

Índice

| | |
|-------------------------|------|
| Resumen. | I |
| Abstract..... | I |
| Agradecimientos. | II |
| Índice. | III |
| Índice de figuras. | VI |
| Índice de tablas. | VIII |

Capítulo 1: Introducción y objetivos.

| | | |
|---------|---|----|
| 1.1 | Introducción. | 1 |
| 1.1.1 | Historia de los túneles. | 1 |
| 1.1.2 | Construcción de túneles mediante la utilización de escudos de presión de tierras (EPB). | 2 |
| 1.1.3 | Problemas inducidos por la excavación de un túnel. | 6 |
| 1.1.4 | Descripción geológica y geotécnica de Barcelona. | 7 |
| 1.1.4.1 | Descripción general de la geología y la geotecnia de Barcelona. | 7 |
| 1.1.4.2 | Descripción detallada de la geología y la geotecnia de la zona de estudio (Delta del Llobregat). | 9 |
| 1.1.5 | Las obras de construcción de la línea 9 del metro de Barcelona. | 12 |
| 1.1.5.1 | Generalidades. | 12 |
| 1.1.5.2 | Tramo 2A: <i>Fira - Parc logistic</i> | 13 |
| 1.2 | Objetivo de la tesina. | 14 |

Capítulo 2: Determinación de la deformada del túnel "in situ".

| | | |
|---------|--|----|
| 2.1 | Introducción. | 15 |
| 2.2 | Determinación de la deformada mediante medidas de convergencia. | 15 |
| 2.2.1 | Campaña de medidas de convergencia. | 15 |
| 2.2.1.1 | Fase 1: Realización de visuales. | 16 |
| 2.2.1.2 | Fase 2: Familiarización y práctica con la cinta de convergencia. | 17 |
| 2.2.1.3 | Fase 3: Posicionamiento de los anclajes. | 17 |
| 2.2.1.4 | Fase 4: Puntos necesarios para determinar la deformada. | 18 |
| 2.2.1.5 | Fase 5: Realización de las medidas de convergencia. | 19 |
| 2.2.2 | Referenciación de las medidas de convergencia mediante topografía. | 20 |
| 2.2.3 | Tratamiento de los datos para obtener la deformación radial del túnel. | 21 |
| 2.2.4 | Resultados obtenidos. | 23 |
| 2.2.4.1 | Resultados obtenidos en el anillo 804. | 23 |
| 2.2.4.2 | Resultados obtenidos en el anillo 818. | 24 |
| 2.3 | Determinación de la deformada mediante métodos topográficos (perfilómetros). | 29 |
| 2.3.1 | Tratamiento de los datos para obtener la deformación radial del túnel. | 29 |
| 2.3.2 | Resultados obtenidos. | 30 |
| 2.4 | Comparación de las deformadas obtenidas mediante convergencias y perfilómetros. | |
| 2.4.1 | Resultados obtenidos. | 31 |
| 2.4.2 | Conclusiones. | 32 |

Capítulo 3: Determinación de los movimientos inducidos por la excavación del túnel.

| | | |
|---------|--|----|
| 3.1 | Introducción. | 33 |
| 3.2 | Instrumentación utilizada. | 33 |
| 3.2.1 | Instrumentación topográfica. | 33 |
| 3.2.1.1 | Instrumentación topográfica en superficie. | 33 |
| 3.2.1.2 | Instrumentación topográfica en las estructuras próximas. | 33 |
| 3.2.2 | Instrumentación del terreno. | 34 |
| 3.3 | Lectura de datos. | 35 |
| 3.4 | Determinación de la cubeta de asientos y la pérdida de volumen. | 35 |
| 3.4.1 | Base teórica. | 35 |
| 3.4.1.1 | Método de <i>Peck</i> para la estimación de la cubeta de asientos. | 35 |
| 3.4.1.2 | Pérdida de volumen. | 37 |
| 3.5 | Aproximación de la cubeta teórica a partir de los asientos medidos <i>in situ</i> y determinación de la pérdida de volumen. | 37 |
| 3.6 | Conclusiones. | 38 |

