

MODELAÇÃO TRIDIMENSIONAL DA CONSTRUÇÃO DE TÚNEIS COM ESCUDOS. APLICAÇÃO A UM CASO DE ESTUDO.

THREE-DIMENSIONAL MODELLING OF TUNNEL CONSTRUCTION WITH SHIELDS. APPLICATION TO A CASE STUDY.

GUEDES DE MELO, PEDRO *
SANTOS PEREIRA, CARLOS **

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho uma análise numérica tridimensional, baseada no método dos elementos finitos, da construção de um troço do túnel da Linha 2 do Metropolitano de Xangai, executado ao abrigo de um escudo do tipo contrapressão de terras (EPB). A construção deste túnel foi acompanhada por um programa de instrumentação bastante completo, pelo que está disponível um conjunto significativo de resultados de observação. A modelação proposta é aplicada a este túnel, sendo comparados vários resultados relativos a deslocamentos horizontais e verticais do maciço, tanto à superfície como em profundidade, e pressões de terra sobre o suporte. O ajustamento entre resultados numéricos e de observação é, globalmente, bastante razoável, mostrando a capacidade do modelo de cálculo utilizado em reproduzir, durante a fase construtiva, o comportamento de um túnel executado ao abrigo de um escudo.

ABSTRACT

A tridimensional numerical analysis, based on the finite element method, of the construction of a section of Line 2 of the Shanghai Metro, executed with an earth pressure balanced shield (EPB) is presented. For the construction of this tunnel a vast monitoring program was developed and therefore a considerable volume of monitoring data is available. The proposed numerical model is applied to this tunnel and the results concerning horizontal and vertical displacements of the soil, both at surface and in depth, and the earth pressures applied to the support are compared with the ones observed. The adjustment of results is globally very good, showing the ability of the numerical model, used to simulate the construction phase of the tunnel, to reproduce the behaviour of a tunnel executed with a shield.

* Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, pmelo@civil.ist.utl.pt

** Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, csp@civil.ist.utl.pt

1. GENERALIDADES

Neste estudo analisa-se a construção do troço de túnel da Linha 2 do Metropolitano de Xangai, executado com um escudo tipo contrapressão de terras (“EPBS, *earth pressure balanced shield*”) e cuja conclusão estava prevista para o final de 1999. Trata-se de um troço de túnel construído sob uma zona comercial da cidade de Xangai, onde existe elevado número de edifícios de grande altura e um vasto conjunto de redes de serviços subterrâneas, os quais exigiram um controlo bastante apertado dos deslocamentos no maciço. Nesse sentido, foi montado um sistema de instrumentação bastante completo que permitiu obter um conjunto significativo de resultados de observação. Os elementos que constituem a base do estudo aqui apresentado foram recolhidos em [1].

2. GEOTECNIA LOCAL

Do ponto de vista geológico, o subsolo na cidade de Xangai é caracterizado por formações aluvionares e depósitos marinhos da era Quaternária, ocorrendo até profundidades que chegam a atingir cerca de 400m. Destes, os materiais mais superficiais são constituídos por argilas siltosas e areias, tendo sido identificada, para a secção em estudo (Secção P2) a sequência estratigráfica indicada na Figura 1. O nível freático foi detectado no local a uma profundidade de 1,5m.

O programa de prospecção consistiu na realização de vários ensaios *in situ* (ensaios CPT, ensaios de corte rotativo e ensaios pressiométricos) e ensaios de laboratório (ensaios de identificação e ensaios de compressão triaxial). Dos resultados obtidos (disponíveis em [1]) podem ser deduzidos para os principais parâmetros geotécnicos os valores apresentados no Quadro 1. Neste trabalho procura-se apenas simular o desenrolar do processo construtivo do túnel junto à frente de escavação pelo que, face à reduzida permeabilidade dos materiais (com excepção dos aterros superficiais), se admitem condições não drenadas. As análises numéricas realizadas foram conduzidas em tensões totais. Face ao conjunto de parâmetros disponível, foram utilizados modelos de comportamento do tipo elástico linear perfeitamente plástico, recorrendo-se ao critério de rotura de Tresca para todas as formações, com excepção dos aterros, onde se recorreu ao critério de Mohr Coulomb.

