Análise diferida no tempo da eficiência de cortinas para mitigação de deformações causadas pela escavação de túneis

Tiago Frizzera Santos
Dep. Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, tiago.frizzera@gmail.com

José C. D. Grazina
Dep. Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, graza@dec.uc.pt

António M. G. Pedro
ISISE, Dep. Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, amgpedro@dec.uc.pt

Jorge Almeida e Sousa
Dep. Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, jas@dec.uc.pt

David M. G. Taborda
Imperial College London, Londres, Reino Unido, d.taborda@imperial.ac.uk

RESUMO: Uma das soluções utilizadas para mitigar as deformações em edifícios associadas à escavação de túneis consiste na utilização de cortinas de proteção, construídas entre os túneis e os edifícios a proteger. O mérito desta solução, de cuja eficácia há evidências em casos de obras, tem sido essencialmente analisado recorrendo a ensaios em centrifugadora e a análises numéricas. Contudo, estes estudos têm-se focado apenas na situação de curto prazo não abordando as situações em que as deformações são diferidas no tempo, como é o caso de túneis escavados em maciços argilosos saturados. Neste artigo é apresentado o estudo da evolução, ao longo do tempo, da eficiência de uma cortina impermeável para mitigar as deformações causadas pela escavação de um túnel num maciço sujeito a um processo de consolidação. Foram efetuadas análises numéricas por elementos finitos, com recurso a modelos 2D, considerando o comportamento acoplado para atender ao efeito da consolidação. O modelo simplificado foi estabelecido tendo como referência a geometria e as condições geotécnicas prevalecentes no túnel da secção transversal P10A do Troço 63 da Linha Verde do Metro de Lisboa. Verifica-se que a evolução da eficiência da cortina é muito condicionada pela alteração da posição do nível freático ao longo do tempo. É também avaliado o efeito da consolidação e impacto da cortina nos esforços no suporte do túnel para diversos instantes temporais.

PALAVRAS-CHAVE: Túneis, Cortinas, Consolidação, Elementos Finitos.

ABSTRACT: One of the typical measures employed to mitigate the settlements in buildings due to tunnelling consists of the execution of embedded walls located between the tunnel and the buildings. The merit of this solution has been mainly assessed through centrifuge testing and numerical analyses, although there is evidence of its efficiency in real cases. However, most of these studies focus on the short-term behaviour and do not assess scenarios where time-dependent settlements occur, as in saturated clayey deposits. In this paper, a study on the evolution with time of the efficiency of an impermeable embedded wall designed to mitigate tunnelling-induced deformations in a soil subjected to a consolidation process is presented. For that purpose, 2D coupled-consolidation numerical analysis using the finite element method were employed. The simplified numerical model was established having as reference the geometry and geotechnical conditions observed in the cross-section P10A of the Section 63 of the Green Line of the Lisbon Metro. The results show that the efficiency of the embedded wall is considerably affected by the variation with time of the position of the water table. The influence of the consolidation process and of the presence of the wall on the lining forces of the tunnel for different consolidation times is also assessed.

KEYWORDS: Tunnels; Embedded Walls; Consolidation; Numerical analysis

1 Introdução

A construção de túneis está inevitavelmente associada a movimentos do terreno devido à descompressão do maciço induzida pela escavação. Estes movimentos ocorrem a curto prazo no caso de maciços granulares, com elevada permeabilidade, enquanto em maciços com baixa permeabilidade, em consequência do processo de consolidação que tem lugar, eles podem perdurar muito depois de terminada a obra (Shen et al., 2014), ao mesmo tempo que ocorrerá uma variação dos esforços mobilizados no suporte do túnel.

De acordo com Lopes Laranjo et al. (2010), no caso de maciços constituídos por argilas com grau de sobreconsolidação elevado existe uma componente adicional 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, pois estão presentes os efeitos contraditórios associados ao decréscimo da tensão normal média e à variação da tensão de corte na geração do excesso de pressão intersticial, podendo este ser negativo ou positivo a curto prazo. Também em maciços sujeitos a processo de consolidação, a permeabilidade do túnel pode ser determinante, conforme constatado por Lopes Laranjo et al. (2010). Quando o suporte é impermeável as condições de equilíbrio hidrostático iniciais tendem a ser repostas com o tempo. Já quando o suporte é permeável, o processo evolui para o estabelecimento de um regime estacionário de percolação, com o túnel a funcionar como um dreno, com a consequente redução dos níveis freáticos (n.f.) e existência de efeitos de consolidação mais acentuados, o que se traduz num aumento dos assentamentos na superfície.

