

Comparação entre MEF e Métodos Empíricos na Determinação do Ponto de Inflexão na Bacia de Recalques de Túneis Gêmeos

Victor Aranha Caneca Moreno Fontes

Engenheiro Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro / GEOCOBA, Rio de Janeiro, Brasil,
victor_aranha@poli.ufrj.br

Maria do Carmo Reis Cavalcanti

Professora Adjunta, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil,
carminhacavalcanti@poli.ufrj.br

Wagner Nahas Ribeiro

Professor Adjunto, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, wagnernahas@poli.ufrj.br

RESUMO: Os túneis desempenham um papel fundamental na conectividade, mobilidade e desenvolvimento das cidades. Além disso, permitem a utilização eficiente do espaço subterrâneo, liberando espaço para um melhor aproveitamento urbano na superfície. O cálculo da bacia de recalques é fundamental para garantir a estabilidade das edificações lindeiras na superfície, de estruturas enterradas próximas, prevenir danos e planejar a construção de forma adequada. No caso de túneis gêmeos rasos são observados maiores recalques após a abertura da segunda cavidade em relação aos da primeira, buscando-se então modelos de previsão de recalque mais adequados e outras medidas mitigadoras apropriadas. Este trabalho tem como objetivo realizar análises comparativas na determinação do ponto de inflexão, primordial para o cálculo da bacia de recalques, para diferentes arranjos geométricos de túneis gêmeos horizontais hipotéticos, variando-se a cobertura dos túneis e a distância entre seus eixos. A análise será feita pelo método empírico proposto por Peck, com a correção proposta por Ocak, pelo método empírico proposto por Chapman e pelo método dos elementos finitos, com software RS2 – Rocscience, usando modelo constitutivo elasto-perfeitamente plástico para materiais argilosos e arenosos. Pode-se verificar que os maciços argilosos apresentam bacias de recalque mais largas que no maciço arenoso e que a bacia de subsidência da segunda cavidade é assimétrica em maciço arenoso. Também foram identificados comportamentos distintos para o fator de perturbação de Ocak para os pontos de inflexão e para o recalque.

PALAVRAS-CHAVE: Túnel, Túneis gêmeos, Método dos Elementos Finitos, Bacia de Recalque, Ponto de inflexão, Escavações.

ABSTRACT: Tunnels are crucial in cities' connectivity, mobility, and development. Moreover, they allow the efficient use of underground space, opening surface space for better use in urban areas. Calculating the settlement trough is essential to ensure the stability of the surrounding buildings on the surface of nearby underground structures, prevent damage, and plan the construction properly. In the case of shallow twin tunnels, higher settlements than the ones observed for the first one excavated are observed for the second cavity; it is then necessary for more appropriate models of settlement prediction and other appropriate mitigating measures. This work aims to perform comparative analysis in determining the inflection point of the settlement trough for different geometric arrangements of hypothetical horizontal twin tunnels, varying the cover depth of the tunnels and the distance between axes. The analysis will be carried out by the empirical method proposed by Peck, with the correction suggested by Ocak, and the finite element method, with software RS2 - Rocscience, using the elastic-perfect plastic constitutive model for clayey and sandy materials. It can be concluded that the clayey massif presents a larger settlement trough than the sandy massif, as expected, and that the subsidence due to the second cavity is asymmetrical in the sandy massif. Distinct behaviors were also identified for the Ocak perturbation factor for inflection points and settlement.

KEYWORDS: Tunnels, Twin tunnels, Finite Element Method, Settlement Trough, Inflection point, Excavations.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado das cidades tem levado a uma elevada concentração populacional em áreas urbanas, resultando em uma disputa pela prioridade no uso e ocupação da superfície. Surge, então, a necessidade de estabelecer conexões rápidas e eficientes entre diferentes regiões urbanas. No entanto, o espaço disponível na superfície muitas vezes se mostra insuficiente para atender a essa demanda crescente (CUI *et al.*, 2021).

Ao optar por escavações e obras subterrâneas, evita-se a necessidade de alterar drasticamente a dinâmica do espaço urbano existente. Dessa forma, é possível evitar ou minimizar a paralisação de vias devido às obras, bem como o aumento do fluxo de carros e os congestionamentos resultantes. As escavações rasas em áreas urbanas desempenham, então, um papel significativo no desenvolvimento urbano. Elas são amplamente utilizadas para a instalação de redes de serviços públicos essenciais, como água, esgoto e energia elétrica, assim como na ampliação das vias de transporte.