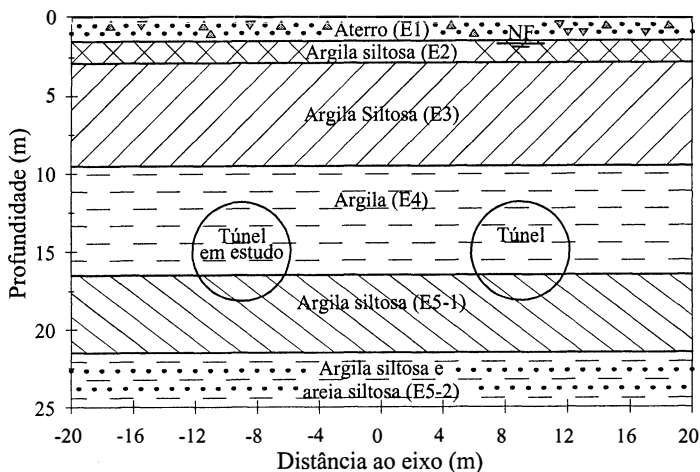


Figura 1 - Metropolitano de Xangai - Secção P2. Perfil geológico.

Quadro 1 - Características geotécnicas adoptadas nas análises numéricas.

Estrato	γ (kN/m ³)	E', E_u^{**} (MPa)	ν', ν_u	c' (kPa)	ϕ' (°)	c_u (kPa)	K_0
E1	18,0	10,0	0,30	0	30	-	0,5
E2	18,7	15,6	0,49	-	-	39	0,7*
E3	18,0	14,4	0,49	-	-	36	0,7*
E4	17,0	17,6	0,49	-	-	44	0,7*
E5-1	18,3	20,8	0,49	-	-	52	0,8*
E5-2	18,3	35,6	0,49	-	-	89	0,8*

Nota: * valor médio do quociente entre a tensão horizontal total e a tensão vertical total

** por falta de informação tomou-se $E_u = 400c_u$ [2]

3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA OBRA

Apenas se simula, neste trabalho, a construção de um dos dois túneis que constituem a referida Linha 2 do Metropolitano de Xangai. Trata-se de um túnel com secção de escavação circular, com 6,34m de diâmetro, com eixo situado à profundidade de cerca de 15m (na análise numérica considerou-se, simplificada, a essa profundidade a interface entre o estrato E4 e E5-1). O túnel foi escavado com recurso a máquinas tuneladoras, com escudos do tipo contrapressão de terras (EPB), de 6,24m de comprimento. Na secção em estudo a pressão medida na única célula instalada junto à frente terá sido, de acordo com os elementos disponíveis, da ordem de 210kPa, desconhecendo-se, no entanto, o diagrama de impulsos realmente aplicado.

O suporte é constituído por um anel de betão armado, sendo o seu diâmetro exterior de 6,2m, a espessura 35cm e o comprimento de 1m. Entre o suporte e o maciço é criado, com a passagem do escudo, um vazio anelar com uma abertura de 7cm, o qual, com a passagem da traseira do escudo, foi preenchido com uma calda sob pressão. A pressão aplicada, de acordo com os elementos disponíveis, foi da ordem de 250kPa.

4. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA SEQUÊNCIA CONSTRUTIVA

A modelação numérica que se utiliza é tridimensional, recorrendo-se, para o cálculo, ao programa ABAQUS, baseado no método dos elementos finitos. A malha adoptada (do tipo da descrita em [3]) é constituída por uma sequência de fatias verticais de elementos isoparamétricos quadráticos de 20 nós, dispostas, no troço onde será executado o túnel, com um comprimento de 3m, cerca de metade do comprimento do escudo. A malha desenvolve-se desde 24m adiante da frente (4 fatias de elementos) até uma distância de 33m (11 fatias de elementos) dessa frente no troço escavado. A fronteira inferior foi posicionada 10m abaixo do eixo do túnel. Essa cota foi definida em função do perfil geotécnico e a partir de resultados de alguns cálculos iniciais que, face à evolução das características de deformabilidade dos materiais em profundidade, mostraram uma reduzida

influência desse posicionamento nos resultados finais. A fronteira vertical, paralela ao plano vertical longitudinal que contém o eixo, foi colocada a 60m de distância do eixo.