Os movimentos, nomeadamente os assentamentos à superfície do terreno, tendem a ser mais impactantes em situações de túneis superficiais em meios urbanos densamente edificados. Nestes casos, a preservação dos edifícios e infraestruturas existentes nas proximidades pode requerer a utilização de medidas para mitigação daqueles movimentos. Harris (2001) separa estas medidas em três categorias – aplicadas no interior do túnel, tratamento do maciço e reforço estrutural – dando exemplos da sua aplicação na proteção dos edifícios próximos às obras de escavação da *Jubilee Line Extension*, em Londres. Numa primeira abordagem deverão ser adotadas técnicas no processo construtivo a partir do interior do túnel, que reduzam as deformações no contorno da escavação (ex: escavação faseada, introdução de reforços periféricos ou na frente de escavação, redução do comprimento não suportado ou do intervalo de tempo até à colocação do suporte). Quando estas medidas se revelam insuficientes, é necessário recorrer a medidas adicionais para mitigação das deformações. Nestes casos é comum recorrer-se a técnicas de melhoramento e reforço dos maciços, mais intrusivas e habitualmente com custos mais elevados, sendo as mais frequentemente utilizadas o jet-grouting, as injeções de impermeabilização e de compensação ou a instalação de cortinas de proteção. Também em situações em que haja a necessidade de preservar edifícios com valor histórico ou mais sensíveis a deformações do terreno, podem utilizar-se técnicas de reforço estrutural das suas fundações.

A execução de uma cortina antes da escavação do túnel confere uma barreira protetora que separa a zona da escavação da zona do maciço que se pretende preservar. Habitualmente utilizam-se alinhamentos de estacas moldadas (Bai et al., 2014; Ledesma & Alonso, 2017), de microestacas ou de estacas raiz (Chen et al., 1998; Nikiforova & Vnukov, 2012), bem como colunas de jet-grouting (Di Mariano et al., 2007; Zhang et al., 2013). Segundo Rampello et al. (2019), a instalação de estacas moldadas ou de microestacas tem pouco impacto nas estruturas próximas, enquanto as colunas de jet-grouting, devido às elevadas pressões na sua execução, podem originar movimentos significativos nas estruturas (Gens et al., 2005; Di Mariano et al., 2007; Oteo et al., 2007).

A eficácia da utilização de cortinas tem sido evidenciada em diversos casos de obra, com reduções dos assentamentos que podem atingir 60 a 90% na zona posterior das cortinas (Bai et al., 2014; Di Mariano et al., 2007; Oteo et al., 2007). O estudo detalhado sobre o assunto tem sido sobretudo efetuado recorrendo à modelação física em centrifugadora (Bilotta & Taylor, 2005) e a análises numéricas (Bilotta, 2008; Rampello et al., 2019; Massicano, 2020). Nesses estudos tem sido analisada a influência de certos parâmetros na redução dos assentamentos, nomeadamente a posição da cortina em relação ao túnel (afastamento e profundidade) bem como a sua rugosidade e rigidez. A eficácia desta medida mitigadora pode ser avaliada, de acordo com a proposta de Bilotta (2008), através da denominada eficiência local, η_l, que compara os assentamentos imediatamente atrás da cortina, $\delta_{v,w}$, com os que existiriam no mesmo local na situação sem cortina (campo livre), $\delta_{v,ref}$ (Eq. 1). De forma análoga, para uma análise mais abrangente, Massicano (2020) sugere a utilização da denominada eficiência global, η_g (Eq. 2), que relaciona os volumes da bacia de subsidência para

as situações com cortina, $V_{L,w}$, e de campo livre, $V_{L,ref}$, ambos expressos percentualmente em relação ao volume da escavação. Quando a eficiência local ou global é positiva (com um valor máximo de 1) é benéfica a utilização da cortina, ao contrário do que acontece se o seu valor é nulo ou negativo, casos em que a utilização da cortina é completamente ineficaz ou mesmo contraproducente.

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

$$\eta_g = 1 - \frac{V_{L,w}}{V_{L,ref}} \quad (2)$$

Para ter em consideração situações de evidente assimetria das condições hidráulicas do maciço causadas pela cortina, Pedro et al. (2022) consideram parâmetros de eficiência global calculados separadamente para as bacias à frente da cortina, $\eta_{g,fr}$, e para as bacias atrás da cortina, $\eta_{g,be}$, tendo este último o mesmo significado da eficiência integral definida por Rampello et al. (2019).

Neste artigo é apresentada a análise da evolução, ao longo do tempo, da eficiência de uma cortina de proteção considerada como impermeável para mitigação das deformações causadas pela escavação de um túnel num maciço sujeito a processo de consolidação. O estudo é baseado nas condições geométricas de um caso real, correspondente ao túnel da secção transversal P10A do Troço 63 da Linha Verde do Metro de Lisboa (Salgueiro Amaral, 2006), que liga as estações do Cais do Sodré e da Baixa-Chiado, assumindo-se, por simplificação, que todo o maciço é composto pela camada aluvionar aí presente.