Capítulo 4: Modelación numérica.

| | | |
|---------|---|----|
| 4.1 | Introducción. | 39 |
| 4.2 | Zona de estudio. | 39 |
| 4.3 | Modelo geométrico del problema. | 40 |
| 4.3.1 | Representación del suelo y sus propiedades. | 40 |
| 4.3.2 | Representación de las estructuras y sus propiedades. | 42 |
| 4.3.2.1 | Representación del escudo y sus propiedades. | 43 |
| 4.3.2.2 | Representación del túnel y sus propiedades. | 45 |
| 4.3.3 | Representación de los materiales de inyección y sus propiedades. | 46 |
| 4.4 | Condiciones de contorno y condiciones iniciales. | 47 |
| 4.4.1 | Introducción. | 47 |
| 4.4.2 | Condiciones de contorno. | 47 |
| 4.4.3 | Condiciones iniciales. | 47 |
| 4.5 | Fases de cálculo. | 48 |
| 4.5.1 | Introducción. | 48 |
| 4.5.2 | Fase 1: Excavación del túnel e inyección de bentonita en el contorno del escudo. | 48 |
| 4.5.3 | Fase 2: Construcción del túnel e inyección del mortero de cola. | 49 |
| 4.5.3.1 | Determinación del incremento o decremento del volumen del mortero de cola. | 50 |
| 4.5.4 | Fase 3: Contracción del revestimiento del túnel. | 52 |
| 4.5.5 | Fase 4: Endurecimiento del mortero de cola. | 53 |
| 4.6 | Visualización de los resultados. | 53 |
| 4.7 | Modelo numérico. | 55 |
| 4.7.1 | Modelo numérico de la sección 1: PK 11+482. | 55 |
| 4.7.2 | Resultados del modelo numérico de la sección 1. | 56 |
| 4.7.3 | Modelo numérico de la sección 2: PK 11+108. | 60 |
| 4.7.4 | Resultados del modelo numérico de la sección 2. | 61 |
| 4.7.5 | Modelo numérico de la sección 3: PK 10+465. | 64 |
| 4.7.6 | Resultados del modelo numérico de la sección 3. | 65 |
| 5 | Conclusiones del modelo predictivo. | 69 |
| 5.2.1 | Influencia de la posición de la clave (dovela K). | 72 |

Capítulo 5: Comparación entre los resultados numéricos y las medidas *in situ*.

| | | |
|-----|--------------------|----|
| 5.1 | Introducción. | 75 |
|-----|--------------------|----|