A modelação numérica adoptada para a sequência construtiva da abertura de túneis com recurso a máquinas tuneladoras funcionando ao abrigo de escudos foi já apresentada em [3], referindo-se, aqui, apenas alguns aspectos particulares. A sequência construtiva é modelada por uma sucessão de passos de cálculo onde são progressivamente removidos e adicionados elementos à malha inicial, simulando as operações de escavação, avanço do escudo, colocação de suporte e preenchimento com calda do vazio entre o solo e o suporte criado com a passagem do escudo, e onde vão sendo aplicadas e retiradas as pressões que garantem a estabilidade do túnel até à colocação desse suporte.

Na modelação do escudo são de destacar dois aspectos principais. Em primeiro lugar, os elementos que modelam a frente do escudo são apoiados nos mesmos nós dos elementos de solo retirados com a escavação, excepto no que respeita às faces junto à frente, onde novos nós colocam os elementos afastados dessa frente, para que esta se possa deformar livremente. Com a escavação, são aplicadas na frente as pressões que procuram estabilizá-la. No caso de um escudo de contrapressão de terras (EPB) o diagrama das pressões a aplicar deve ser linearmente crescente do topo para a base da secção, simulando-se assim a aplicação de pressões que procuram equilibrar os impulsos das terras em cada nível. Neste caso, atendendo ao facto de não se dispor da informação necessária para reproduzir o diagrama aplicado, optou-se por considerar uma pressão constante em toda a secção.

O segundo aspecto diz respeito à modelação do corpo do escudo. Atendendo aos objectivos definidos no Projecto do túnel, segundo os quais na frente se deveria procurar criar um movimento do maciço no sentido da expansão da cavidade escavada, por forma a compensar futuros deslocamentos de sentido contrário, a atribuição de elevada rigidez aos elementos do escudo restringiria o deslocamentos dos nós que este tem em comum com o maciço no contorno da escavação. Assim, para modelar o escudo optou-se por atribuir aos elementos no contorno uma baixa rigidez e aplicar na superfície escavada uma pressão com um valor compreendido entre as pressões aplicadas na frente e no vazio atrás do escudo. A esta pressão atribuiu-se a designação de “pressão de transição”. O valor desta pressão corresponde ao da pressão real de injeção no vazio que, por perda de eficiência da operação, não fica efectivamente instalada no vazio.

Como referido, a informação disponível relativamente à operação do escudo aponta no sentido de ter sido aplicada uma pressão de cerca de 210kPa na frente de escavação e uma pressão de 250kPa no vazio anelar criado com a passagem do escudo. Desconhece-se, no entanto, o real significado destes valores. No primeiro caso não está definido o tipo de diagrama aplicado, fazendo-se notar que se estima que o diagrama de impulsos de terras tenha apresentado na frente uma diferença de pressões entre o tecto e a base da ordem de 75kPa. Relativamente à pressão de injeção do vazio, desconhece-se se se trata de uma pressão realmente instalada ou se o valor indicado foi registado à boca do sistema de injeção, estando, nesse caso, afectado do efeito dinâmico da injeção.