2 Modelação Numérica

As análises numéricas foram efetuadas com recurso ao método dos elementos finitos, utilizando o programa de cálculo geotécnico RS2 (Rocscience, 2021). Foi admitido um estado plano de deformação e considerado o efeito do tempo no processo de consolidação de acordo com a teoria de Biot. Conforme anteriormente referido o modelo numérico utilizado pretendeu reproduzir as condições geométricas de uma secção transversal (P10A) do Troço 63 da Linha Verde do Metro de Lisboa. Assim considerou-se um túnel de secção circular com diâmetro D_t=9,71m e com o eixo a uma profundidade H=16,26m, o que corresponde a um recobrimento C=11,41m (C/D_t=1,17). Embora naquela secção o maciço seja estratificado, foi assumido um perfil do terreno simplificado considerando apenas a camada de solo aluvionar (AL) aí presente, de modo a tornar o estudo mais simples e sem o impacto de uma estratigrafia complexa nos resultados. Foram concebidos dois modelos (Frizzera Santos, 2021): um correspondente à situação de campo livre, sem a cortina, e outro com a cortina localizada a uma distância d=12,14m do eixo do túnel (d/D_t=1,25) e com a base a uma profundidade L=21,11m, coincidente com a cota da soleira do túnel. Ambos os modelos têm largura de 150m e altura de 33m, com o túnel localizado a igual distância das fronteiras laterais (Fig. 1). Na discretização foram utilizados elementos finitos triangulares de 6 pontos nodais para o meio contínuo, com refinamento à superfície e ao redor do túnel e da cortina, e do tipo viga para os elementos estruturais. Para as condições de fronteira foram aplicadas as restrições de deslocamentos usuais neste tipo de análises (Fig. 1), enquanto para as condições hidráulicas foi imposta uma cota piezométrica de 33m nas fronteiras laterais, correspondente à altura do modelo, e um n.f. coincidente com a superfície. Para simular o comportamento do maciço foi adotado um modelo elástico perfeitamente plástico com critério de rotura de Mohr-Coulomb, parametrizado de acordo com os resultados obtidos por Mateus de Brito & Matos Fernandes (2006) para o solo aluvionar de Lisboa (AL) (Tabela 1a). Foi considerada uma espessura do suporte do túnel de 0,36m (Salgueiro Amaral, 2006) enquanto que a espessura adotada para a cortina foi de 0,6m, tendo o comportamento de ambos os elementos estruturais sido assumido como linear elástico com parâmetros de rigidez equivalentes aos de um betão (Tabela 1b). Para atender à perturbação causada pelo processo construtivo da cortina, foi considerado um material na interface entre esta e o solo (AL_{int}) com características de resistência e deformabilidade reduzidas em 33% relativamente às do solo. A cortina foi considerada impermeável e o suporte do túnel como sendo permeável.

O faseamento considerou uma sequência construtiva com cálculos em regime estacionário e em regime transiente, quando dependentes do instante de tempo (t), que se descreve resumidamente: i) Estabelecimento do estado de tensão inicial, para um coeficiente de impulso em repouso K_0=0,5; ii) Ativação dos elementos da cortina e dos elementos de solo na interface (apenas no modelo com cortina); iii) Escavação do túnel (t=1 dia)

assumindo um fator de alívio α=0,35 aplicado às pressões totais; iv) Colocação do suporte (t=2 dias), com a aplicação das pressões das terras remanescentes; v) Sequência de cálculos para diferentes instantes de tempo (t=50 dias, 1, 5, 10, 25, 100 e 250 anos) em regime transiente; vi) Cálculo para o final da consolidação, em regime estacionário. O valor do fator de alívio foi calibrado de forma a fazer coincidir o assentamento máximo do modelo de campo livre com o registado, a curto prazo, pela instrumentação na secção transversal P10A.

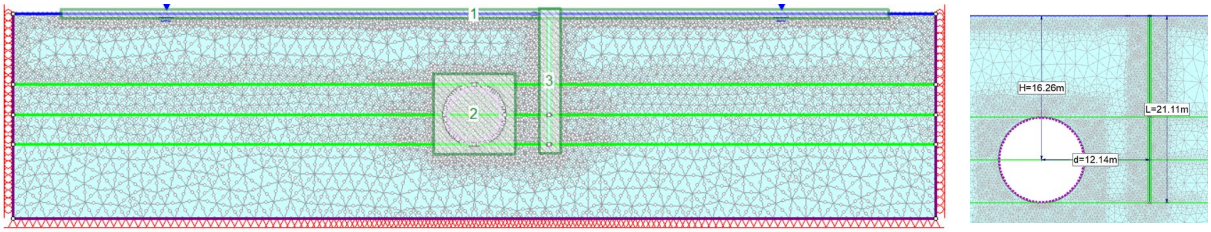


Figura 1. a) Modelo de elementos finitos e b) Pormenor com túnel e cortina.

