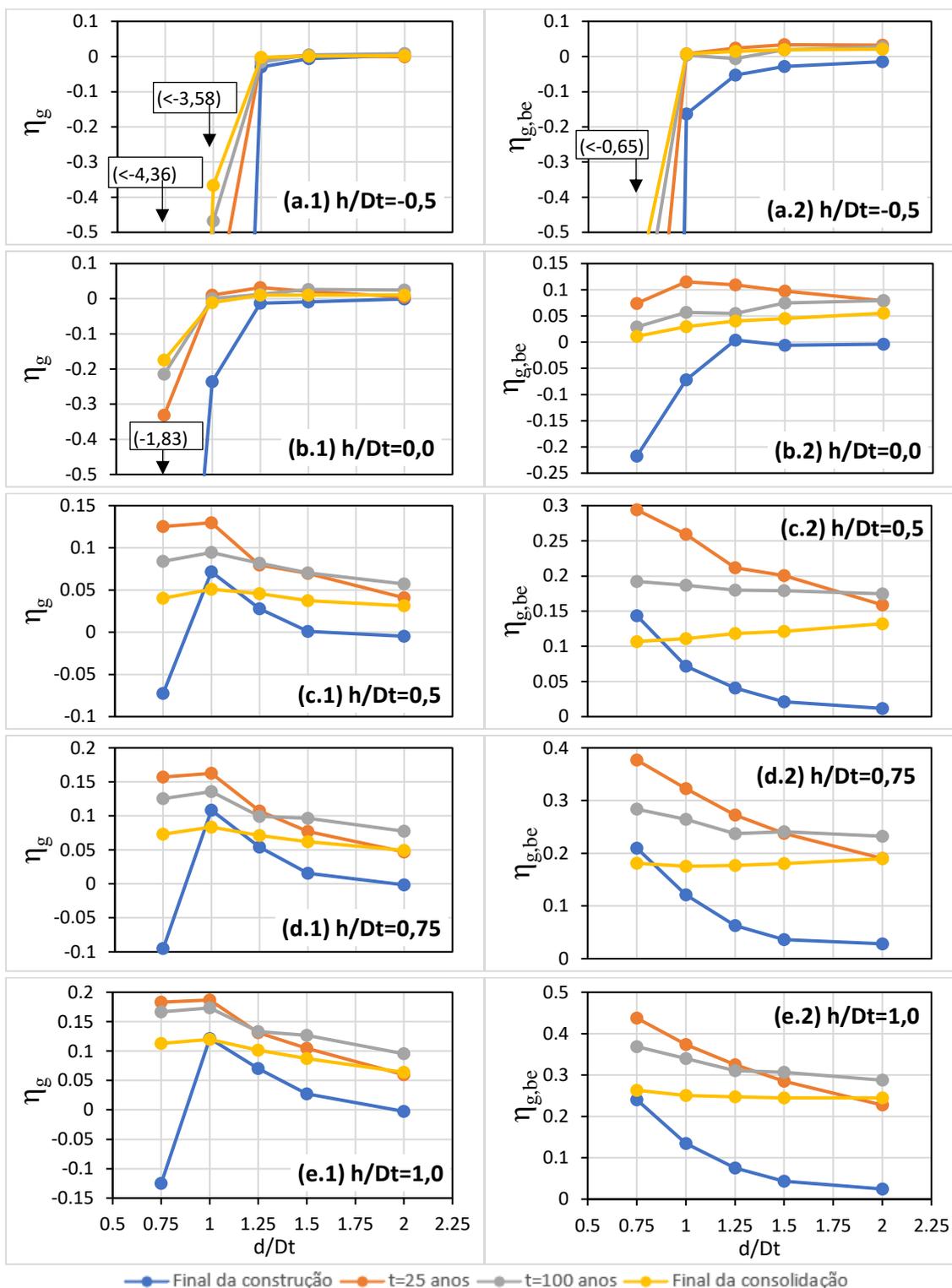


Figura 4.4 – Influência do afastamento da cortina em η_g e $\eta_{g,be}$ para diferentes instantes de tempo e profundidade: a) $h/Dt=-0,5$; b) $h/Dt=0,0$; c) $h/Dt=0,5$; d) $h/Dt=0,75$; e) $h/Dt=1,0$.

Portanto, conclui-se que, de uma forma geral, as cortinas têm bom comportamento em termos de eficiências globais, η_g e $\eta_{g,be}$, quando colocadas a um nível inferior ao do eixo do túnel, mostrando ser tanto mais eficientes quanto maior a sua altura. Também, em relação ao afastamento, as cortinas tendem a ser menos eficientes com a distância em relação ao túnel, embora no caso de grande proximidade haja um efeito contraproducente da presença da cortina imediatamente após a construção do túnel. Para os instantes de tempo analisados, as eficiências globais, η_g e $\eta_{g,be}$, atingem valores máximos para $t=25$ anos quando a cortina se situa a distâncias $d/Dt \leq 1,25$, com esses máximos a ocorrerem para $t=100$ anos quando a cortina se situa a maiores distâncias.

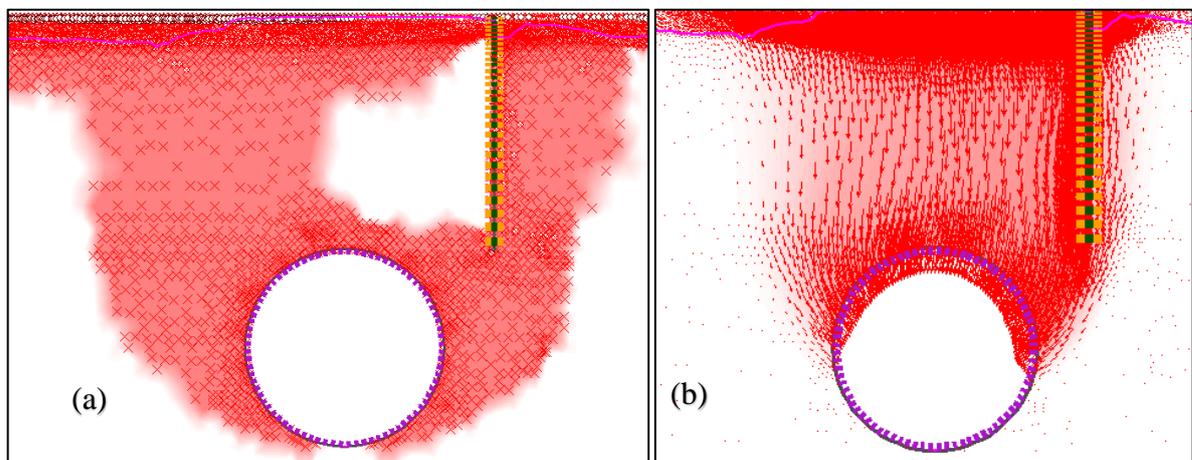


Figura 4.5 – Condições do maciço no final da construção para cortina com altura $h/Dt=-0,5$ e afastamento $d/Dt=0,75$: a) Zona plastificada; b) Vetores de deslocamentos totais.