5. RESULTADOS NUMÉRICOS *VERSUS* RESULTADOS DA OBSERVAÇÃO

5.1 Deslocamentos horizontais e verticais segundo o plano longitudinal

O estudo numérico iniciou-se com um conjunto de cálculos nos quais se fizeram variar os valores

das pressões aplicadas na frente e das pressões de injeção do vazio criado com a passagem do escudo procurando aproximar os valores de cálculo aos observados, tomando para o efeito os deslocamentos horizontais, em profundidade, segundo o plano vertical que contém o eixo do túnel, e os assentamentos observados à superfície, segundo o mesmo plano. Este procedimento inicial justifica-se pelas indefinições já referidas relativamente ao significado dos valores disponíveis para as referidas pressões e ainda pelas lacunas existentes na caracterização dos materiais, facto que não permitiu a definição completa de modelos geotécnicos para as formações atravessadas, obrigando, por exemplo, a estimar valores de E_u a partir de expressões empíricas baseadas nos valores de c_u .

Nas Figuras 2 e 3 apresentam-se, respectivamente, os resultados dos deslocamentos horizontais adiante da frente e os assentamentos à superfície, ambos para o plano longitudinal que contém o eixo do túnel, obtidos para uma pressão na frente de 260kPa, uma pressão de transição de 240kPa e uma pressão instalada no vazio de 180kPa. Nessas figuras são ainda representados os resultados de observação disponíveis (os resultados da Figura 3 identificados como “observados/estimados” referem-se a resultados observados mas disponibilizados numa escala de tempos pelo que a sua colocação numa escala de distâncias à frente foi estimada com apoio nos valores “observados”).

Da análise das duas figuras pode concluir-se que, para os valores das pressões considerados, as deformadas de cálculo se aproximam bastante das observadas. O comportamento observado mostra que adiante da frente de escavação a acção do escudo sobre o maciço provocou um movimento do solo no sentido da expansão da cavidade, detectado não só nos deslocamentos horizontais em profundidade, como nos empoamentos à superfície. No que respeita aos deslocamentos horizontais de cálculo na frente de escavação, verifica-se que o valor mais elevado ocorre no terço superior da secção, fruto do facto de ter sido considerada uma pressão constante aplicada nessa frente. Quanto aos deslocamentos verticais à superfície, verifica-se que, associada à passagem da traseira do escudo e com a criação do vazio anelar, a superfície do terreno sofre um assentamento relativamente rápido e progressivo. Este efeito foi reproduzido no cálculo considerando uma pressão de transição de 240kPa e uma pressão efectivamente instalada no vazio de 180kPa.

Comparando os valores das pressões de cálculo que conduziram a deformadas do maciço do tipo

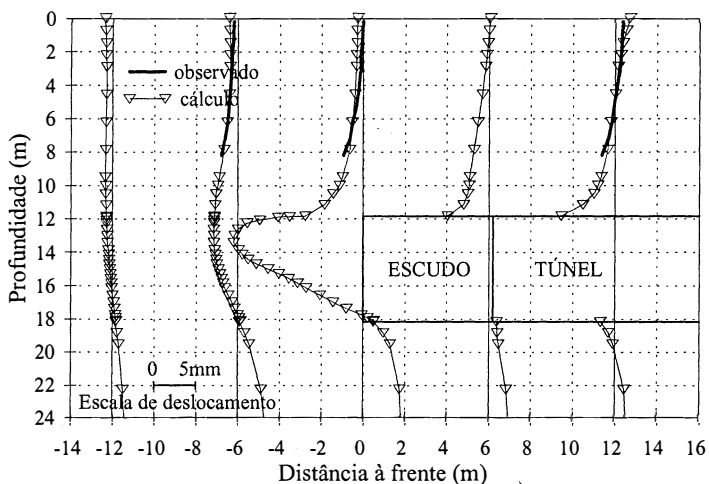


Figura 2 - Deslocamentos horizontais segundo plano vertical que contém o eixo.