Tabela 1. Parâmetros utilizados na modelação de: a) materiais geotécnicos; b) elementos estruturais.

a)

Material	γ (kN/m^3)	c' (kPa)	ϕ' (º)	ψ (º)	E'_s (kPa)	ν (-)	k (m/s)
AL	18	5	33	0	6960+612,5.z	0,3	2×10^{-10}
AL$_{int}$	18	3	22	0	4940+408,3.z	0,3	2×10^{-10}

b)

Elemento	γ (kN/m^3)	E (GPa)	ν (-)
Suporte	25	30	0,2
Cortina	25	30	0,2

3 Evolução das Pressões Intersticiais no Maciço

A evolução das pressões intersticiais em campo livre e na presença da cortina impermeável, para uma seleção de instantes de tempo calculados desde a construção do túnel até ao final da consolidação, é apresentada na sequência de imagens da Figura 2. De modo geral, em ambos os modelos observa-se uma descida do n.f., convergente para o túnel, e uma redução das pressões intersticiais ao longo do processo de consolidação. Também se verifica no modelo com a cortina uma evolução assimétrica em ambos os lados do túnel devido à presença da cortina, não havendo, contudo, diferenças significativas ao fim de 5 anos após a construção do túnel. A assimetria passa a ser mais evidente para t=10 anos, principalmente pelo facto de se manterem quase inalteradas as pressões intersticiais e a posição do n.f. na zona posterior da cortina. Apenas para t=25 anos começa a observar-se uma descida das pressões intersticiais e do n.f. atrás da cortina e a ocorrência do maior desnível entre posições do n.f. à frente e atrás da cortina. Este desnível do n.f., assim como a assimetria na distribuição de pressões intersticiais, tendem a atenuar-se com a passagem do tempo e com o estabelecimento de um regime estacionário de percolação, embora ainda continue a ser notória a influência da cortina ao nível das pressões intersticiais e do n.f. no cálculo correspondente ao final da consolidação.

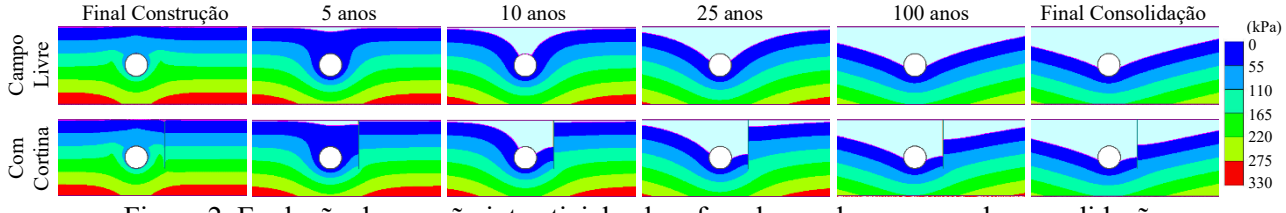


Figura 2. Evolução da pressão intersticial e do n.f. ao longo do processo de consolidação

4 Avaliação do Comportamento da Cortina

4.1 Pressões Hidráulicas e Movimentos da Cortina

A diferente evolução das pressões intersticiais e das posições do n.f. nas duas faces da cortina têm influência no seu desempenho ao longo do processo de consolidação, nomeadamente nos deslocamentos horizontais que lhe são induzidos. Para ilustrar essa relação, a par do diferencial de pressões intersticiais atrás (u_{be}) e à frente da cortina (u_{fr}), é apresentada na Figura 3 a evolução dos deslocamentos horizontais da cortina

e no respetivo perfil vertical no modelo em campo livre. Após a construção, e ainda ao fim de 50 dias, o diferencial de pressões intersticiais é ainda muito ténue, fazendo-se notar apenas ao nível da zona do eixo do túnel (16.26m) devido ao efeito da descompressão causada pela escavação. Com o aumento da diferença do n.f. entre os dois lados da cortina o diferencial de pressões intersticiais tende a aumentar, atingindo o seu pico na zona da profundidade do túnel, cerca de 10 a 25 anos após a sua construção. Com a posterior descida do n.f. atrás da cortina este valor máximo tende a reduzir-se, com o diferencial de pressões intersticiais a localizar-se exclusivamente na zona inferior da cortina. No final da consolidação, quando estabelecido o regime de percolação estacionário, o diferencial de pressões apenas ocorre a partir dos 11 m de profundidade, com um valor máximo de cerca de metade do valor de pico anteriormente observado.

