



## MODELAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE TÚNEIS EM MEIO URBANO: A IMPORTÂNCIA DA LEI CONSTITUTIVA

J.R. Maranhã <sup>1</sup> ; Ana Vieira <sup>2</sup>,

<sup>1</sup> LNEC, Lisboa, Portugal, [jmaranha@lnec.pt](mailto:jmaranha@lnec.pt)

<sup>2</sup> LNEC, Lisboa, Portugal, [avieira@lnec.pt](mailto:avieira@lnec.pt)

**Palavras-chave:** Túneis; Modelos constitutivos para solos; Plasticidade; Anisotropia plástica; Dependência da taxa de deformação; Destruturação de geomateriais

**Sumário:** Neste trabalho são analisados vários aspectos do comportamento de solos muitas vezes ignorados nas análises numéricas do comportamento de obras subterrâneas. Entre estes aspectos incluem-se a anisotropia plástica na rigidez e na resistência, inerente e induzida, a destruturação, a dependência da taxa de deformação, a localização da deformação e o grau de saturação. São referidas formulações constitutivas que tomam em conta estes aspectos e apresentados exemplos, que evidenciam a importância da sua consideração na avaliação estrutural do comportamento destas obras.

### 1. INTRODUÇÃO

A avaliação dos estados de tensão e de deformação de uma obra em túnel requer a utilização de modelos matemáticos que permitam simular e prever com precisão o comportamento do terreno envolvente à abertura, de modo a que um adequado dimensionamento dos meios de suporte seja alcançado. Na sequência do alívio de tensões e alteração do regime hidrológico resultantes das operações de construção de um túnel, resultam deformações que podem ser especialmente pronunciadas, devido ao elevado grau de não linearidade dos solos, em particular se em zonas extensas do terreno houver deformações plásticas significativas, determinadas pela história de tensões a que o terreno se encontrou submetido. Para efeitos de dimensionamento estrutural, estas deformações devem ser devidamente contabilizadas. Em meio urbano uma adequada estimativa das deformações no terreno envolvente é crucial para a avaliação dos efeitos de interacção com as infraestruturas localizadas na vizinhança deste tipo de obras.

Equações constitutivas capazes de descrever as principais características de comportamento dos solos são necessárias para fazer previsões precisas. Além disso, a utilização de modelos realistas do comportamento do terreno, permite uma melhor compreensão da resposta do terreno face à escavação de um túnel, levando a melhorias no seu projecto.

Neste trabalho alguns aspectos do comportamento dos solos, que podem ter têm considerável influência nas análises numéricas de escavações subterrâneas, são abordados. Estes incluem: a anisotropia plástica, a destruturação, a dependência da taxa de deformação, o carregamento cíclico, a localização da deformação e as condições de não saturação. Os aspectos analisados não são geralmente tomados em conta nas análises numéricas convencionais, ainda que forneçam uma descrição mais realista do comportamento dos solos. Refira-se que a utilização de leis constitutivas mais complexas pode envolver um considerável esforço tanto em termos de implementação numérica, como em termos da própria caracterização experimental para calibração dos modelos. São apresentados uma série de modelos com uma estrutura baseada na Mecânica dos Solos de Estados Críticos. A abordagem adoptada para o comportamento plástico é distinta da abordagem clássica.

## 2. MODELAÇÕES NUMÉRICAS TOMANDO EM CONTA ASPECTOS RELEVANTE DO COMPORTAMENTO DE SOLOS

A anisotropia plástica inclui tanto a anisotropia de resistência, como a anisotropia de rigidez. O modelo proposto por Kavvadas e Belokas [1] permite tomar o comportamento anisotrópico plástico inerente e induzido. Neste trabalho descreve-se a formulação deste modelo, que foi implementado num programa explícito de diferenças finitas, sendo apresentadas análises numéricas para o caso de uma obra em túnel.

No processo de destruturação as ligações entre as partículas vão-se degradando, desencadeando deformações irreversíveis e provocando uma redução tanto da rigidez do solo como da sua resistência. Os modelos de Kavvadas e Belokas [1], Rouainia e Muir Wood [2] e Hashiguchi [3] permitem tomar em conta estes processos. A sua formulação e implementação são apresentadas.

Ao processo de envelhecimento, que é uma das causas da estrutura do solo, está associada a sua dependência da taxa de deformação. No contexto de escavações em túnel, foram efectuadas análises de um túnel subterrâneo de Lisboa em formações argilosas, verificando-se que a dependência da taxa de deformação do solo desempenhou um papel fundamental no comportamento global da obra. Nestas análises foram utilizadas relações constitutivas viscoplásticas, num modelo de plasticidade contínua [4].

A resposta sob carregamento cíclico é um aspecto complexo do comportamento dos terrenos. Envolve a necessidade de reproduzir a rigidez tangente direccionada do solo e a evolução das deformações volumétricas, com alterações consecutivas na direcção de carregamento no espaço das tensões e deformações. Modelos constitutivos tipo *bubble* [1, 2] foram utilizados para avaliar a resposta cíclica sísmica de obras em túnel. Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre os resultados obtidos este tipo de modelos e os obtidos por via de uma abordagem com recurso a um modelo cíclico histerético simplificado, frequente utilizado no âmbito da avaliação do comportamento sísmico de terrenos.

Os solos rijos exibem um comportamento frágil, a sua resposta dilatante está associada a uma redução da resistência. O amolecimento devido à deformação implica a localização da deformação em bandas de corte, fenómeno constatado experimentalmente. Os problemas relacionados com a localização da deformação afectam o comportamento global do terreno e devem ser tomados em conta no dimensionamento de obras subterrâneas. Igualmente com maior relevância nos solos rijos, as condições de não-saturação e a acção de forças capilares, que podem assumir proporções consideráveis é geralmente ignorada nas análises, destacando-se a sua relevância.

## 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Kavadas, M., Belokas (2001). An anisotropic elastoplastic constitutive model for structured soils. In: Desai *et al.* (eds). Computer Methods and Advances in Geomechanics. Balkema, Rotterdam, pp. 335-340.
- [2] Rouainia, M., Muir Wood (2000). A kinematic hardening constitutive model for natural clays with loss of structure. *Géotechnique*, Vol. 50, nº 2, pp. 153-164.
- [3] Hashiguchi, K. (2009). *Elastoplasticity Theory*. Springer-Verlag.
- [4] Kaliakin, V., Dafalias, Y. F. (1990). Theoretical aspects of the elastoplastic-viscoplastic bounding surface model for cohesive soils. *Soils and Foundations*, Vol. 30, nº 3, pp. 11-24.