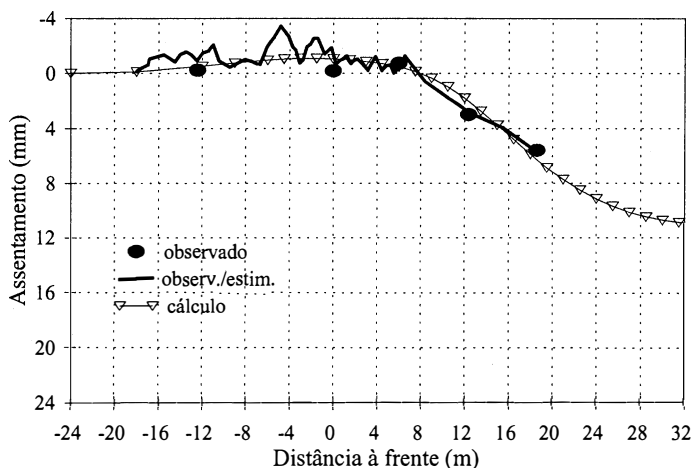


Figura 3 - Assentamentos à superfície, segundo o plano longitudinal.

das observadas com os valores definidos na bibliografia [1] verifica-se que na frente foi imposta no cálculo uma pressão constante de 260kPa enquanto que as informações disponíveis apontam no sentido de ter sido registada uma pressão de 210kPa de um diagrama que se estima ter tido uma variação do topo para a base de 75kPa. No que respeita à pressão de injeção, o valor referido na bibliografia é de 250kPa, enquanto que o valor da pressão de transição considerado foi de 240kPa, sendo a pressão instalada no vazio de 180kPa. Os valores de cálculo podem, pois, ser considerados da ordem de grandeza dos registados.

5.2 Deslocamentos horizontais segundo um plano vertical paralelo ao que contém o eixo

Os deslocamentos de cálculo e observados em obra segundo a direcção longitudinal para o plano vertical paralelo ao do eixo e afastado deste cerca de 6m são apresentados na Figura 4. Da figura pode concluir-se que, embora a aproximação de resultados seja melhor para o plano vertical do eixo (Figura 2), o tipo de deformada parece, também aqui, ter sido reproduzido de modo aceitável. De notar que os deslocamentos observados em obra são muito baixos, sempre inferiores a 5mm. As maiores diferenças são registadas no diagrama correspondente à zona após a passagem da frente do escudo. Tal fica a dever-se, fundamentalmente, ao facto de não ter sido considerado na modelação o efeito do avanço do escudo, como a mobilização correspondente ao atrito/adeseção entre o escudo e o maciço. Esse efeito traduzir-se-ia, naturalmente, num acréscimo dos deslocamentos do terreno no sentido do avanço do escudo.

5.3 Assentamento à superfície segundo plano transversal

Para ilustrar a distribuição dos assentamentos à superfície segundo planos transversais ao eixo do túnel, apresenta-se, na Figura 5, o perfil correspondente à secção situada a 3D (cerca de 18m) da frente, no troço escavado. Os resultados do cálculo são bastante próximos dos observados, embora mostrando valores mais elevados dos assentamentos.

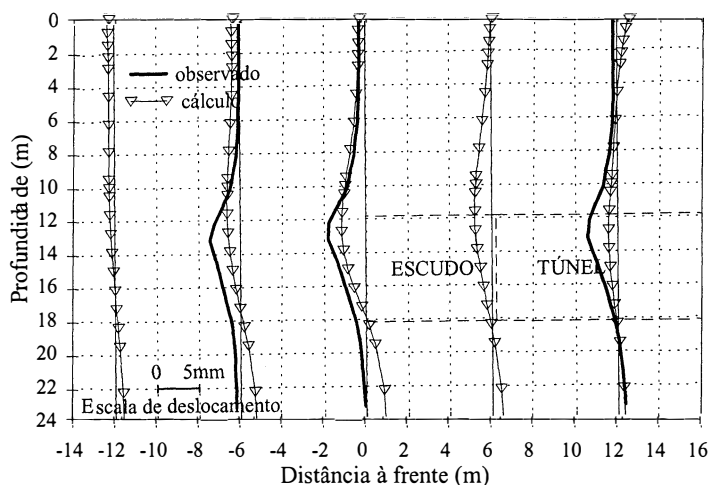


Figura 4 - Deslocamentos horizontais segundo plano vertical longitudinal situado a 6m do eixo.