Obras subterrâneas alteram a distribuição de tensões no subsolo provocando recalques na superfície, obras posteriores terão uma interferência ainda maior no solo já mobilizado. Surge então a necessidade de melhor estimar estes recalques e sua distribuição para que sejam previstas as ações mitigadoras compatíveis. No caso de túneis gêmeos, diversos estudos indicam que a escavação do segundo túnel provoca recalques maiores do que aqueles causados pela abertura do primeiro (MAIR & TAYLOR, 1997). Em outros, uma forma de previsão e mensuração dos recalques do segundo túnel é proposta baseando-se em correlações geométricas e resultados computacionais (ADDENBROOKE & POTTS, 2001).

O objetivo deste trabalho é comparar os resultados para a estimativa do ponto de inflexão da curva Gaussiana da bacia de recalques de túneis gêmeos hipotéticos quando a construção do segundo túnel é defasada do primeiro, através de análises de tensão-deformação pelo Método de Elementos Finitos e métodos empíricos com a bacia da segunda escavação corrigida conforme a proposta de Ocak (2014) e Chapman *et al.* (2003). Serão avaliados diferentes arranjos geométricos e dois tipos de maciços, um predominantemente argiloso e outro predominantemente arenoso, adotando modelo constitutivo elástico-perfeitamente plástico.

2 METODOLOGIA

2.1 Análises Numéricas

As análises numéricas aqui apresentadas foram desenvolvidas no software RS2 da Rocscience, que aplica o Método dos Elementos Finitos (MEF) a um modelo 2D considerando estado plano de deformações. Como o caso proposto é idealizado, ou seja, hipotético, as demais características e aspectos do estudo são descritas nos demais tópicos deste item.

2.1.1 Arranjos Geométricos

Os túneis gêmeos estudados possuem seção circular de 5 m de diâmetro, abertos em um maciço em condição drenada. A cobertura de solo varia entre os seguintes valores: 3, 4 e 5 vezes o diâmetro do túnel, ou seja, 15m, 20m e 25m. Já a distância entre os túneis varia: 2, 3, 4 e 5 vezes o diâmetro, logo, 10m, 15m, 20m e 25m. A distância entre eixos (d) para cada caso é então 15m, 20m, 25m e 30m. A Figura 1 ilustra as configurações estudadas.

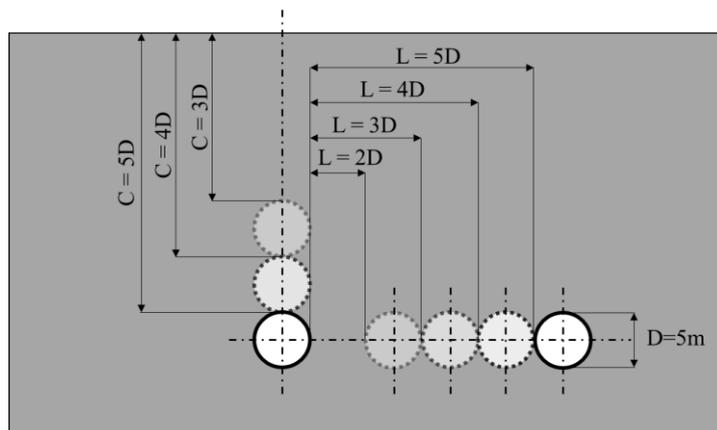


Figura 1. Variáveis geométricas estudadas

2.1.2 Materiais estudados

Foram estudados dois tipos de maciços, um predominantemente argiloso e outro predominantemente arenoso, tendo sido definidos os parâmetros de resistência do modelo constitutivo elasto perfeitamente plástico de tal forma a assegurar a autoportância das cavidades após sua abertura, já que não foi considerada a instalação de suporte na modelagem.

O cenário mais suscetível a colapsos a céu aberto é a configuração com $C = 3D$ para uma afastamento entre os túneis de $L = 2D$ (túneis rasos e mais próximos), sendo esse cenário utilizado para a definição dos parâmetros de resistência.

Ademais, no maciço considerado não há presença de água e o material é isotrópico e homogêneo.