Analisando os deslocamentos horizontais da cortina, verifica-se que até t=1 ano estes são semelhantes aos obtidos em campo livre, com exceção da zona acima dos 5 m de profundidade, onde a cortina confere alguma restrição de movimentos. Para instantes posteriores verifica-se que a cortina passa a ter um movimento de rotação de corpo rígido com valores crescentes até t=10 anos. Este movimento está associado ao diferencial crescente de pressões intersticiais entre as duas faces da cortina, com maiores valores na sua face posterior, que abaixo dos 2m induzem deslocamentos no sentido do túnel superiores aos determinados em campo livre. Com o evoluir do processo de consolidação existe um retrocesso dos deslocamentos horizontais em campo livre que se manifesta igualmente na cortina mantendo-se, contudo, um padrão de deslocamentos com maiores valores na parte inferior da cortina em relação aos de campo livre.

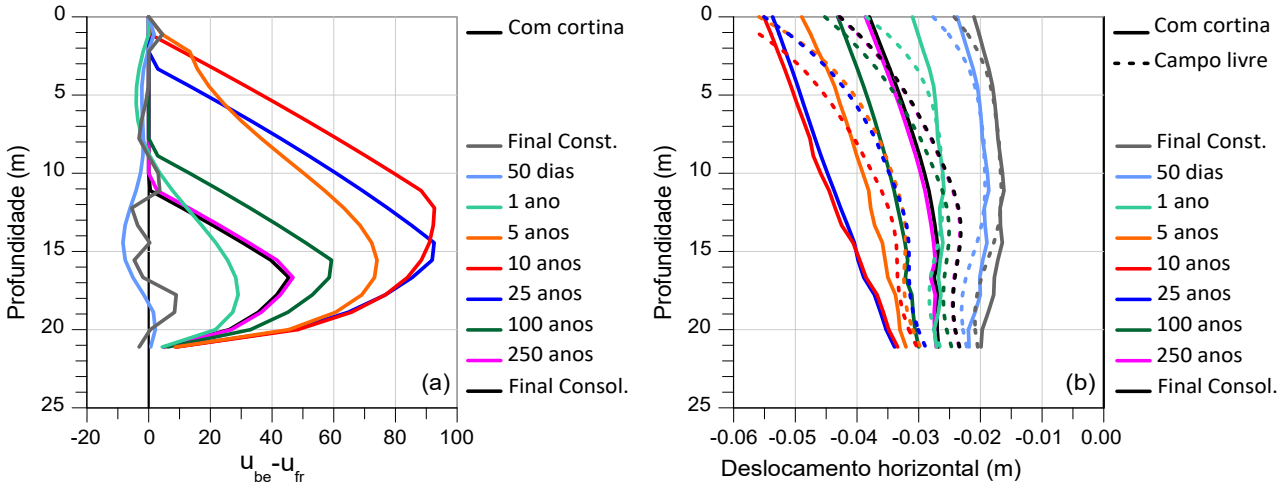


Figura 3. a) Evolução da diferença de pressões intersticiais na frente e atrás da cortina; b) Evolução dos deslocamentos horizontais da cortina.

4.2 Eficiências Global e Local

A influência da presença da cortina na forma da bacia de subsidência está bem patente na Figura 4a), onde se observa que esta restringe significativamente os assentamentos na zona posterior do maciço. Esta influência vai diminuindo com o afastamento à cortina, embora seja ainda visível a uma distância de 20 a 30m. Verifica-se que o movimento de retrocesso da cortina para t>10 anos origina um empolamento na zona da bacia adjacente ao tardoz, fazendo com que o assentamento máximo passe a ocorrer a uma certa distância da cortina, que tende a aumentar com aquele movimento e com o processo de consolidação. Na frente da cortina existe também uma redução dos assentamentos até ao alinhamento vertical do eixo do túnel, com as bacias em campo livre ou com cortina a serem praticamente coincidentes para além desta distância. Na Figura 4b) representam-se as evoluções com o tempo do volume global da bacia de subsidência, V_L, e das respetivas parcelas à frente, $V_{L,fr}$, e atrás da cortina, $V_{L,be}$, para os cálculos de campo livre e com cortina. Pelas curvas representadas constata-se que os volumes das bacias aumentam ao longo do processo de consolidação até aproximadamente t=250 anos, independentemente da presença da cortina, momento a partir do qual passam a ser praticamente constantes. Também é possível observar que as curvas do volume na frente da cortina são quase justapostas para ambos os cálculos, denotando uma influência reduzida da cortina nesta zona do maciço

e que a redução do volume global, ao longo de todo o processo de consolidação, se deve quase sobretudo à redução do volume atrás da cortina, algo que já era percetível na Figura 4a).