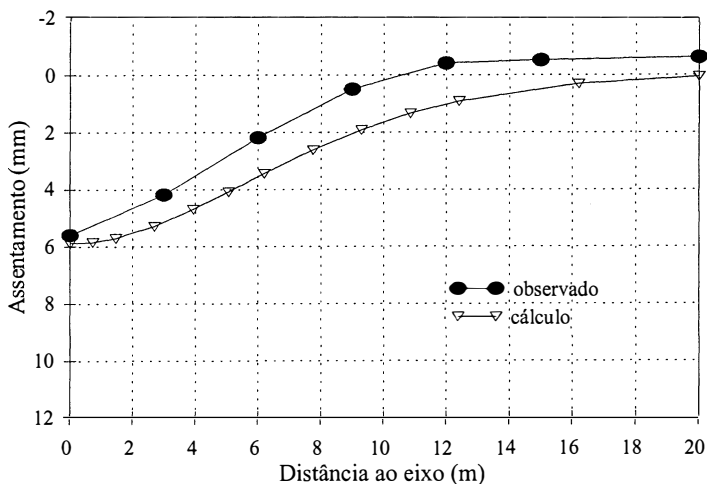


Figura 5 - Assentamentos à superfície segundo plano transversal a cerca de 18m da frente, no troço escavado.

5.4 Evolução dos assentamentos em profundidade segundo plano transversal

Quanto aos assentamentos em profundidade, os resultados mostram que desde a aproximação da frente à secção instrumentada até à passagem do escudo, o solo situado acima da cota do hasteal sofre um empolamento generalizado, fruto da aplicação na frente de uma pressão superior à tensão inicial no maciço e da injeção da calda no vazio anelar. Na Figura 6 é ilustrada esta situação para a secção situada a 2D (cerca de 12m) da frente, no troço escavado. Da figura conclui-se que o comportamento observado é razoavelmente reproduzido pelos cálculos numéricos, embora estes não permitam acompanhar os empolamentos registados a maiores distâncias do túnel.

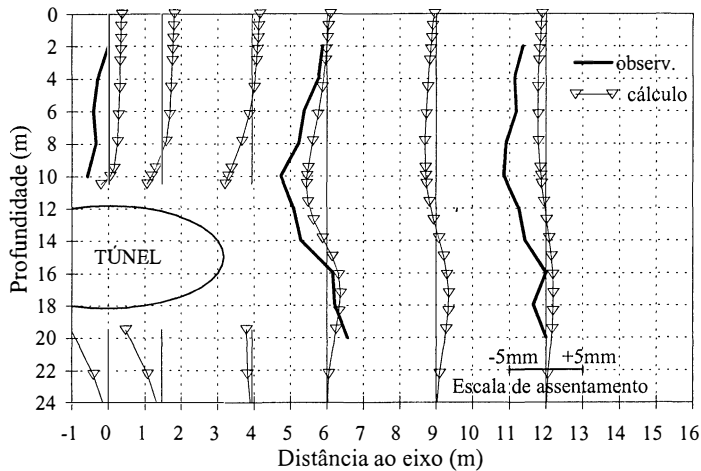


Figura 6 - Assentamentos segundo plano transversal a cerca de 12m da frente, no trecho escavado (valor dos assentamentos medido, na horizontal, entre a deformada e a linha vertical de referência).

5.5 Evolução dos deslocamentos horizontais em profundidade segundo o plano transversal

Relativamente aos deslocamentos horizontais em profundidade, o comportamento do maciço corresponde a uma expansão da cavidade escavada, certamente associada à aplicação de uma pressão elevada na frente e à injeção de calda sob pressão no vazio anelar. Os deslocamentos laterais, mais significativos junto dos hasteais, tendem a aumentar ligeiramente com o avanço do escudo e a injeção do vazio. Os valores máximos foram registados a cotas correspondentes ao terço superior da secção. Na Figura 7, para a mesma secção transversal situada a 2D (cerca de 12m)