Visando a obtenção de recalques da mesma ordem de grandeza foram adotados os mesmos módulos de elasticidade para ambos os materiais, os parâmetros adotados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades dos materiais estudados

Tipo de maciço	Argiloso	Arenoso
Modelo constituinte	Elástico perfeitamente plástico	
Módulo de elasticidade (MPa)	20	20
Coefficiente de Poisson	0,35	0,3
Peso específico (kN/m ³)	16,5	18,5
Coesão – c' (kPa)	40	10
Ângulo de atrito – ϕ' (°)	26,5	50
Condição de drenagem	Drenado	
Coef. de empuxo no repouso (k_0)	$k_0 = \frac{\nu}{1 - \nu}$	
	0,54	0,43

2.1.3 Modelo Numérico

Os modelos possuem 120 m de largura e 60 m de profundidade, onde todos os elementos da malha são do tipo quadriláteros de 8 nós com discretização e otimização da malha realizada pelo software. As escavações são então simuladas em 3 etapas. A primeira para definir o estado de tensões virgens no maciço intacto, a segunda representa a abertura da cavidade do primeiro túnel e a última, por fim, acrescenta a abertura do segundo túnel.

Para a análise dos recalques, não são consideradas as deformações ocorridas na primeira etapa de escavação, utilizando-se apenas os dados de deslocamentos provocados pela abertura dos túneis. Os recalques gerados pela abertura da segunda cavidade foram calculados pela diferença entre a última e a penúltima etapas da análise.

2.2 Estimativa para o Ponto de Inflexão do 1º Túnel

Peck (1969), apoiado em diversas observações feitas após a construção de túneis e baseado em uma curva gaussiana, apresentou uma proposta para estimar os valores dos recalques na superfície para uma dada seção transversal de um túnel circular. A função que rege o comportamento da bacia de recalque na proposta de Peck é dada pela Equação 1

$$s(x) = s_{\text{máx}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}} \quad (1)$$

Sendo:

$s_{\text{máx}}$ = deslocamento máximo causado por um túnel singular;

x = posição horizontal perpendicular ao eixo do túnel;

$s(x)$ = recalque na posição x ;

i = distância do eixo do túnel ao ponto de inflexão.

O ponto de inflexão representa o ponto com maior declividade na curva da bacia de recalque e uma primeira estimativa é dada por Peck (1969), adotando o ponto de inflexão como o ponto corresponde a 60,6% do recalque máximo. Outras estimativas de i consideradas foram as propostas de O'Reilly e New (1982), que propuseram estimativas de ponto de inflexão para materiais coesivos (Equação 2) e não coesivos (Equação 3), e Mair e Taylor (1997), que criaram faixas para a estimativa do ponto de inflexão também segregando em materiais argilosos e arenosos, representada pela Equação 4.

$$i = 0,43Z_0 + 1,1 \quad (2)$$

$$i = 0,28Z_0 - 0,1 \quad (3)$$

$$i = KZ_0 \quad (4)$$

Sendo:

Z_0 a distância entre a superfície e o centro da seção do túnel;

K o fator empírico dependente do tipo de solo ($K_{\text{argilas}} = 0,4$ a $0,5$ e $K_{\text{areias}} = 0,25$ a $0,45$)

A determinação do ponto de inflexão a partir das curvas obtidas pelo modelo numérico parte do princípio de que este ponto é determinado como a abscissa onde a segunda derivada da curva de recalques é nula. Assim, a derivada segunda será calculada ponto a ponto da distribuição de recalques segundo um operador de interpolação linear para a aproximação definido pela Equação 5. Este processo será aplicado a ambos os ramos à esquerda e à direita do túnel.

$$s''(x_n) = \frac{d^2s(x_n)}{dx^2} \approx \frac{s(x_{n+1}) - 2 \cdot s(x_n) + s(x_{n-1}))}{\Delta x^2} \quad (5)$$

2.3 Estimativa para o Ponto de Inflexão do 2º Túnel

A partir dos dados da análise numérica da bacia de recalques do 1º túnel, é possível aplicar o método de Chapman *et al.* (2003), para determinar o fator de majoração F , apresentado na Equação 6, que multiplica a curva de recalque do primeiro túnel pra estimar os recalques do segundo. Foi definida a zona de sobreposição onde é aplicável a majoração dos recalques estimados para a bacia de recalques do 2º túnel e com a nova bacia calculada, aplica-se o método da segunda derivada para determinar o ponto de inflexão.

$$F = \left\{ 1 + \left[M \left(1 - \frac{|d+x|}{Bi} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

Sendo:

M coeficiente máximo de modificação (obtido computacionalmente e adotado como 60 %);

B o número de distâncias ao ponto de inflexão em meia bacia (adotado como 2,5).