| | |
|--|-----------|
| 5.2 Comparación de las cubetas de asientos. | 75 |
| Capítulo 6: Conclusiones. | 79 |
| Referencias bibliográficas. | 81 |
| Otra bibliografía consultada. | 82 |
| ANEXO DE MEDIDAS. | 83 |
| ANEXO DE RESULTADOS. | 100 |
| ANEXO DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA. | 121 |
| ANEXO DE FOTOGRAFÍAS. | 124 |
| ANEXO DE GEOLOGÍA. | 144 |
| ANEXO DE PLANOS. | 147 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Metro de Londres. | 1 |
| Figura 2. Esquema de una EPB. | 3 |
| Figura 3. Cabeza de corte. | 4 |
| Figura 4. Cilindros de empuje. | 5 |
| Figura 5. Erector de dovelas. | 5 |
| Figura 6. Back-up. | 6 |
| Figura 7. Perfil y mapa geológico de la zona de Barcelona (Geología-geotecnia L9 Metro Barcelona). | 8 |
| Figura 8. Delta del Llobregat (Bayó, A. 1985 / Albert Ventayol. Bosch & Ventayol, GeoServeis, S.L). | 9 |
| Figura 9. Perfil del delta de Llobregat (Bayó, A. 1985 / Albert Ventayol. Bosch & Ventayol, GeoServeis, S.L). | 10 |
| Figura 10. Esquema de la línea 9. | 12 |
| Figura 11. Esquema longitudinal de la zona de la EPB donde se realizan las medidas de convergencia (Herrenknecht). | 16 |
| Figura 12. Esquema transversal de la zona de la EPB donde se realizan las medidas de convergencia (Herrenknecht). | 17 |
| Figura 13. Esquema de visuales (líneas rojas), anclajes sin coordenadas (círculos rojos) y anclajes con coordenadas (círculos verdes). | 19 |
| Figura 14. Convergencia entre el punto 7 y el 5. | 19 |
| Figura 15. Convergencia entre el punto 7 y el 6. | 20 |
| Figura 16. Determinación de nuevo punto (X,Y). | 21 |
| Figura 17. Distintas posiciones del anillo de estudio respecto al escudo. | 22 |
| Figura 18. Resultante de los desplazamientos verticales y horizontales (escala exagerada). | 22 |
| Figura 19. Representación grafica de los desplazamientos entre la posición 2 y la 3. | 23 |
| Figura 20. Representación grafica de los desplazamientos entre la posición 2 y la 4. | 24 |
| Figura 21. Representación grafica de los desplazamientos entre la posición 2 y la 5. | 24 |
| Figura 22. Deformación del anillo de dovelas 804. | 25 |
| Figura 23. Deformación del anillo de dovelas 804. | 25 |
| Figura 24. Esquema de situación de las líneas de inyección de mortero. | 26 |
| Figura 25. Representación grafica de los desplazamientos entre la posición 2 y la 3. | 26 |
| Figura 26. Representación grafica de los desplazamientos entre la posición 2 y la 4. | 27 |
| Figura 27.1 Representación grafica de los desplazamientos entre la posición 2 y la 4. | 27 |
| Figura 28. Deformación del anillo de dovelas 818. | 28 |
| Figura 19. Deformación del anillo de dovelas 818. | 28 |
| Figura 30. Representación grafica de perfilómetro (PK: 10+747). | 29 |
| Figura 2 Deformación final del anillo de dovelas. | 30 |
| Figura 32. Comparación de las deformadas entre las posiciones 2-3 (convergencia) y la final (perfilómetro). | 31 |
| Figura 33. Comparación de las deformadas entre las posiciones 2-4 (convergencia) y la final (perfilómetro). | 31 |
| Figura 34. Comparación de las deformadas entre las posiciones 2-5 (convergencia) y la final (perfilómetro). | 31 |
| Figura 35. Esquema de la sección tipo. | 34 |
| Figura 36. Geometría de la cubeta de asentamientos generada por la excavación según <i>Peck</i> | 36 |
| Figura 37. Tabla " <i>General</i> " de entrada de datos. | 41 |
| Figura 38. Tabla " <i>Parameters</i> " de entrada de datos. | 41 |
| Figura 39. Ejemplo de un perfil con sus estratos correspondientes. | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 40. Ventana del editor de túneles. | 43 |
| Figura 41. Tabla de propiedades del escudo. | 44 |
| Figura 42. Disposición relativa entre las tres "estructuras". | 45 |
| Figura 43. Relleno del GAP con lechada de bentonita (color Marrón). | 48 |
| Figura 44. Activación de la cabeza de corte y el escudo y desactivación del material excavado. | 49 |
| Figura 45. Calculo de las nuevas presiones de agua. | 49 |
| Figura 46. Tabla de introducción del incremento o decremento de volumen. | 52 |
| Figura 47. GAP relleno de mortero de cola (color gris). | 52 |
| Figura 48. Tabla de contracción del túnel. | 52 |
| Figura 49. Programa de cálculo. | 53 |
| Figura 50. Visualización de la deformación de la malla (Output). | 54 |
| Figura 51. Visualización de los desplazamientos verticales (Output). | 54 |
| Figura 52. Visualización de los puntos plastificados (Output). | 54 |
| Figura 53. Visualización de los asientos máximos en superficie en función del paso de cálculo (Curves). | 55 |
| Figura 54. Geometría de la sección 1. | 55 |
| Figura 55. Deformación de la malla. | 56 |
| Figura 56. Desplazamientos totales. | 57 |
| Figura 57. Desplazamientos verticales. | 57 |
| Figura 58. Cubeta de asientos en superficie. | 58 |
| Figura 59. Puntos plastificados. | 58 |
| Figura 60. Desplazamientos totales del túnel. | 59 |
| Figura 61. Evolución del asiento máximo en función del paso de cálculo. | 59 |
| Figura 62. Geometría de la sección 2. | 60 |
| Figura 63. Deformación de la malla. | 61 |
| Figura 64. Desplazamientos totales. | 61 |
| Figura 65. Desplazamientos verticales. | 62 |
| Figura 66. Cubeta de asientos en superficie. | 62 |
| Figura 67. Puntos plastificados. | 63 |
| Figura 68. Desplazamientos totales del túnel. | 63 |
| Figura 69. Evolución del asiento máximo en función del paso de cálculo. | 64 |
| Figura 70. Geometría de la sección 3. | 64 |
| Figura 71. Deformación de la malla. | 65 |
| Figura 72. Desplazamientos totales. | 66 |
| Figura 73. Desplazamientos verticales. | 66 |
| Figura 74. Cubeta de asientos en superficie. | 67 |
| Figura 75. Puntos plastificados. | 67 |
| Figura 76. Desplazamientos totales del túnel. | 68 |
| Figura 77. Evolución del asiento máximo en función del paso de cálculo. | 68 |
| Figura 78. Influencia de la contracción del túnel en la generación de los asientos. | 69 |
| Figura 79. Asiento máximo producido por la contracción (Contrac.=0,55%, sección 1). | 70 |
| Figura 80. Asientos máximos en superficie (sección 1). | 71 |
| Figura 81. Tabla de activación de rotula y entrada de datos de su comportamiento. | 72 |
| Figura 82. Modelo geométrico. | 73 |
| Figura 83. Influencia de la posición de la clave en la generación de asientos. | 73 |
| Figura 84. Comparación de resultados de la sección 1. | 75 |
| Figura 85. Comparación de resultados de la sección 2. | 76 |
| Figura 86. Comparación de resultados de la sección 3. | 76 |