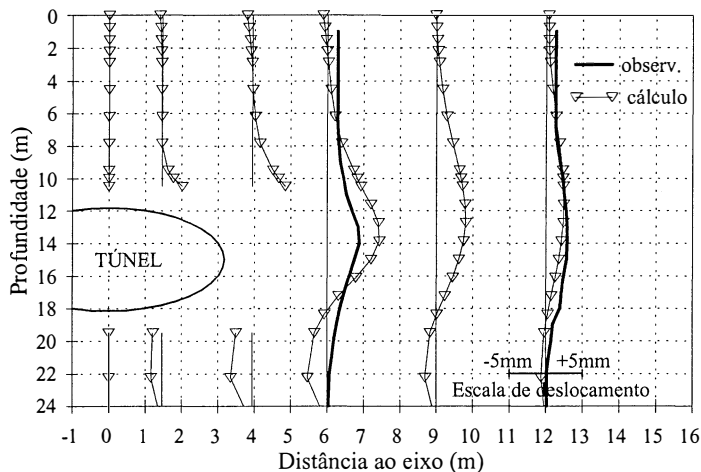


Figura 7 - Deslocamentos horizontais segundo plano transversal a cerca de 12m da frente, no trecho escavado (valor dos deslocamentos medido, na horizontal, entre a deformada e a linha vertical de referência).

da frente de escavação, após a passagem do escudo, apresenta-se a evolução, em profundidade, dos deslocamentos horizontais. Da análise da figura conclui-se que os deslocamentos registados são muito pequenos, em regra inferiores a 5mm. O comportamento do maciço parece ter sido razoavelmente modelado dada a proximidade de resultados de cálculo e de dados de observação.

5.6 Evolução das pressões das terras sobre o suporte do túnel

No suporte do túnel foram instaladas seis células de medição da pressão exercida pelas terras, distribuídas na superfície exterior de cinco aduelas. Os valores registados nessas células são representados na Figura 8, juntamente com os resultados dos cálculos realizados. De referir que, não são apresentados resultados de cálculo para a célula C5, dado que na análise numérica este ponto, por ser o único contacto do suporte com o maciço, tem concentrada uma pressão irrealisticamente elevada. O tipo de diagrama de pressão determinado para esta célula C5 é muito semelhante ao da célula C4, sendo, no entanto, os valores calculados cerca de 2,5 vezes superiores.

Os dados da observação mostram que inicialmente as células situadas a cotas mais elevadas (C1, C2, C3 e C6) registaram valores da ordem dos 210kPa, enquanto que para as situadas a cotas mais baixas os valores atingiram cerca de 250kPa. Este efeito deverá ter estado associado, segundo [1], a algumas deficiências no preenchimento do vazio por parte da calda de injeção, que, com o avanço do escudo, terá melhorado significativamente. Nesta fase, as pressões mais elevadas registaram-se na zona da soleira, onde se terá feito notar o peso do suporte, e os valores intermédios na zona junto ao tecto, onde se terá feito sentir o peso das terras sobrejacentes ao túnel, e os valores mais baixos juntos aos hasteais, provavelmente reflectindo apenas as pressões de injeção no vazio. A cerca de 3D da secção de injeção da calda (cerca de 24m da frente), e com a perda de eficiência da calda de injeção, as células registaram uma redução generalizada das pressões aplicadas. De notar que as células C3 e C6, junto aos hasteais, as quais se admite traduzirem melhor o efeito da pressão de injeção aplicada, registaram valores de cerca de 190kPa. Este valor é muito próximo do da pressão de injeção adoptada nos cálculos, inicialmente estimado apenas com base nos deslocamentos do maciço segundo o plano vertical longitudinal.