Outra forma de estimar a distância ao ponto de inflexão para o segundo túnel é pelo método de Ocaik (2014). Através da determinação do fator de perturbação k , calculado pela Equação 7, o ponto de inflexão e recalque máximo da bacia do primeiro túnel são multiplicados pelo fator de perturbação e os novos valores são aplicados na equação de Peck (1969) para calcular a bacia de recalques estimada para o segundo túnel.

$$k = 1 + D/d \quad (7)$$

Sendo:

D o diâmetro do túnel;

d o afastamento entre túneis.

3 RESULTADOS

3.1 1º Túnel

Os valores de recalques superficiais obtidos nas análises numéricas foram exportados para planilhas de dados onde foram separados os recalques a esquerda do recalque máximo correspondendo unicamente à abertura do túnel e a direita do mesmo recalque máximo a fim de analisar possíveis diferenças na obtenção da distância ao ponto de inflexão.

Implementou-se o processo de obtenção da segunda derivada e posteriormente foram determinados os pontos de inflexão à esquerda e à direita das curvas das análises de tensão-deformação. Os resultados obtidos nas análises numéricas para o primeiro túnel foram usados para o cálculo da média entre os modelos com a mesma cobertura de solo. A média da distância ao ponto de inflexão (i) para cada profundidade pelo cálculo proposto por Peck (1969), O'Reilly e New (1982) e Mair e Taylor (1997) e as obtidas nas análises são comparadas na Figura 2.

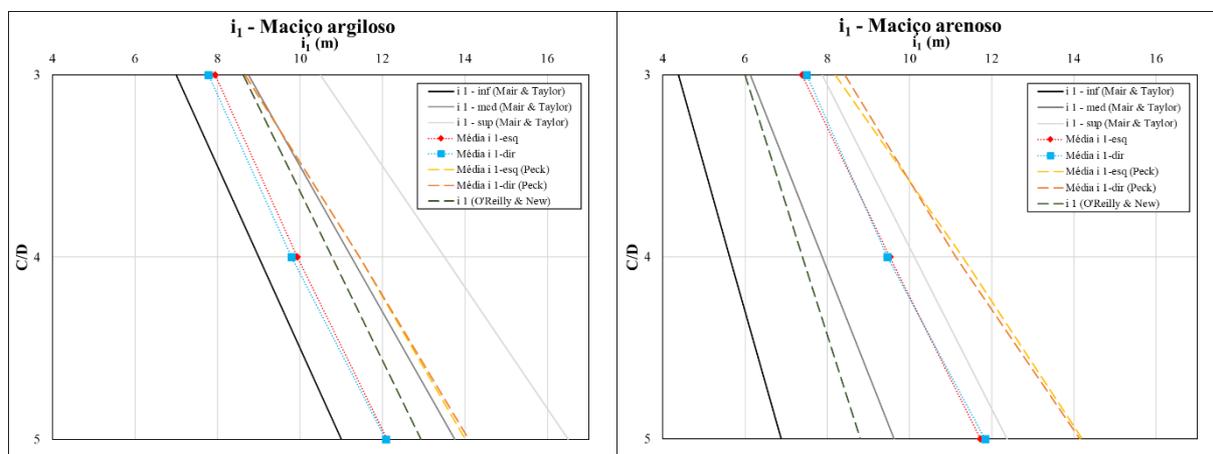


Figura 2. Comparação entre a distância ao ponto de inflexão das análises numéricas e métodos empíricos

As referências provenientes da literatura apresentam comportamentos distintos em relação ao que se espera dos maciços argiloso e arenoso, o que se refletiria no valor de i . Para maciços argilosos, espera-se bacias de recalque mais largas e para maciços arenosos, uma bacia mais estreita. Este comportamento é de fato observado nas análises numéricas, porém com uma diferença menor do que a esperada. Por exemplo, a diferença entre as previsões do valor de i pelo método de Mair e Taylor (1997) para túneis com cobertura igual a $3D$ é de 2,63 m enquanto as análises numéricas indicam diferenças chegando a no máximo 0,56 m para a mesma cobertura, diminuindo conforme a profundidade aumenta.