Os valores da eficiência local obtidos a partir da variação do afastamento da cortina com as diversas alturas analisadas em cada intervalo de tempo considerado encontram-se representados na Figura 4.6.

Assim como para as eficiências globais apresentadas na Figura 4.4, o comportamento de η_l varia muito em função da altura da cortina. Quando a base da cortina se encontra na mesma cota que eixo do túnel ou acima ($h/Dt \leq 0,0$), a eficiência local η_l assume valores negativos de grande valor no final da construção, para as posições mais próximas do túnel ($d/Dt \leq 1,0$), sendo este valor tanto menor quanto maior a proximidade ao túnel. A partir do período de 25 anos, η_l assume valores positivos para $d/Dt \geq 1,0$, período no qual se encontram maiores valores, não superiores a 30%. Os valores negativos observados nas Figuras 4.6a) e b) quando a cortina se encontra posicionada próxima ao túnel ($d/Dt \leq 1,0$) pode estar relacionada com o fato da cortina ter o seu pé numa zona onde surge uma grande concentração de tensões em virtude da

construção do túnel, o que causa maiores assentamentos na cortina e zona envolvente (ver Figura 4.5).

Para cortinas com o pé localizado abaixo do eixo do túnel ($h/Dt \geq 0,5$) o comportamento de η_l é diferente, assumindo maiores valores quanto maior for a altura da cortina e a sua proximidade ao túnel. No entanto, para períodos superiores a 100 anos, verifica-se haver uma tendência de uniformização dos valores da eficiência para os diversos afastamentos, principalmente para as alturas de $h/Dt=0,5$ e $h/Dt=0,75$. Para $h/Dt \geq 0,5$ os picos de eficiência estão situados no final da construção do túnel, sendo o maior valor neste caso $\eta_l=70\%$ ($h/Dt=1,0$), para cortinas próximas do túnel. Contudo, para $d/Dt \geq 1,25$ as maiores eficiências ocorrem no período de 25 anos. De forma geral verifica-se que a cortina tem menor eficácia a partir do período de 25 anos, porém os valores nunca são inferiores a 25% ($h/Dt=0,5$ e $d/Dt=0,75$). Este fato pode estar relacionado com o abrandamento da descida do NF por trás da cortina, mas também pode ser justificado com a menor capacidade demonstrada pela cortina em conter os deslocamentos horizontais a partir do período de 25 anos (ver Fig. 3.17).

Logo, em concordância com o observado para a eficiência global, é possível concluir que as cortinas, quando instaladas a um nível abaixo do eixo do túnel têm um bom comportamento em termos de eficiência local, η_l , exibindo uma maior eficiência quanto maior for a altura. A eficácia da cortina na redução dos assentamentos e do volume da bacia por trás da cortina também tende a crescer quanto menor for o afastamento da mesma em relação ao túnel, apesar de na posição mais próxima poder potenciar um aumento dos assentamentos do lado do túnel. Em relação ao comportamento ao longo do tempo, a eficiência local apresenta seus picos no final da construção para a posição da cortina mais próxima ao túnel mas, na generalidade, os maiores valores se registam ao fim de 25 anos, sendo que posteriormente se verifica uma redução da eficiência.

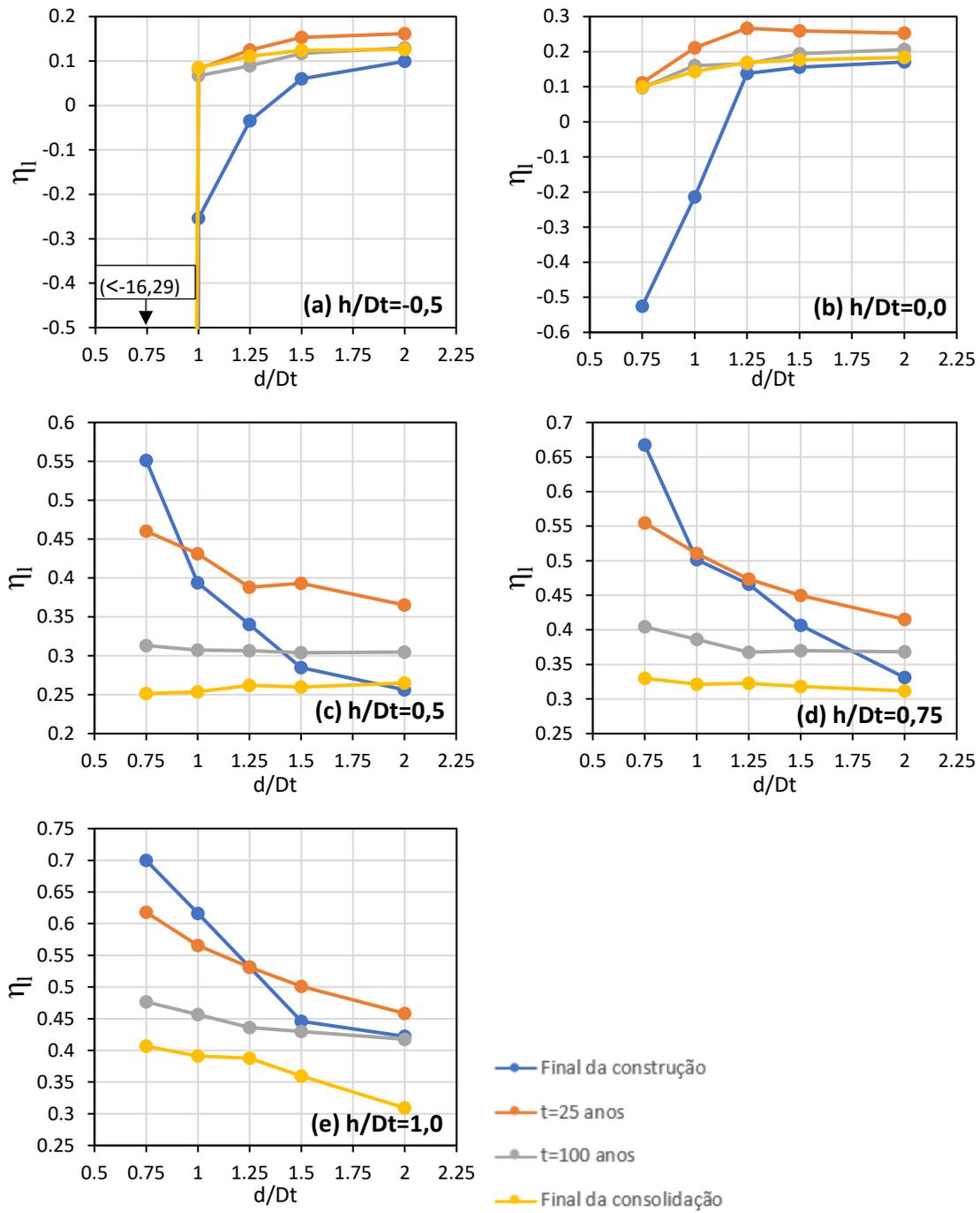


Figura 4.6 – Influência do afastamento da cortina em η_l para diferentes instantes de tempo e profundidades: a) $h/Dt=-0,5$; b) $h/Dt=0,0$; c) $h/Dt=0,5$; d) $h/Dt=0,75$; e) $h/Dt=1,0$.

