

CUADERNOS INTEMAC

Estudio de la interacción entre las obras del Templo de la Sagrada Familia y las del túnel de alta velocidad entre las estaciones de Sants y La Sagrera, en Barcelona

Inquiry into the interaction between the works on the Holy Family Temple and the construction of a high speed rail tunnel between the Sants and La Sagrera stations in Barcelona

Raúl Rodríguez Escribano
Ingeniero de Caminos
Director de la División de Control de Proyecto
de INTEMAC

Alberto Blanco
Geólogo
Director del Área de Geotecnia
de INTEMAC



METIRE UT SCIAS

INTEMAC

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

N.º 81

1.º TRIMESTRE '11

INTEMAC



METIRE UT SCIAS

INTEMAC

INSTITUTO TÉCNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

CONTROL DE PROYECTO

CONTROL DE OBRA

GARANTÍA DE CALIDAD

(D.C.T.) CONTROL PARA EL SEGURO DE DAÑOS

INFORMES DE PATOLOGÍA, REHABILITACIÓN Y REFUERZOS DE CONSTRUCCIONES

OBRAS PÚBLICAS
EDIFICACIÓN
INSTALACIONES



INTEMAC
AUDIT

AUDITORIA TÉCNICO-ECONÓMICA DE CONSTRUCCIONES

- ASESORÍA EN EL PLANTEAMIENTO Y EN LA CONTRATACIÓN DE LA OBRA
- SEGUIMIENTO DE COSTOS Y PLAZOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN
- VALORACIONES DE TERRENOS, INMUEBLES Y CONSTRUCCIONES
- AUDITORIAS DE TRABAJOS PARCIALES Y DE LIQUIDACIÓN DE LA OBRA



INTEMAC
ECO

AUDITORÍA TÉCNICA MEDIOAMBIENTAL

CONTROL DE IMPACTO AMBIENTAL

Obras Públicas
Edificación
Instalaciones

CONTROL DE CALIDAD AMBIENTAL

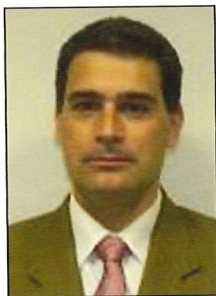
Aire
Agua
Ruido

AUDITORIA MEDIOAMBIENTAL

ASESORAMIENTO EN MATERIA DE MEDIO AMBIENTE

**ESTUDIO DE LA INTERACCIÓN ENTRE LAS OBRAS DEL TEMPLO DE LA
SAGRADA FAMILIA Y LAS DEL TÚNEL DE ALTA VELOCIDAD ENTRE LAS
ESTACIONES DE SANTS Y LA SAGRERA, EN BARCELONA**

**INQUIRY INTO THE INTERACTION BETWEEN THE WORKS ON THE HOLY
FAMILY TEMPLE AND THE CONSTRUCTION OF A HIGH SPEED RAIL TUNNEL
BETWEEN THE SANTS AND LA SAGRERA STATIONS IN BARCELONA**



Raúl Rodríguez Escribano
Ingeniero de Caminos
Director de la División de Control de Proyecto de INTEMAC
Civil Engineering
Desig Control Manager of INTEMAC



Alberto Blanco
Geólogo
Director del Área de Geotécnica de INTEMAC
Geologist
Geotechnical Area Manager, INTEMAC

Copyright © 2011 , INTEMAC

Todos los derechos reservados. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida o distribuida de ninguna manera ni por ningún medio, ni almacenada en base de datos o sistema de recuperación, sin el previo permiso escrito del editor.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

ISSN 1133-9365

Depósito legal: M-4699-2010
Infoprint, S.A. - San Vicente Ferrer, 40

ÍNDICE

1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO
2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS PREVISTAS EN EL PROYECTO DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD
3. BREVE DESCRIPCIÓN DEL TEMPLO EXPIATORIO DE LA SAGRADA FAMILIA
4. TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN REALIZADOS POR INTEMAC PARA AMPLIAR LA INFORMACIÓN DISPONIBLE
5. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO Y CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS
6. ANÁLISIS REALIZADOS
7. SEGUIMIENTO DURANTE EL PASO DE LA TUNELADORA FRENTE AL TEMPLO
 - 7.1. MOVIMIENTOS REGISTRADOS EN LA AUSCULTACIÓN TOPOGRÁFICA
 - 7.2. MEDIDAS DE VIBRACIONES
8. CONCLUSIONES