Ambos os resultados do valor de i , para maciço argiloso e arenoso, se encontram dentro das curvas delimitadoras superior e inferior de Mair e Taylor (1997). Pelos dados apresentados, a diferença entre os valores encontrados para os lados direito e esquerdo é desprezível, resultado esperado para o primeiro túnel dada a formulação clássica de Peck (1969) que estima a bacia por uma curva gaussiana simétrica.

No entanto, a estimativa da distância ao ponto de inflexão dada pelo método de Peck (1969) superestima esta distância em todos os casos estudados. Apesar de Peck (1969) apresentar curvas de variação estimadas para alguns tipos de material, a metodologia abordada aqui se limita a determinação de um ponto referente a uma porcentagem do recalque máximo, negligenciando-se a influência do material do maciço nesta estimativa, fator que possui relevante participação na determinação da localização do ponto de inflexão, dado os resultados apresentados e como indicado pelo próprio autor.

3.2 2º Túnel

Tomando-se por referência os valores das análises numéricas, é possível determinar i e $S_{m\acute{a}x}$ para a determinação da bacia de recalque do segundo túnel pelas propostas de modificação de Chapman *et al.* (2003) e de Ocak (2014). Os resultados para a distância ao ponto de inflexão para os modelos numéricos e os valores obtidos para a bacia de Chapman *et al.* (2003) e de Ocak (2014) são apresentados nas Figuras 3 e 4.

Observa-se que de forma geral, o maciço argiloso não apresenta grande diferença entre a distância ao ponto de inflexão a direita e a esquerda, exceto para o cenário onde $L/D = 3$. O cenário onde $L/D = 2$ e $L/D = 5$ mostram-se quase insensíveis à diferença dos lados, supondo-se que a curva é simétrica. Nos demais casos no maciço argiloso, os resultados apontam um valor maior de i para o lado direito

Para os túneis escavados em material arenoso, a diferença entre o lado direito e esquerdo torna-se mais evidente. Quando $L/D = 2$ e $L/D = 3$, a variação entre a distância ao ponto de inflexão diminui com o aumento da profundidade, tornando-se desprezíveis ao atingir uma cobertura de $5D$.