A evolução da eficiência global e das respetivas componentes à frente e atrás da cortina, representadas na Figura 5a), são igualmente reveladoras da eficácia da cortina na redução da bacia na zona posterior do maciço, com $\eta_{g,be}$ a atingir um valor de pico de 0,22 ao fim de 25 anos, enquanto na frente da cortina esse pico não chega a $\eta_{g,fr}$=0,04. Após uma ligeira descida inicial de $\eta_{g,be}$, a eficiência começa a aumentar a partir de t=1 ano. Este aumento inicial deve-se mais à capacidade da cortina em restringir os movimentos horizontais do maciço, conforme se constata na Figura 3b), do que ao efeito retardado da descida do n.f.. Contudo, para os instantes de tempo subsequentes e até t=25 anos, a descida retardada do n.f. atrás da cortina é o fator preponderante para o aumento da eficiência, face aos maiores deslocamentos da cortina do que os observados em campo livre neste período. Após este instante e até t=250 anos, com a descida do n.f. atrás da cortina e a sua aproximação à posição em campo livre, a eficiência reduz-se para $\eta_{g,be}$=0,1, valor que se mantém constante até ao final da consolidação. Embora haja um padrão semelhante na variação de $\eta_{g,fr}$, a magnitude de valores é bastante mais reduzida, o que se reflete numa evolução de valores intermédia quando analisada a eficiência global de toda a bacia, η_g. A eficiência local foi determinada para o perfil vertical onde ocorre o máximo assentamento no tardoz da cortina sendo, portanto, representativo do valor mínimo desta eficiência, $\eta_{l,min}$. No período até t=1 ano tem-se um valor aproximadamente constante de $\eta_{l,min}$>0,31, após o qual a eficiência local mínima aumenta até t=10 anos onde se obtém um valor de pico, de $\eta_{l,min}$=0,36. Tal como observado para η_g, segue-se de uma descida acentuada da eficiência local mínima para valores próximos de 0,12 para t=250 anos e que se mantém aproximadamente constante até ao final da consolidação.

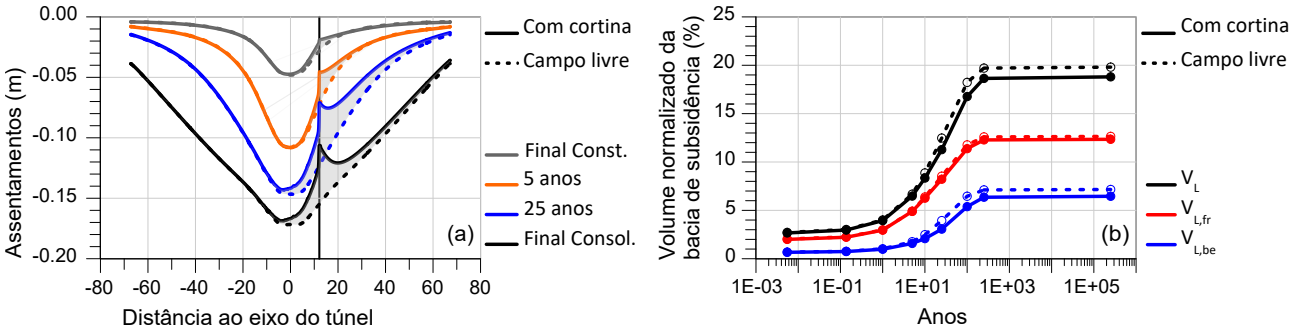


Figura 4. a) Bacias de subsidência; b) Evolução das perdas de volume.

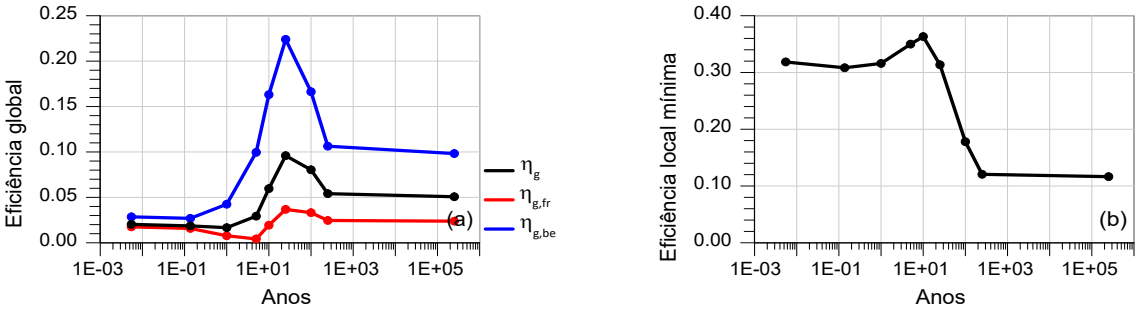


Figura 5. Evolução temporal: a) eficiência global; b) eficiência local mínima.