4.3.2. Forças mobilizadas no suporte do túnel

A partir da Figura 4.7 é possível analisar a variação, em função do posicionamento da cortina e do tempo, da razão entre os esforços axiais máximos do suporte do túnel com cortina, $N_{máx}$, e os do modelo de campo livre, $N_{máx,cl}$. É de se notar que a presença da cortina tem no geral um efeito pouco relevante no valor de $N_{máx}$ do suporte do túnel, com a maior influência a verificar-se quando a cortina está mais próxima ao túnel ($d/Dt=0,75$), onde se verifica uma variação menor que 6%. É possível também verificar que há uma evolução distinta, em função da altura da cortina. Para cortinas mais altas ($h/Dt \geq 0,5$) o suporte é ligeiramente mais solicitado após sua construção, com um acréscimo de esforço axial inferior a 2% para $d/Dt=0,75$, sendo posteriormente reduzido ao longo do processo de consolidação. Nestes casos, a redução nunca é superior a 6% para a cortina mais próxima do túnel, quando comparada com a situação de campo livre.

Quando a cortina se encontra no nível do coroamento do túnel ($h/Dt=-0,5$) e na posição mais próxima do túnel ($d/Dt=0,75$), verifica-se um pequeno acréscimo de esforço axial no final da construção que aumenta com o passar do tempo, ao contrário do que acontece com as cortinas mais compridas. Este fato tem a ver com o efeito do atrito negativo gerado durante a consolidação, que somado ao peso próprio da cortina, faz aumentar a sollicitação proveniente da cortina sobre o suporte do túnel. Para os restantes afastamentos ($d/Dt \geq 1,0$) sua influência é mínima (<1%), independentemente do instante de tempo.

Para a posição ao nível do eixo do túnel ($h/Dt=0,0$), o efeito da cortina em $N_{máx}$ do suporte está numa situação intermédia entre as duas situações descritas anteriormente. Tendo acréscimos de esforço axial inferiores a 1% no final da construção e um decréscimo de cerca de 5% com a cortina situada na posição mais próxima ao túnel no final da consolidação.

Conclui-se assim que a cortina tem um efeito pouco expressivo em $N_{máx}$ do suporte do túnel, sendo a maior influência verificada quando a cortina tem maior altura e se encontra mais próxima ao túnel, ainda assim não tendo variações superiores a 6%. Para cortinas acima no nível do coroamento se verifica um acréscimo do esforço axial ao longo da consolidação, enquanto para cortinas maiores se tem inicialmente um acréscimo e depois uma redução crescente ao longo do período de consolidação.

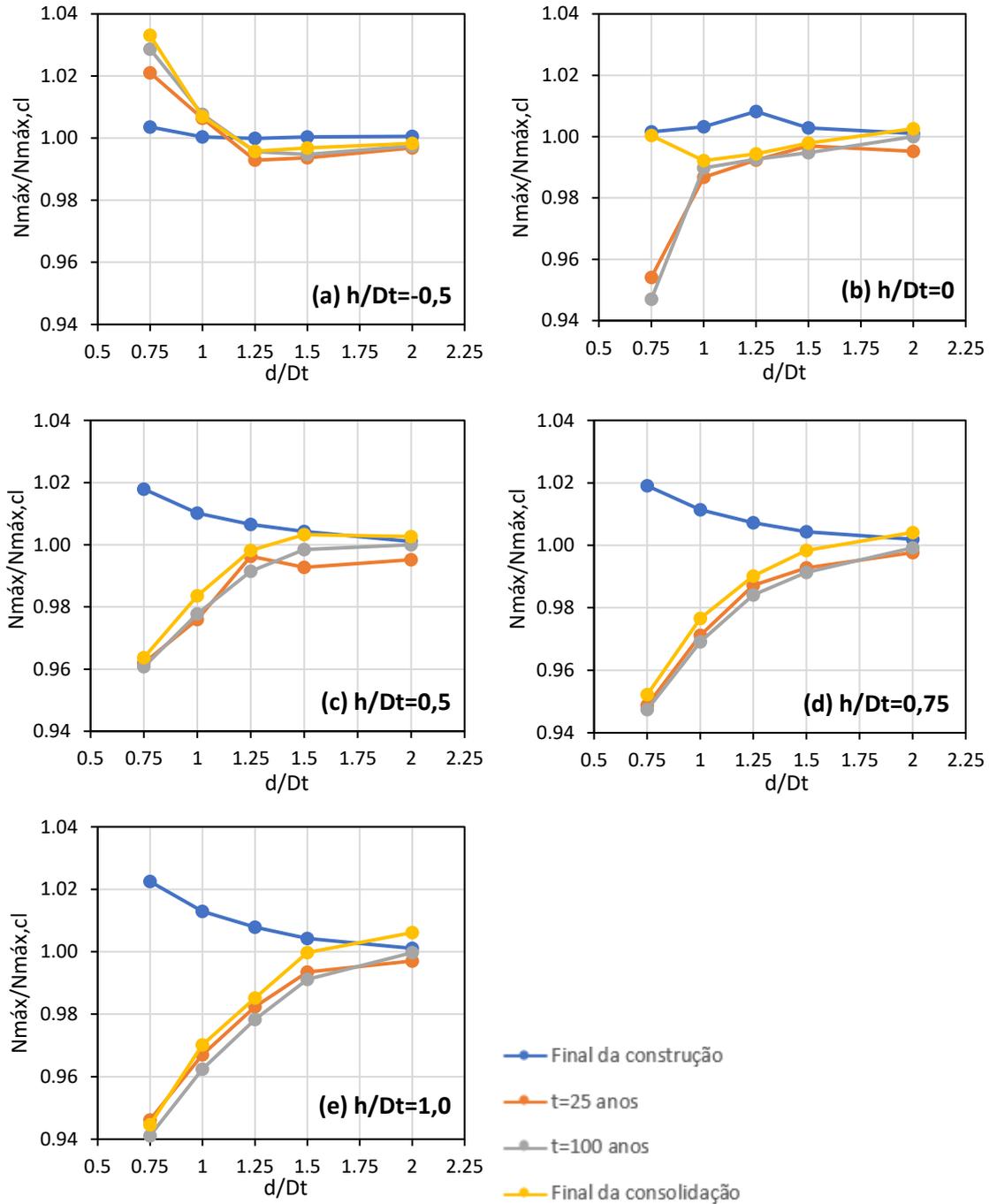


Figura 4.7 – Influência do afastamento da cortina no esforço axial máximo normalizado no suporte do túnel para diferentes instantes de tempo e profundidades: a) $h/Dt = -0,5$; b) $h/Dt = 0,0$; c) $h/Dt = 0,5$; d) $h/Dt = 0,75$; e) $h/Dt = 1,0$.