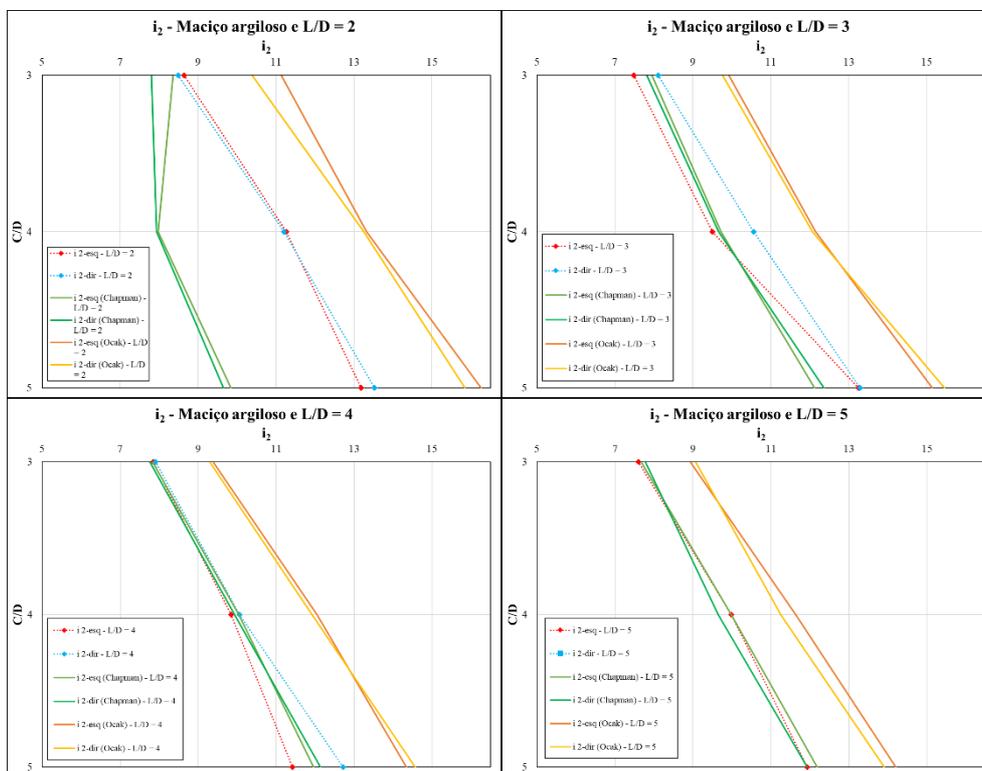


Figura 3. Valores de i_2 para o maciço argiloso

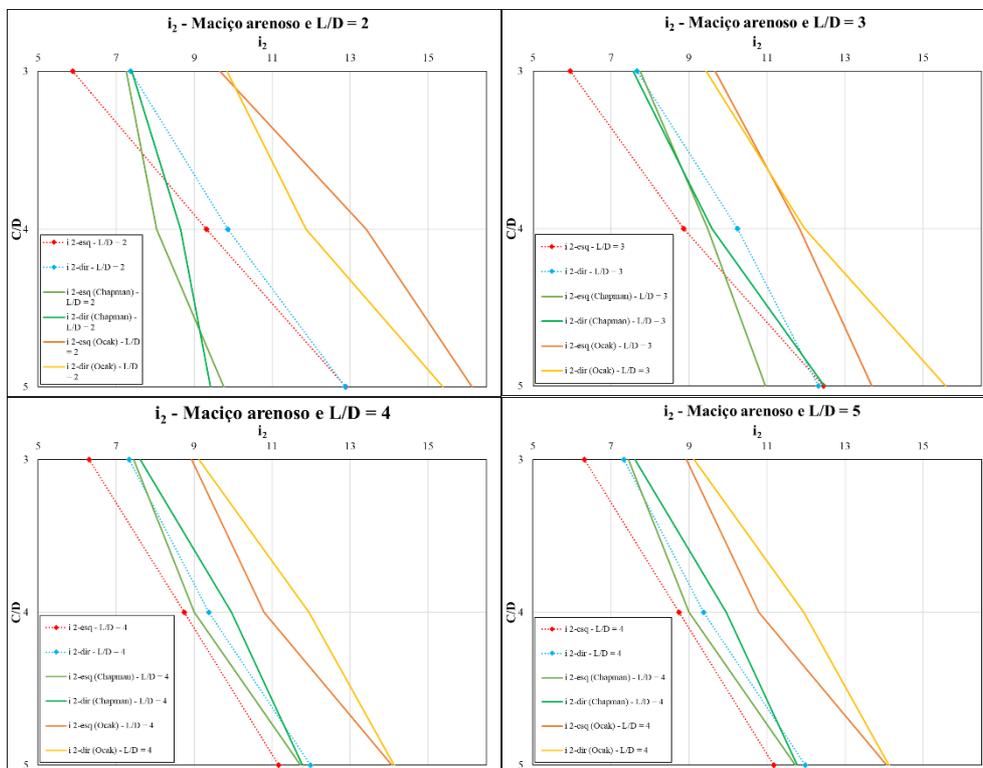


Figura 4. Valores de i_2 para o maciço arenoso

Em relação à determinação do ponto de inflexão pelos métodos empíricos, Chapman et al. (2003) apresenta melhores correlações com o observado nos modelos numéricos para $L/D = 4$ e $L/D = 5$. Já para $L/D=3$ há uma grande discrepância para a maior profundidade e para $L/D = 2$ a discrepância é crescente com a profundidade. Os valores calculados conforme Ocak (2014) apresentam superestimam a determinação da distância ao ponto de inflexão. Para avaliar a aproximação com a proposta de Ocak, foram calculados os valores k baseados na relação entre os recalques dos túneis das análises numéricas (k_s) e entre a média dos pontos de inflexão (k_i), apresentados na Figura 5.