Figura 87. Escalón en el valor de los asientos producido por la parada de la máquina (parada 14/11/06). 78

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Propiedades geotécnicas del relleno antrópico (R). | 11 |
| Tabla 2. Propiedades geotécnicas del nivel superficial (QI1). | 11 |
| Tabla 3. Propiedades geotécnicas del nivel detrítico superior (QI2). | 11 |
| Tabla 4. Propiedades geotécnicas del nivel intermedio de sedimentos de prodelta (QI3s). ... | 11 |
| Tabla 5. Propiedades geotécnicas del nivel intermedio de sedimentos de prodelta (QI3). | 12 |
| Tabla 6. Propiedades geotécnicas del substrato precuaternario (M1). | 12 |
| Tabla 7. Frecuencias de lectura de datos. | 35 |
| Tabla 8. Parámetros geotécnicos de entrada del Relleno. | 41 |
| Tabla 9. Parámetros geotécnicos de entrada del QI1. | 42 |
| Tabla 10. Parámetros geotécnicos de entrada del QI2. | 42 |
| Tabla 11. Parámetros geotécnicos de entrada del QI3s. | 42 |
| Tabla 12. Parámetros geotécnicos de entrada del QI3. | 42 |
| Tabla 13. Propiedades físicas de la bentonita de inyección. | 46 |
| Tabla 14. Propiedades físicas del mortero de inyección. | 46 |
| Tabla 15. Propiedades físicas del mortero endurecido. | 46 |