A Figura 4.8 apresenta a evolução dos momentos fletores máximos ($M_{máx}$) e mínimos ($M_{mín}$) no suporte do túnel em função do afastamento da cortina e para os instantes de tempo definidos. Tal como para o esforço axial, os valores são aqui representados de forma adimensional através da razão entre os valores com cortina e em campo livre. Com exceção da cortina de menor altura, na qual o efeito da cortina é praticamente inexistente e independentemente do afastamento ou do instante de tempo, ambas as variações para o máximo momento positivo e negativo para $h/Dt \geq 0,0$ apresentam padrões de evolução muito semelhantes. Nestes casos, a solicitação do suporte para $M_{máx}$ e $M_{mín}$ sofre uma redução para a cortina na posição mais próxima ao túnel, redução esta que é de menor magnitude à medida que a cortina se afasta do túnel, passando a existir acréscimos dos momentos, ainda que inferiores a 8%, para as posições mais afastadas ao fim de 25 anos. Também é notado uma redução do $M_{máx}$ e $M_{mín}$ para cortinas com o pé situado abaixo do nível do coroamento ($h/Dt \geq 0,0$) e quando $d/Dt \leq 1,25$, sendo esta redução tanto maior quanto maior for a cortina, chegando a cerca de 31% ($h/Dt = 1,0$) para $t = 25$ anos. A magnitude desta redução tende a diminuir ao longo do processo de consolidação. Já para $d/Dt \geq 1,5$, no final da construção os valores de $M_{máx}$ e $M_{mín}$ se aproximam dos respetivos valores em campo livre e ao fim de 25 anos têm acréscimos não superiores a 5% para $M_{máx}$ e 8% para $M_{mín}$ no final da consolidação, para a posição mais afastada do túnel. Isto pode estar relacionado com o facto de a partir de $t = 25$ anos a cortina sofrer um deslocamento horizontal superior ao de campo livre, aumentando assim as solicitações sobre o suporte do túnel (Figura 3.17).

Portanto, pode-se concluir que cortinas com a base acima do eixo do túnel têm efeito negligenciável nos momentos máximos e mínimos mobilizados no suporte túnel. As cortinas cujo pé se situa abaixo do nível do eixo do túnel induzem uma redução dos momentos no suporte, que é tanto maior quanto mais profunda e mais próxima do túnel estiver a cortina. Nas posições mais afastadas e a partir de $t = 25$ anos, existe uma tendência para um aumento dos momentos em relação aos de campo livre. É de se salientar que tanto as reduções quanto os aumentos dos momentos máximos e mínimos são tanto maiores quanto maior for a altura da cortina. O efeito do tempo tende a aumentar a solicitação do suporte do túnel, de forma geral, a partir de $t = 25$ anos, podendo, ainda assim, a cortina ter um efeito benéfico se situada a uma distância $d/Dt \leq 1,25$.

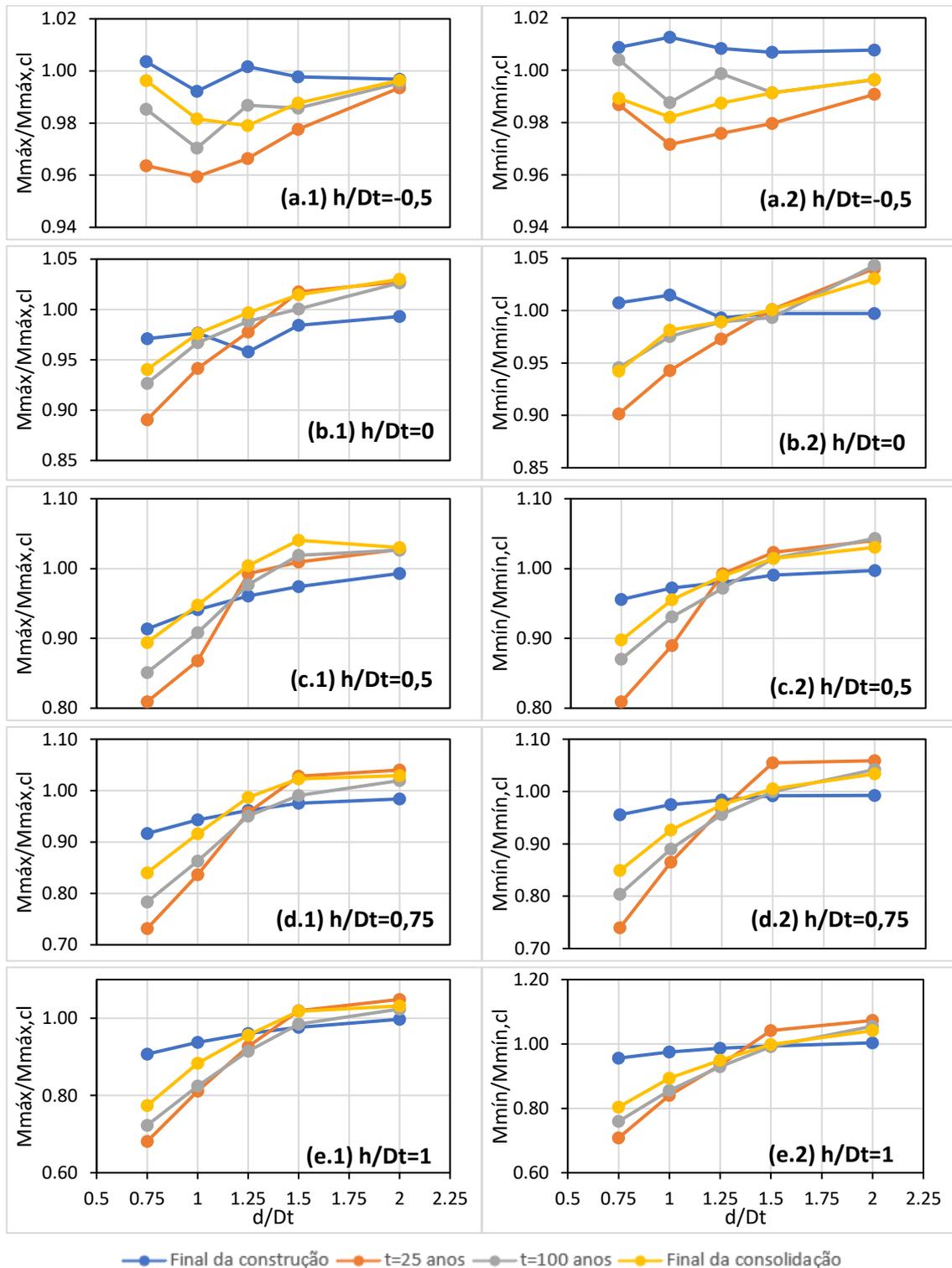


Figura 4.8 – Influência do afastamento da cortina no momento fletor máximo/mínimo normalizado no suporte do túnel para diferentes instantes de tempo e profundidades: a) $h/Dt=-0,5$; b) $h/Dt=0,0$; c) $h/Dt=0,5$; d) $h/Dt=0,75$; e) $h/Dt=1,0$.

4.3.3. Esforços na cortina

A evolução do esforço axial máximo na cortina, $N_{m\acute{a}x}$, em função do seu afastamento, para diferentes intervalos de tempo estão representados na Figura 4.9. Verifica-se haver comportamentos distintos para diferentes alturas da cortina. Para cortinas em que a base se situa no nível do coroamento ($h/Dt=-0,5$) pode-se notar um comportamento quase constante de $N_{m\acute{a}x}$ em função do afastamento do túnel, ocorrendo os seus maiores valores no final da consolidação, como se era de esperar.