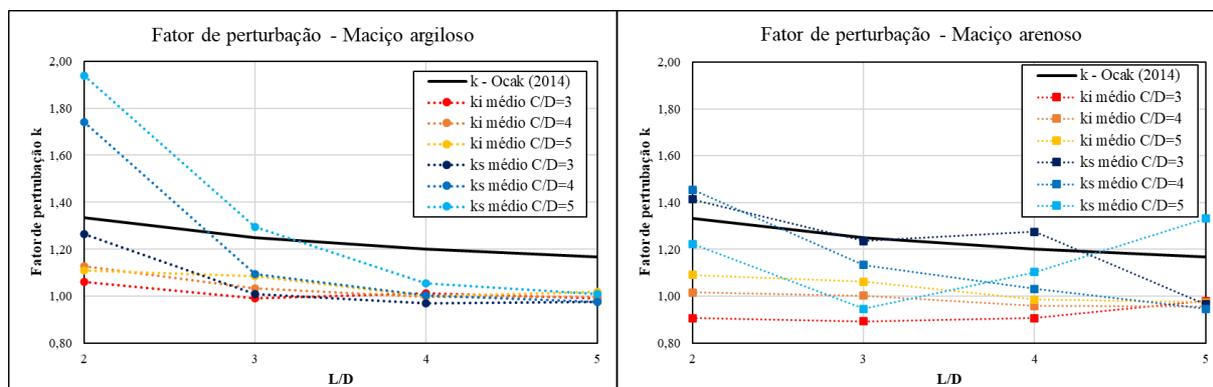


Figura 5. Comparação do fator de perturbação de Ocak (2014) para k_s e k_i

Percebe-se que o fator de perturbação referentes ao ponto de inflexão (k_i) estão localizados abaixo da curva de referência de Ocak (2014) para ambos os tipos de maciço, reafirmando como a estimativa baseada na curva de referência do autor superestima os valores de i_2 . Para os recalques em maciço argiloso, k_s apresenta 3 curvas distintas, variáveis com a profundidade e no maciço arenoso, k_s apresenta comportamento distinto para os cenários onde $C/D = 3$ e $C/D = 5$, mas para $C/D = 4$ o comportamento é similar ao indicado pelo maciço argiloso.

Uma clara tendência no maciço argiloso é observada a partir da observação dos pontos para L/D , o fator de perturbação se aproxima de 1,0, compatível com a diminuição da influência entre as bacias de recalque. O

ki nos maciços arenosos, apresenta tendência similar ao ki no maciço argiloso, porém, com valores tendendo a 0,95. Ocaik (2014) indica que a curva de k tende para o valor de 1,10 para valores de L/D a partir de 8.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo procurou mostrar a influência da geometria da escavação e tipo de material do maciço na determinação dos pontos de inflexão na bacia de recalques de túneis gêmeos laterais. Pode-se concluir que:

- A variação entre ponto de inflexão para maciço predominantemente argiloso e predominantemente arenoso é pouco significativa e diminui com o aumento da profundidade;
- Há pouca diferença entre os pontos de inflexão do ramo esquerdo e direito da 2ª bacia no maciço argiloso, entretanto no maciço arenoso, a diferença entre i a esquerda e a direita é mais nítida porém diminui com o aumento da profundidade;
- A determinação por Chapman *et al.* (2003) fornece a maior similaridade com as análises numéricas para o ponto de inflexão do segundo túnel;
- O fator de perturbação de Ocaik (2014) apresenta comportamentos distintos para o ponto de inflexão e recalque máximo em relação aos obtidos nas análises numéricas, sempre superestimando a distância ao ponto de inflexão;
- Para o maciço argiloso, k tende a 1,0 enquanto para o maciço arenoso k tende a 0,95 para $L/D > 5$ enquanto Ocaik (2014) indica k tendendo a 1,1 para $L/D = 8$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDENBROOKE, T. I.; POTTS, D. M., 2001. Twin Tunnel Interaction: surface and subsurface effects. *International Journal Of Geomechanics*, v. 1, n. 2, p. 249-271. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1532-3641\(2001\)1:2\(249\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1532-3641(2001)1:2(249)).
- CHAPMAN, D.N., ROGERS, C.D.F., HUNT, D.V.L., 2003. Investigating the settlement above closely spaced multiple tunnel constructions in soft ground. In: *Proc. of World Tunnel Congress 2003*, Amsterdam, vol. 2, pp. 629–635.
- CUI, J.; BROERE, W.; LIN, D., 2021. Underground space utilization for urban renewal. *Tunnelling And Underground Space Technology*, v. 108, p. 103726.
- MAIR, R.J., TAYLOR, R.N., 1997. Bored tunnelling in the Urban environment. In: *Proc. 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 2353–2385.
- OCAIK, I., 2014. A new approach for estimating of settlement curve for twin tunnels, 2014. In: *40th ITA-IATES World Tunnel Congress*. 2014, Foz do Iguaçu, Brazil, 8 p.
- O'REILLY, M.P., NEW, B.M., 1982 Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction. In: *3rd International Symposium. Inst of Mining and Metallurgy*, London, England, Proceeding. p.173-181.
- PECK, R. B., 1969. Deep excavations and tunneling in soft ground. In: *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, pp. 225-290.