CONTENTS

1. BACKGROUND
2. BRIEF DESCRIPTION OF THE HIGH SPEED RAILWAY WORKS AS PLANNED IN THE DESIGN
3. BRIEF DESCRIPTION OF THE EXPIATORY TEMPLE OF THE HOLY FAMILY
4. RESEARCH CONDUCTED BY INTEMAC TO GATHER ADDITIONAL INFORMATION
5. SOIL CHARACTERISTICS AND HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS
6. ANALYSES CONDUCTED
7. MONITORING TUNNELLING OPERATIONS ALONGSIDE THE TEMPLE
 - 7.1. MOVEMENTS RECORDED BY SURVEYORS' INSTRUMENTS
 - 7.2. VIBRATION READINGS
8. CONCLUSIONS

ABSTRACT

INTEMAC has been awarded by ADIF, on January 2009, an inquiry concerning the interaction between the works foreseen on the High Speed Rail Tunnel between the Sants and La Sagrera Stations Project, in Barcelona, and those of the Holy Family Temple. It was a very complex inquiry specially because of the very particular nature of the building a masterpiece of the architect Antonio Gaudí. The inquiry analyzed the construction process as they were foreseen on the Project and their possible impact on the Temple, in order that a campaign has been accomplished for capturing data about the building, and the hidrogeological research, etc. and starting from this it has been elaborated a very complex modelling of the site and of the inner Temple too (in order to analyse the interaction soil-cement-structure), as well as from the construction process of the Tunnel and from the protection works previewed on the Project. We analysed feasibility too, from the construction point of view, of the works taking into account the quality level required in order to avoid the slightest problem to the surrounding area, and this possible influence on the hidrogeological conditions. Methodology that has been employed and the results that have been obtained on this inquiry are exposed on a summary way on the report as much as the results of the surveyor's instruments during Tunnelling Works, wich had corroborate the favourable results obtained on the inquiry.

1. BACKGROUND

In January 2009 ADIF (Spanish Railway Infrastructures Authority) awarded the Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC) a contract for services to CONDUCT AN INQUIRY ON THE INTERACTION BETWEEN THE CONSTRUCTION OF A TUNNEL TO CONNECT SANTS AND LA SAGRERA STATIONS AND THE WORKS ON THE EXPIATORY TEMPLE OF THE HOLY FAMILY.

The first and basic document reviewed for that inquiry was the *Detailed Design for the Madrid-Zaragoza, Barcelona-French Border High Speed Rail Platform and Track, Section connecting Sants and La Sagrera Stations*, dated July 2007, drafted by the joint venture created by INTECSA-INARSA and CENSA.

After approving the proposal to conduct the inquiry, the HOLY FAMILY CONSTRUCTION BOARD furnished technical documentation relating to the temple structure and foundations and authorised access to the monument for inspection and all necessary testing.

ADIF's engineers, Mr. Alberto Reguero Martínez, Mr Francisco Javier Navarro Ugena and Mr. Francisco Cabrera Jerónimo, from the ADIF's Quality, Safety and Supervisión Directorship; and Mr. Rafael Rodríguez Gutiérrez and Mr. Jaime García Germán, from the ADIF's Northwest High Speed Line Directorship, carried through, from ADIF's point of view, supervision and monitoring of the works.

Throughout the inquiry, periodic works monitoring meetings were held at the temple office, in which INTEMAC furnished ADIF and the temple CONSTRUCTION BOARD with progress reports.

At the urging of UNESCO, an International Committee of Experts, whose membership included INTEMAC engineers Justo Díaz Lozano and Raúl Rodríguez Escribano, was formed prior to tunnelling alongside the temple to monitor the effect of tunnel construction on buildings authored by Gaudí and located in the vicinity of the works (Expiatory Temple of the Holy Family and Casa Milà).

2. BRIEF DESCRIPTION OF THE HIGH SPEED RAILWAY WORKS AS PLANNED IN THE DESIGN

The detailed design for the high speed rail line called for building a tunnel underneath Mallorca Street alongside the Holy Family Temple with an earth pressure balance shield (EPB or tunnel boring machine, TBM). Figure 1 shows the earth pressure balance shield cutterhead.