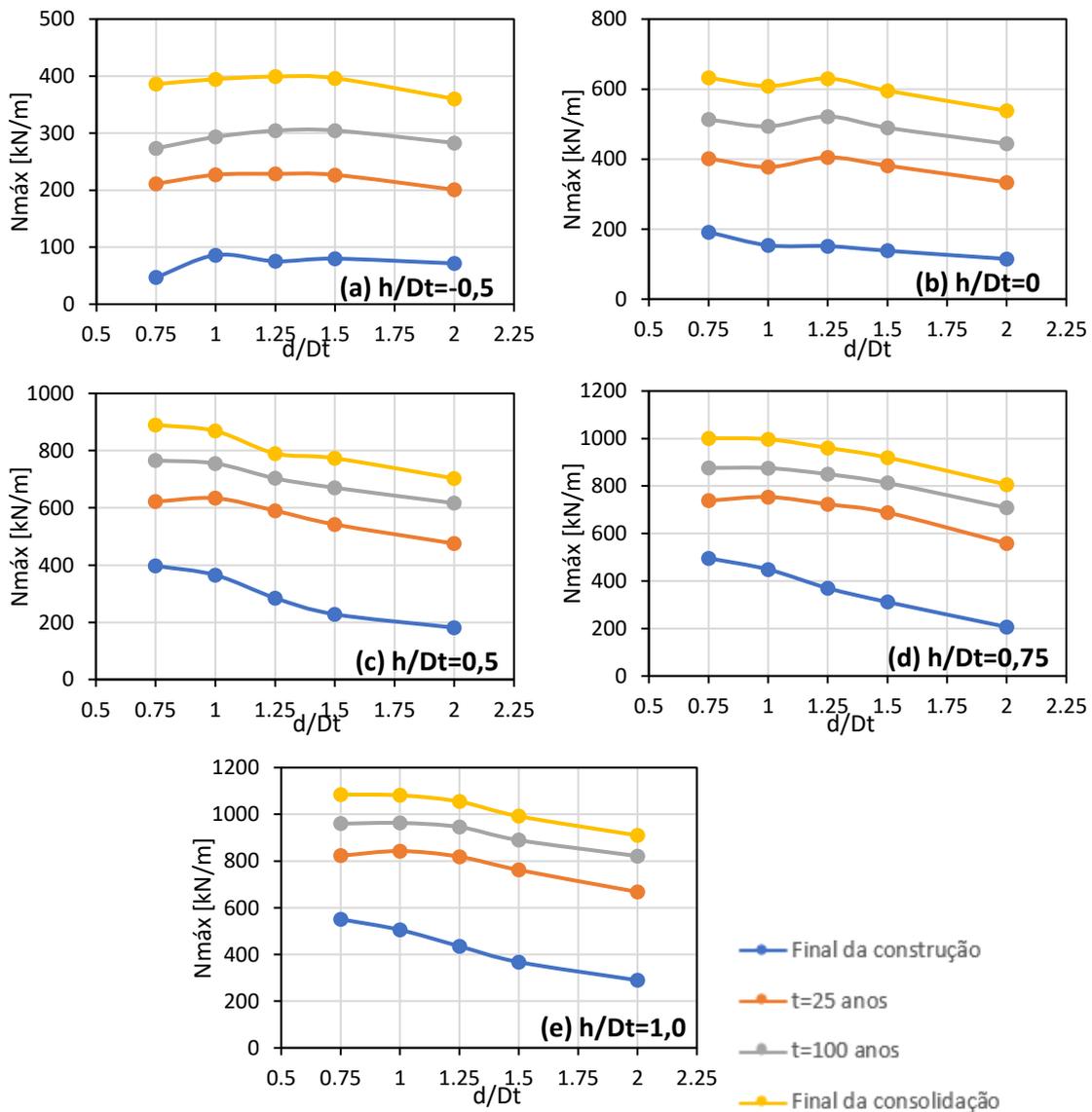


Figura 4.9 – Influência do afastamento da cortina no esforço axial máximo da cortina para diferentes instantes de tempo e profundidades: a) $h/Dt=-0,5$; b) $h/Dt=0,0$; c) $h/Dt=0,5$; d) $h/Dt=0,75$; e) $h/Dt=1,0$.

Para cortinas maiores ($h/Dt \geq 0,0$) o comportamento é parecido, tendo maiores valores de $N_{máx}$ na cortina quando a mesma está na posição mais próxima do túnel ($d/Dt=0,75$) e quanto maior for a cortina. Este fato está relacionado com o maior peso próprio nas cortinas mais profundas. Este valor decresce quando a cortina se afasta do túnel e aumenta ao longo do processo de consolidação. Este facto está relacionado com o menor valor dos assentamentos para zonas mais afastadas do túnel, o que implica existirem também menores tensões tangenciais transmitidas à cortina durante a consolidação. O aumento de $N_{máx}$ com o tempo está relacionado com o aumento do atrito negativo mobilizado na cortina. O maior valor regista-se para a cortina mais profunda ($h/Dt=1,0$) e com menor afastamento ($d/Dt=0,75$) sendo de 1084kN/m no final da consolidação, o que representa um aumento de quase 100% comparativamente ao valor no final da construção (551kN/m).

Conclui-se que, de forma geral, se chega a maiores valores de $N_{máx}$ quando a cortina se encontra mais próxima ao túnel e quanto maior a sua altura. O valor de $N_{máx}$ também é crescente com o tempo atingindo os maiores valores no final da consolidação, com este comportamento a estar relacionado com o perfil de assentamentos do maciço.

A evolução ao longo do tempo da influência do afastamento da cortina, em relação ao túnel, no valor do momento fletor máximo absoluto $M_{máx,abs} = |M_{máx}; M_{mín}|$ atuante na mesma, pode ser avaliada na Figura 4.10 para diferentes profundidades da cortina. É de se notar que existe uma tendência generalizada de aumento de $M_{máx,abs}$ com o aumento da profundidade da cortina, independentemente do instante de tempo analisado, embora estes valores sejam muito aproximados quando $h/Dt \geq 0,5$. Também de forma geral, os valores de $M_{máx,abs}$ têm um comportamento decrescente com o afastamento da cortina em relação ao túnel, com exceção da curva que representa o final da consolidação.

Em relação à evolução deste esforço ao longo do tempo, os valores máximos junto à cortina são atingidos após a construção, tendendo a reduzir com o tempo de consolidação. Para $d/Dt \geq 1,0$ esses valores máximos passam a ser atingidos no final da consolidação, não havendo uma tendência nítida de evolução com o tempo para os instantes anteriores. O maior valor, atingido no final da consolidação, tinha sido já observado para o caso de referência ($d/Dt=1,25$ e $h/Dt=0,5$), conforme apresentado na Figura 3.19. Contudo, os valores no final da consolidação para as cortinas mais afastadas são inferiores aos máximos atingidos junto ao túnel após a construção, exceto no caso da cortina posicionada ao nível do coroamento. Face ao exposto, o maior valor deste esforço obtido no conjunto das análises efetuadas é atingido após a construção, para a cortina na posição $d/Dt=0,75$ e $h/Dt=1,0$, com $M_{máx,abs}=261\text{kNm/m}$.