4.3 Evolução dos Esforços na Suporte do Túnel

Os diagramas de esforços axiais no contorno do suporte do túnel para o cálculo de campo livre, N_{ref}, e os acréscimos para o cálculo com cortina, ($\Delta N=N_w-N_{ref}$), estão representados, respetivamente, na Figura 6a.1) e 6a.2) para diversos instantes de tempo; na Figura 6b.1) e 6b.2) representam-se os diagramas homólogos para os momentos fletores. Analisando os resultados para campo livre verifica-se que, após a construção, os esforços axiais são maiores na metade inferior do suporte, com N_{ref}≈800 kN/m, e menores na zona do coroamento (≈570 kN/m). Durante o processo de consolidação os esforços axiais tendem a aumentar

consideravelmente nos hasteais (1010 kNm/m) e a diminuir na soleira (600 kNm/m) e no coroamento (440 kNm/m). Quanto aos momentos fletores em campo livre, M_{ref}, verificam-se valores reduzidos, entre ≈-60 (hasteais) a ≈50 kNm/m (coroamento e soleira), e com uma distribuição compatível com um achatamento do suporte (expectável, pois K_0<1). Estes valores tendem a ser ampliados com o tempo, atingindo cerca de ±220 kNm/m para t=100 anos, associados a um maior pronunciamento da configuração achatada do suporte.

Nos cálculos com cortina, após a construção, os valores de ambos os esforços são muito semelhantes aos existentes em campo livre, com diferenças máximas de ΔN=±5 kN/m e de ΔM=±5 kNm/m. Posteriormente, com a evolução da consolidação, embora os esforços axiais aumentem com um padrão semelhante ao observado em campo livre, esse aumento é mais reduzido entre a soleira e o hasteal interior (próximo da cortina), com uma diferença máxima que chega a cerca de -40 kN/m para t=100 anos. Relativamente aos momentos fletores, a presença da cortina provoca um ligeiro aumento deste esforço embora com magnitude nunca superior a ±20 kNm/m, pelo que o padrão de evolução dos momentos fletores com a consolidação é igualmente semelhante ao existente em campo livre. Face a estes resultados, conclui-se que as variações nos esforços no túnel devido à presença da cortina são pouco significativas quando comparadas com a sua magnitude em campo livre.

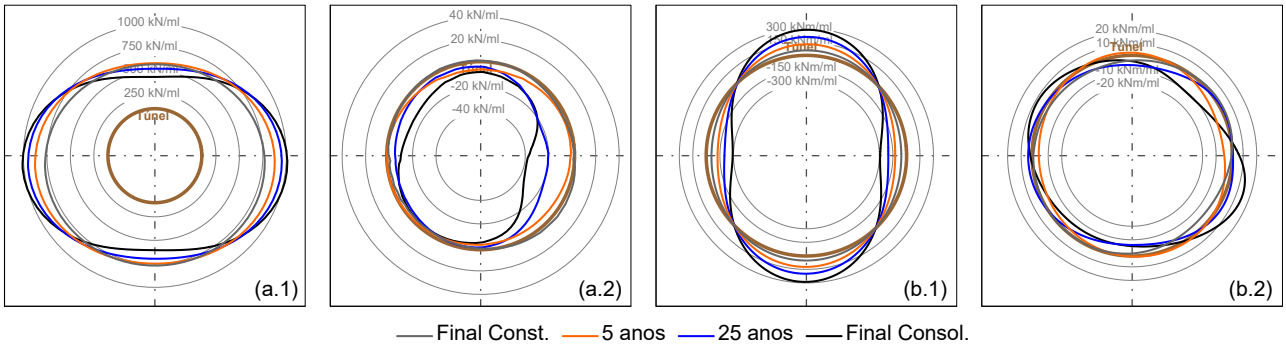


Figura 6. Evolução temporal dos esforços no suporte: a) Esforços axiais; b) Momentos fletores.

5 Conclusões

Neste artigo são apresentados resultados de cálculos numéricos com o objetivo de avaliar a eficácia, ao longo do tempo, de uma cortina impermeável na mitigação dos assentamentos causados pela escavação de um túnel num maciço aluvionar. As principais conclusões deste estudo são as seguintes:

- A presença da cortina impermeável tem grande influência na distribuição das pressões intersticiais na zona posterior do maciço, retardando aí a descida do n.f. e consequentemente a evolução dos assentamentos; por sua vez, à frente da cortina, a sua influência estende-se apenas até ao eixo do túnel;

- A diferente evolução do n.f. à frente e atrás da cortina, com o diferencial de pressões intersticiais que lhe está associado, vai originar deslocamentos horizontais da cortina superiores aos que existiriam em campo livre no mesmo perfil vertical da posição da cortina;