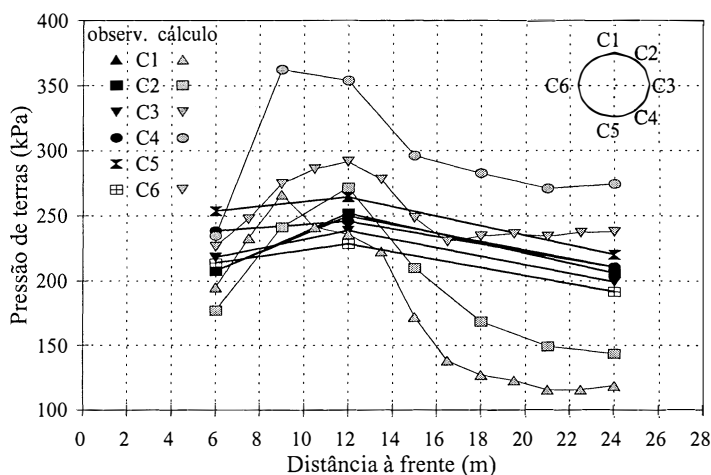


Figura 8 - Pressões aplicadas no contorno exterior do suporte

Os resultados dos cálculos numéricos aproximam-se, razoavelmente, para a zona situada até cerca de 14m da frente de escavação, dos valores observados. Apenas a célula C4 se destaca um pouco, talvez pela proximidade à soleira. Para distâncias superiores a 14m verificou-se um comportamento distinto das várias células. Junto ao tecto, os cálculos mostram um alívio de pressões, eventualmente associado a um efeito de arco criado nessa zona. Este efeito terá produzido uma transferência de tensões para as cotas mais baixas, conduzindo a pressões mais elevadas em C4. Os valores de cálculo para as células C3 e C6 reproduzem, razoavelmente, os valores observados das pressões.

6. CONCLUSÕES

Apresenta-se neste trabalho uma análise numérica tridimensional relativa à construção da Linha 2 do Metropolitano de Xangai, onde foram utilizadas máquinas tuneladoras, com escudos tipo contrapressão de terras. Para acompanhamento da obra foi instalado um sistema de observação bastante completo, sendo o volume de resultados disponível significativo.

O ajustamento entre os resultados numéricos e os da observação da fase construtiva junto à frente de escavação foi, globalmente, bastante razoável. Apesar de algumas diferenças no valor das grandezas observadas, o comportamento do maciço durante a fase construtiva parece ter sido, em regra, reproduzido. De notar que as leis de constitutivas adoptadas para os solos (do tipo elástico linear perfeitamente plástico) foram condicionadas pela informação geotécnica disponível e, mesmo assim, exigiram o recurso a correlações empíricas para a definição dos valores de alguns parâmetros fundamentais para o cálculo (como seja o módulo de deformabilidade).

No capítulo da modelação numérica destaca-se, relativamente ao apresentado em [3], a forma como foi considerado o escudo. Neste caso, uma vez que o Projecto previa a aplicação na frente do escudo de uma pressão suficientemente elevada para conduzir ao empolamento do terreno, o escudo foi modelado por elementos de baixa rigidez, sendo aplicada na superfície escavada uma pressão de valor compreendido entre a pressão na frente e a pressão de injeção no vazio (designada como pressão de transição). Os resultados obtidos parecem mostrar que este tipo de modelação terá simulado, razoavelmente, o comportamento observado.

Por último, uma referência ao facto de os resultados de observação mostrarem que a passagem do escudo induz na zona do maciço junto ao escudo deslocamentos com componente horizontal segundo a direcção do avanço da escavação, naturalmente associados a efeitos devidos ao atrito/adessão entre o escudo e o maciço, aspecto não considerado na modelação.

REFERÊNCIAS

- [1] Lee et al. (1999). Ground response to the construction of Shanghai Metro Tunnel - Line 2. Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol. 39, No. 3, pp. 113-134.
- [2] Hunt, R.E. (1986). Geotechnical engineering analysis and evaluation. McGraw-Hill.
- [3] Guedes de Melo, P.; Santos Pereira, C. (2000). Modelação numérica da abertura de túneis em solos com recurso a escudos. 7º Congresso Nacional de Geotecnia, Vol. 2, pp. 895-904.