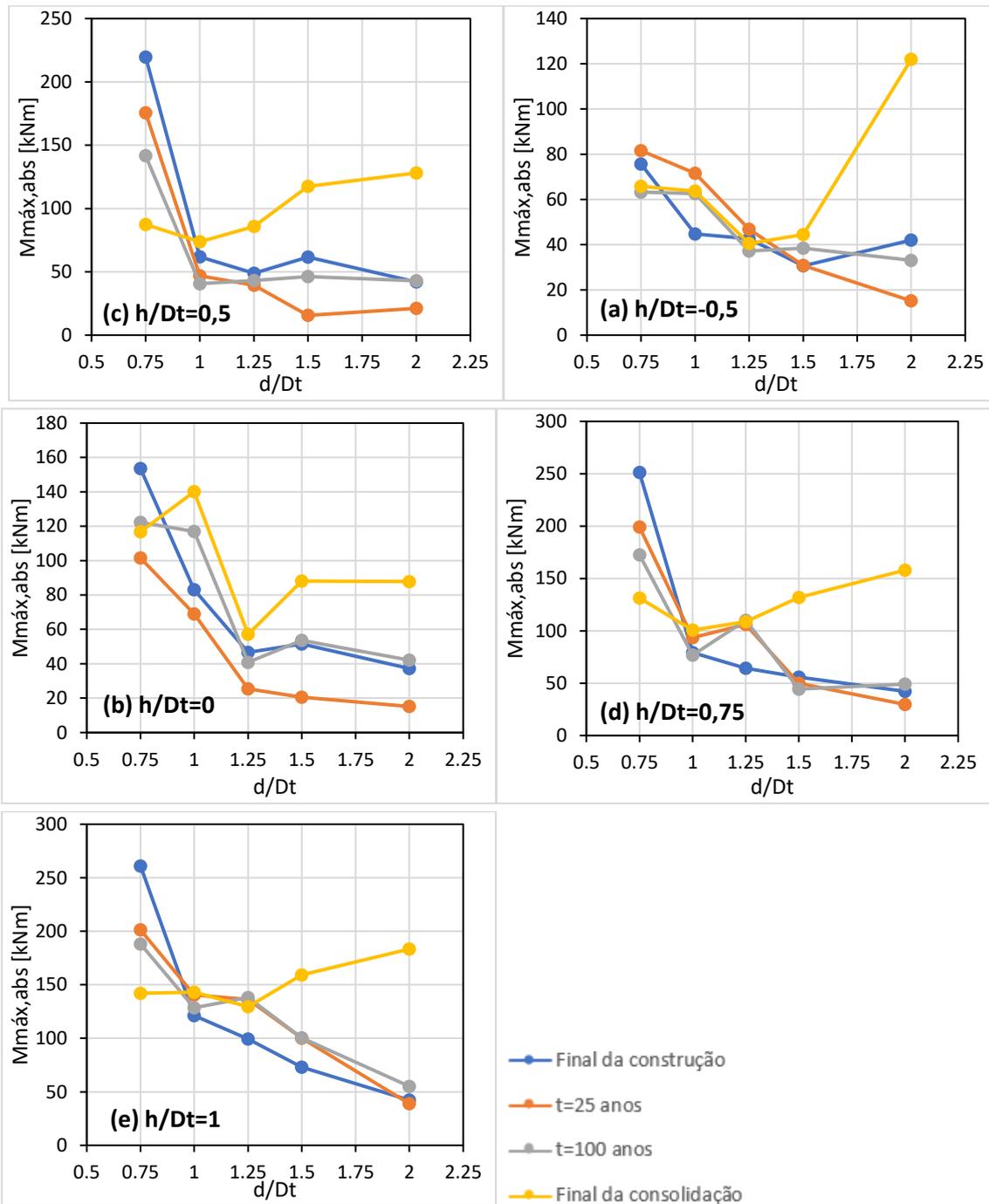


Figura 4.10 – Influência do afastamento da cortina no momento fletor máximo absoluto da cortina para diferentes instantes de tempo e profundidades: a) $h/Dt = -0,5$; b) $h/Dt = 0,0$; c) $h/Dt = 0,5$; d) $h/Dt = 0,75$; e) $h/Dt = 1,0$.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Neste trabalho foi estudado, ao longo do processo de consolidação de um maciço argiloso, a influência de uma cortina previamente instalada adjacente à escavação de um túnel para mitigar os assentamentos e o volume da bacia de subsidência. O impacto da cortina nos esforços no suporte do túnel e na própria cortina também foram investigados.

Este estudo teve como base as características geométricas do caso da Secção 63 da Linha Verde do Metro de Lisboa, assumindo que todo o maciço é constituído unicamente pela camada de aluviões aí presente. A investigação foi feita a partir de análises numéricas pelo método dos elementos finitos, em condição de deformação plana (2D). Foi feita uma análise inicial mais aprofundada comparando os resultados para uma posição específica da cortina (modelo de referência) com os obtidos em campo livre (sem cortina), no qual se chegou à conclusão de que a presença da cortina tinha uma grande influência nas pressões intersticiais e da evolução do nível freático atrás e à frente da cortina ao longo do tempo. Esta análise foi efetuada com recurso a parâmetros de eficiência local, para os assentamentos imediatamente atrás da cortina, e de eficiência global, para o volume global da bacia e para o volume da bacia por trás da cortina. Em seguida realizou-se uma análise paramétrica para avaliar a influência da distância e da altura da cortina na redução dos assentamentos e da bacia de subsidência, ao longo do tempo, assim como avaliar a influência destes parâmetros nos esforços máximos nos elementos estruturais.

É importante salientar que o comportamento temporal da eficiência da cortina em mitigar os deslocamentos induzidos pelo túnel podem ter relação com a variação da diferença das pressões intersticiais e do nível freático em ambos os lados da mesma. Fazendo com que para uma maior diferença nestes até o final de 25 anos fez com que a cortina chegasse ao pico de suas eficiências, e na medida que a diferença estas variações estabilizaram a cortina tendeu a ser menos eficaz. Outro fator que pôde ser associado ao desempenho da cortina ao longo prazo é a ineficácia que a mesma apresentou a partir do intervalo de tempo de 25 anos em mitigar os deslocamentos horizontais do maciço.