- Ambas as eficiências global, η_g, e local mínima, $\eta_{l,min}$, aumentam significativamente 1 ano após a construção do túnel e atingem o seu pico aproximadamente ao fim de 25 e de 10 anos, respetivamente, a partir do qual diminuem até 250 anos após a construção, permanecendo a partir desse instante praticamente inalteradas até ao final da consolidação. O aumento da eficiência está relacionado com a descida retardada do n.f. na zona posterior da cortina durante este período, com a maior diferença entre a posição do n.f. relativamente ao campo livre a ocorrer precisamente no período em que se observa o pico. Com o avanço do processo de consolidação, e o estabelecimento de um regime permanente de percolação, as posições do n.f. com cortina e em campo livre tendem a aproximar-se, o que se reflete na redução das eficiências da cortina. Contudo, os valores de pico de η_g e de $\eta_{l,min}$ atingem 0,10 e 0,36, respetivamente, enquanto os respetivos valores ao fim de 100 anos são ainda de 0,08 e 0,18;

- O processo de consolidação tende a agravar os esforços no suporte, com aumentos em campo livre de 26% nos esforços axiais (hasteais) e de 270% nos momentos fletores. Contudo, a presença da cortina não tem uma influência significativa na evolução dos esforços, com apenas pequenas diferenças observadas quando comparada com os valores obtidos em campo livre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.11.005

Bilotta, E. & Taylor, R. N. (2005) Centrifuge modelling of tunnelling close to a diaphragm wall. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, **5** (1), pp. 27-41. https://doi.org/10.1680/ijpmg.2005.050103

Bilotta, E. (2008) Use of diaphragm walls to mitigate ground movements induced by tunnelling. *Géotechnique*, **58** (2), pp. 143-155. https://doi.org/10.1680/geot.2008.58.2.143

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*, Balkema Rotterdamml, 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.

Frizzera Santos, T. (2021) *Eficiência a longo prazo da colocação de cortinas para mitigar deformações induzidas por túneis*. MSc Thesis. Universidade de Coimbra.

Gens, A., Di Mariano, A., Gesto, J. & Schwarz, H. (2005) Ground movement control in the construction of a new metro line in Barcelona. In *Proceedings of the Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, pp. 389-395.

Harris, D. I. (2001) "*11 Protective measures*" *Building response to tunnelling*, CIRIA, pp. 135-176.

Ledesma, A. & Alonso, E. E. (2017) Protecting sensitive constructions from tunnelling: the case of World Heritage buildings in Barcelona. *Géotechnique*, **67** (10), pp. 914-925. https://doi.org/10.1680/jgeot.SiP17.P.155

Lopes Laranjo, M., Almeida e Sousa, J. & Venda Oliveira, P. J. (2010) Time-Dependent Behaviour of a Shallow Tunnel in Overconsolidated Clay. *Soils and Rocks*, **33** (3), pp. 159-170

Massicano, D. (2020) *Assessment of the Efficiency of Embedded Walls to Mitigate Ground Deformations Induced By Tunnelling*. MSc Thesis. University of Coimbra, Coimbra, Portugal.

Mateus de Brito, J. M. & Matos Fernandes, M. (2006) Estação Terreiro do Paço do Metropolitano de Lisboa: concepção, previsões de projecto e desempenho. In *Proceedings of the III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Lisboa, Portugal.* pp. 21-42 (in Portuguese).

Nikiforova, N. S. & Vnukov, D. A. (2012) Geotechnical cut-off diaphragms for built-up area protection in urban underground development. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, pp. 927-932.

Oteo, C., De la Fuente, P. & De Assis, S. (2007) Jet-grouting walls as protection to the buildings near urban tunnels. In *Proceedings of the Geotechnical engineering in urban environments: proceedings of the 14th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, Millpress Science Rotterdam, the Netherlands, Vol. 3, pp. 1504-1508.

Pedro, A. M. G., Grazina, J. C. D. & Massicano, D. W. (2022) Embedded walls as a measure to mitigate the ground deformations at Section 63 of Lisbon Metro, Portugal. In *Proceedings of the 20ICSMGE, Sydney, Australia (accepted).*

Rampello, S., Fantera, L. & Masini, L. (2019) Efficiency of embedded barriers to mitigate tunnelling effects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **89** pp. 109-124. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.03.027

Rocscience (2021) *RS2 User guide.* https://www.rocscience.com/help/rs2/documentation.

Salgueiro Amaral, M. J. (2006) *Analysis of the observation results from Lisbon Metropolitan tunnels*. Master's thesis. University of Oporto, Oporto (in Portuguese).

Shen, S.-L., Wu, H.-N., Cui, Y.-J. & Yin, Z.-Y. (2014) Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **40** pp. 309-323. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.10.013

Zhang, D., Fang, Q., Hou, Y., Li, P. & Yuen Wong, L. N. (2013) Protection of Buildings against Damages as a Result of Adjacent Large-Span Tunneling in Shallowly Buried Soft Ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **139** (6), pp. 903-913. https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000823