Relativamente à influência da profundidade e do afastamento da cortina, resumem-se as seguintes conclusões:

- Na eficiência global: A cortina parece ter efeito positivo quando a sua profundidade está ao mesmo nível da soleira do túnel ou abaixo, aumentando com a profundidade da mesma. Cortinas com menor profundidade têm efeito negativo ou desprezável. A eficiência apresenta um pico ao fim de 25 anos do final da construção a partir do qual diminui, de forma geral, até se concluir consolidação. Se observou para este caso de estudo específico, que independente da profundidade da cortina, quando a mesma está localizada a $d/Dt=0,75$, a situação a curto prazo tem sempre efeito negativo.
- Na eficiência global por trás da cortina: O efeito da cortina na eficiência global atrás, assim como na eficiência global, apresenta efeito positivo significativo para cortinas com o pé situado no nível da soleira ou abaixo, crescendo a eficiência com a aproximação ao túnel e com a altura da cortina. Em relação ao efeito do tempo, no geral, se tem uma melhoria na eficiência até se atingirem 25 anos, onde se verifica um pico, havendo posteriormente uma redução até o final da consolidação, com exceção de quando a cortina está posicionada a uma distância maior que 1,5 diâmetros.
- Na eficiência local: Cortinas cuja base está no nível do coroamento do túnel têm um efeito prejudicial ou negligenciável. Para cortinas com $h/Dt=0,0$, ao nível do eixo do túnel, o efeito é desfavorável a curto prazo para uma distância menor que 1,25 diâmetros. Por outro lado, cortinas com profundidade abaixo do eixo do túnel tem efeito positivo, sendo este tanto maior quando mais comprida for a cortina. Globalmente os valores da eficiência local apresentam um pico aos 25 anos, a partir do qual existe uma diminuição da eficiência.
- Nos esforços no suporte do túnel: O efeito da cortina nos esforços axiais do suporte do túnel é negligenciável, independente da altura e proximidade da cortina ao túnel, tendo uma variação de redução inferior a 6% ao fim de 25 anos, sendo constante a partir daí. O impacto da cortina nos momentos fletores máximo e mínimo parece aumentar com a proximidade da mesma em relação ao túnel, reduzindo a magnitude deste esforço até 32% ($h/Dt=1,0$). Notou-se também que este impacto aumenta com a altura da cortina, tendo seus picos ao fim de 25 anos, havendo posteriormente uma diminuição até o final da consolidação.
- Nos esforços na cortina: Numa forma geral o esforço axial máximo da cortina tende a ser maior, quanto maior for a cortina e reduz-se na medida que a mesma se afasta do túnel, apresentando os valores máximos no final da consolidação. Em relação aos valores máximos absolutos dos momentos fletores, estes também tendem a ser tanto

maiores quanto maior for a cortina e maior o afastamento, com os valores máximos atingidos no final da construção. A exceção ocorre para o final da consolidação e para as cortinas mais afastadas, nas quais os momentos fletores tendem a aumentar com o afastamento da cortina.

5.2. Trabalhos futuros

As seguintes sugestões podem ser levadas em conta para a realização de novos trabalhos no qual se analisam os benefícios da utilização de uma cortina a longo prazo:

- Influência da utilização da cortina e da mitigação dos assentamentos na categorização de risco de danos em edifícios, na qual se pode avaliar como o impacto dessa mitigação de assentamentos resultante da utilização da cortina pode efetivamente reduzir danos em edifícios localizados a superfície.
- Verificação dos impactos, ao longo prazo, na eficiência da cortina considerando diferentes valores da rigidez da cortina e do fator de alívio na escavação do túnel. Procurar perceber se o impacto destes parâmetros tem influência significativa ao longo da consolidação de um maciço.
- Estudo da eficiência para diferentes inclinações da cortina. Avaliar se o efeito da inclinação da cortina tem algum impacto na mitigação dos assentamentos e alteração da bacia de subsidência e na consolidação do maciço, alterando o caminho de percolação atrás da mesma.
- Análise do problema a partir de modelos numéricos com modelos constitutivos mais sofisticados, podendo assim determinar os parâmetros mais determinantes nos resultados.
- Impacto da permeabilidade do suporte do túnel nos assentamentos induzidos pela escavação do túnel, no qual se analisaria como este parâmetro pode influenciar as eficiências da cortina.
- Utilização de uma cortinas contínuas e descontínuas permeáveis, compostas por diferentes materiais, como fronteira drenante no maciço. Verificar qual seria o efeito nas eficiências e na diferença de pressões intersticiais e do nível freático em ambos os lados da cortina.

BIBLIOGRAFIA

- Addenbrook, T., Potts, D., & Puzrin, A. M. (1997). The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction. *Géotechnique* 47(3), 693-712.
- Almeida e Sousa, J. (1998). Túneis em Maciços Terrosos. Comportamento e Modelação Numérica. *Tese de Doutoramento em Ciências de Engenharia – Especialidade de Fundações e Geotecnia*. Especialidade de Fundações e Geotecnia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Almeida e Sousa, J. (2020). *Apontamentos das aulas de túneis do DEC-FCTUC*.
- Alves Costa, Pedro (2005) Escavações escoradas em solos argilosos moles: análise do comportamento considerando os efeitos da consolidação. Tese de Mestrado em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. FEUP
- Amaral, M. J. (2006). Análise dos resultados de observação dos túneis do metropolitano de Lisboa. *Master's thesis*. University of Porto.
- Attwell, P., & Selby, A. (1989). Large Ground Movements and Structural Implications. Tunneling in Compressible Soils. In *Tunneling and Underground Space Technology* (p. 4).
- Attwell, P., Yeates, J., & Selby, A. (1986). *Soil movements induced by tunnelling and their effects on pipelines and structures*. Blackie and Son, London.
- Bai, Y., Yang, Z., & Jiang, Z. (2014). Key protection techniques adopted and analysis of influence on adjacent buildings due to the Bund Tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, pp. 24-34.
- Billotta, E., & Russo, G. (2011). Use of a Line of Piles to Prevent Damages Induced by Tunnel Excavation. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 254-262.
- Bilotta, E. (2008). Use of diaphragm walls to mitigate ground movements induced by tunnelling. In *Géotechnique*, 58 (pp. 143-155).
- Bilotta, E., & Taylor, R. (2005). Centrifuge modelling of tunnelling close to a diaphragm wall. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 5 (1), 27-41.
- Burland, J. (1995). Assessment of risk of damage to buildings due to tunnelling and excavation. *1st Int. Conf. on Earthquake Geotechnical*, (pp. 1189-1201). IS-Tokyo.
- Burnland, J. B., Standing, J. R., & Jardine, F. M. (2008). *Building response to tunnelling: case studies from construction of the Jubilee Line Extension, London*. Thomas Telford.
- Chapman, D. N., Metje, N., & Stark, A. (2017). *Introduction to tunnel construction*. CRC Press.
- Chen, X., Liu, Y., Cao, W., & He, Z. (1998). Protection for the former observatory during construction of the Yan An Dong Lu Tunnel. *Tunnels and Metropolises, Rotterdam*, pp. 1083-1088.

-
- Di Mariano, A., Gesto, J., Gens, A. & Schwarz, H. (2007) Ground deformation and mitigating measures associated with the excavation of a new Metro line. In Proceedings of the Proc. XIV European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE, pp. 1901-1906.
- Fantera, L., Rampello, S., & Masini, L. (2016). A mitigation technique to reduce ground settlements induced by tunnelling using diaphragm walls. *VI Italian of reaserchers in Geotechnical Engeneering - Geotechnical Engineering in Multidisciplinary Research: From Microscale to Regional Scale, CNRIG2016* (pp. 254-259). Roma: Elsevier.
- Frischmann, W. W., Hellings, J. E., Gittoes, G., & Snowden, C. (1994). Protection of the Mansion House against damage caused by ground movements due to tunnelling for the Docklands Light Railway extension. *Proc. Inst. Civ. Engrs., Geotech. Engg.* 107, 65-76.
- Gens, A., Di Mariano, A., Gesto, J., & Schwartz, H. (2006). Ground movement control in the construction of a new metro line in Barcellona In: Bakker, K.J., Bezuijen, A., Broere, W., Kwast, E.A. (Eds.). *Proceedings of the 5th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* 389-395. London: Taylor and Francis.
- Harris, D., Mair, R., Burland, J., & Standing, J. (1999). Compensation grouting to control tilt of Big Ben Clock Tower. *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, pp. 225-232.
- Hejazi, Y., Dias, D., & Kastner, R. (2008). Impact of constitutive models on the numerical analysis of underground constructions. *Acta Geotechnica*, 3 (4), pp. 251-528.
- Katzenbach, R., Leppla, S., Vogler, M., Seip, M., & Kurze, S. (2013). Soil-structure-interaction of tunnels and superstructures during construction and service time. *Procedia Engineering*, 57, pp. 35-44.
- Ledesma Villalba, A., & Alonso Pérez de Agreda, E. (2017). Protecting sensitive constructions from tunnelling: the case of World Heritage buildings in Barcelona. *Géotechnique*, 67(10), (pp. 914-925).
- Lopes, M., Almeida e Sousa, J., & Oliveira, P. V. (2005). Efeito da permeabilidade relativa solo/suporte no comportamento diferido de um túnel superficial. Atas das 2ª Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia, Lisboa.
- Lopes, M., Almeida e Sousa, J., & Oliveira, P. V. (2010). Time-Dependent Behaviour of a Shallow Tunnel in Overconsolidated Clay. *Soils and Rocks*, 33(3), pp. 159-170. São Paulo.
- Mair, R. J. (1997b). Bored tunnelling in the urban environment. *Proceedings of the Proceedings of 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (pp. 2353-2385). London.

-
- Mair, R. J., & Taylor, R. N. (1993). Prediction of clay behaviour around tunnels using plasticity solutions. *Proc. Wroth Memorial Symposium* pp. 449-463. Oxford 1992: Thomas Telford.
- Mair, R., & Taylor, R. (1996). Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground: Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. London, UK: AA Balkema.
- Mair, R., & Taylor, R. (1997a). Theme lecture: Bored tunnelling in the urban environment. *Proceedings of the Proceedings of the fourteenth international conference on soil mechanics and foundation engineering*, (pp. 2353-2385). Rotterdam.
- Mair, R., Harris, D., Love, J., Blakey, D., & Kettle, C. (1994). "Compensation grouting to limit settlements during tunnelling at Waterloo Station, London" *Tunnelling'94, Springer*, (pp. 279-300).
- Massicano, D. (2020). Avaliação da eficiência de cortinas para mitigação das deformações no maciço induzidas por túneis, Master's Thesis. Coimbra: Universidade de Coimbra.
- Mateus de Brito, J. M., & Matos Fernandes, M. (2006). Estação Terreiro do Paço do Metropolitano de Lisboa: concepção, previsões de projecto e desempenho. *Proceedings of the III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia*, Lisboa, Portugal. pp. 21-42.
- New, B., & Bowers, K. (1994). Ground movement model validation at the Heathrow Express Trial Tunnel. *Tunnelling 94, Proc. 7th Int. Symp. of Inst. of Mining and Metallurgy and British Tunnelling Society*, (pp. 310-329). London.
- Oliveira, P. V., Lopes, M., & Almeida e Sousa, J. (2002). *Evolução no tempo das deformações induzidas pela escavação de um túnel superficial*. Anais do 1º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, São Paulo, Brasil.
- O'Reilly, M. P., and New, B. M. 1982. "Settlement above tunnels in the United Kingdom—Their magnitude and prediction." *Tunnelling '82*, London Institute of Mining and Metallurgy, 173–181. British Tunnelling Society, 2004. Tunnel lining design guide. Thomas Telford.
- Oteo, C., de la Fuente, P., & de Assis, S. (2007). Jet-grouting walls as protection to the buildings near urban tunnels. Geotechnical Eng. in Urban Environments. *Proc., 14th, ECSMGE*, 3, (pp. 1504-1508).
- Peck, R. B. (1969). Deep excavations and tunneling in soft ground. *Proc. 7th ICSMFE*, (pp. 225-290). Mexico City.
- Pedro, A. M. (2013). *Geotechnical Investigation of Ivens Shaft in Lisbon*. PhD thesis, Imperial College London.
- Pedro, A. M., Grazina, J. C., & Massicano, D. W. (2021). Embedded walls as a measure to mitigate the ground deformations at Section 63 of Lisbon Metro, Portugal. *Proceedings*

- of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.* Sydney.
- Potts, D. M. (2001). The effect of tunnel construction on adjacent structures and services. *Curso sobre Túneis em Meios Urbanos, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.*
- Quick, H., Michael, J., & Arslan, U. (2001). About the effect of preliminary measures on ground movements due to tunnelling. *Response of Building to Excavation-Induced Ground Movements, London, 17*, p. 18.
- Rampello, S., Fantera, L., & Masini, L. (2019). Efficiency of embedded barriers to mitigate tunnelling effects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 89, (pp. 109-124).
- Rocscience. (2021). Retrieved from <https://www.rocscience.com/RS2>
- Salgueiro Amaral, M. J. (2006, Setembro). Análise dos Resultados de Observações dos Túneis do Metropolitano de Lisboa. *Master's Thesis.* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Schimdt, B. (1989). Consolidation settlements due to soft ground tunnelling. *Proc. 12th Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (pp. 797-800). Rio de Janeiro, vol. 2.
- Selby, A. (1999). Tunnelling in soils – ground movements, and damage to buildings in Workington, UK. *Geotechnical and Geological Engineering 17*, 351-371.
- Shirlaw, J. N. (1995). Observed and calculated pore pressures and deformations induced by an earth pressure. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 32, 181-189.
- Simons, N. E., & Som, N. (1970). Settlement of structures on clay: with particular emphasis on London clay. *Construction Industry Research and Information Association.*
- Society, B. T. (2004). *Tunnel lining design guide.* Thomas Telford.
- Sola, P. R., Monroe, A. S., Martin, L., Blanco, M. A., & San Juan, R. (2003). "Ground treatment for tunnel construction on the Madrid Metro". *Grouting and Ground Treatment*, pp. 1518-1533.
- Su, J., & Thomas, A. (2015). Design of sprayed concrete linings in soft ground—a Crossrail perspective. *Crossrail Project: Infrastructure design and construction, 1*, pp. 123-136.
- Telford, T. (2004). Tunnel lining design guide. *British Tunneling Society and the Institution of Civil Engineers.*
- Venda Oliveira, P. (2000). Aterros sobre solos moles – Modelação numérica. *Tese de Doutoramento em Ciências de Engenharia.* Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Ward, W., & Pender, M. (1981). Tunnelling in soil ground. *Proc. 10th INT. Conf. on Soil Mechanics and foundation Engineering*, (pp. 261-275). Stockholm, vol. 4.