RESUMEN

ADIF adjudicó a INTEMAC en enero de 2009 un estudio sobre la interacción entre las obras previstas en el Proyecto del Túnel de la Línea de Alta Velocidad entre las estaciones de Sants y La Sagrera de Barcelona, y las del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia. Se trata de un estudio muy complejo, especialmente por la particular naturaleza del edificio, obra del Arquitecto Antonio Gaudí. El estudio analizó los procesos constructivos previstos en el Proyecto y su posible incidencia en el Templo, para lo cual se llevó a cabo una campaña previa de toma de datos sobre el edificio, de reconocimiento y ensayos para la caracterización del terreno y del entorno hidrogeológico, etc., a partir de la cual se elaboraron complejas modelizaciones del terreno y del propio Templo (para poder analizar la interacción suelo-cimentación-estructura), así como del proyecto constructivo del Túnel y de las obras de protección previstas en el Proyecto. Se analizaron también la viabilidad constructiva de las obras teniendo en cuenta el nivel de calidad requerida para evitar la más mínima afeción al Templo, y su posible influencia en la hidrogeología del entorno. La metodología empleada y los resultados obtenidos en estos análisis se exponen de forma resumida en este documento junto con los resultados del seguimiento de la auscultación durante la posterior construcción del Túnel, que corroboró los favorables resultados que se obtuvieron en el estudio.

1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

ADIF adjudicó en enero de 2009 al Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC) el Contrato de *SERVICIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE INTERACCIÓN ENTRE LAS OBRAS DEL TÚNEL DE CONEXIÓN SANTS-LA SAGRERA Y LAS DEL TEMPLO EXPIATORIO DE LA SAGRADA FAMILIA*.

El estudio partía, como base, del *Proyecto de Construcción de Plataforma y Vía de la Línea de Alta Velocidad Madrid-Zaragoza-Barcelona-Frontera Francesa, Tramo Túnel de Conexión Sants-La Sagrera*, fechado en Julio de 2007, y realizado por la UTE constituida por las empresas INTECSA-INARSA Y CENSA.

La JUNTA DE CONSTRUCCIÓN DE LA SAGRADA FAMILIA manifestó su aprobación a la realización del estudio, facilitándose para ello documentación técnica relativa a la estructura y cimentación del Templo, y permitiendo el acceso al mismo para su inspección y para la realización de las pertinentes pruebas.

Los técnicos de ADIF D. Alberto Reguero Martínez, D. Francisco Javier Navarro Ugena y D. Francisco Cabrera Jerónimo, de la Dirección de Calidad, Seguridad y Supervisión; y D. Rafael Rodríguez Gutiérrez y D. Jaime García Germán, de la Dirección de Línea de Alta Velocidad Noreste, llevaron a cabo por parte de ADIF la dirección, supervisión y seguimiento de los trabajos.

A lo largo del estudio se fueron manteniendo en las oficinas de las Obras del Templo reuniones periódicas de seguimiento del estado de los trabajos, en las que INTEMAC informaba a ADIF y a la JUNTA DE CONSTRUCCIÓN DEL TEMPLO del avance del estudio.

Antes del paso de la tuneladora se creó un Comité Internacional de Expertos, creado a instancias de la UNESCO, del que formaron parte, los Técnicos de INTEMAC D. Justo Díaz Lozano y D. Raúl Rodríguez Escribano, para el seguimiento de las obras de Gaudí próximas al Túnel (el Templo Expiatorio de la Sagrada Familia y la Casa Milà).

2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS PREVISTAS EN EL PROYECTO DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD

El Proyecto de Construcción de la Línea de Alta Velocidad contemplaba el paso a lo largo de la calle Mallorca, en las inmediaciones del Templo de La Sagrada Familia, mediante la construcción de un túnel con un escudo de presión de tierras. Véase en la Figura nº 1 una vista de la cabeza de corte del escudo de presión de tierras empleado.



Figure 1: Earth pressure balance shield cutterhead
Figura 1: Escudo de Presión de tierras. Vista de la cabeza de corte

The safety provisions envisaged in the detailed design to prevent tunnelling from affecting the temple included protection, consolidation and reinforcement measures. More specifically, the design provided for the construction of a pile wall on the side of the tunnel closest to the Holy Family Temple. According to the detailed design, the 230-m pile wall was to run from the 3+480 to the 3+710 kilometre points in this section, underneath Mallorca Street. It would be continuous along the Glory Façade but interrupted between the 3+660 and 3+680 kilometre points, where it intersected with the Line 2 underground tunnel, and between the 3+516 and 3+520 kilometre points (Cerdeña Street). The proposed pile wall is depicted in the drawing in Figure 2.

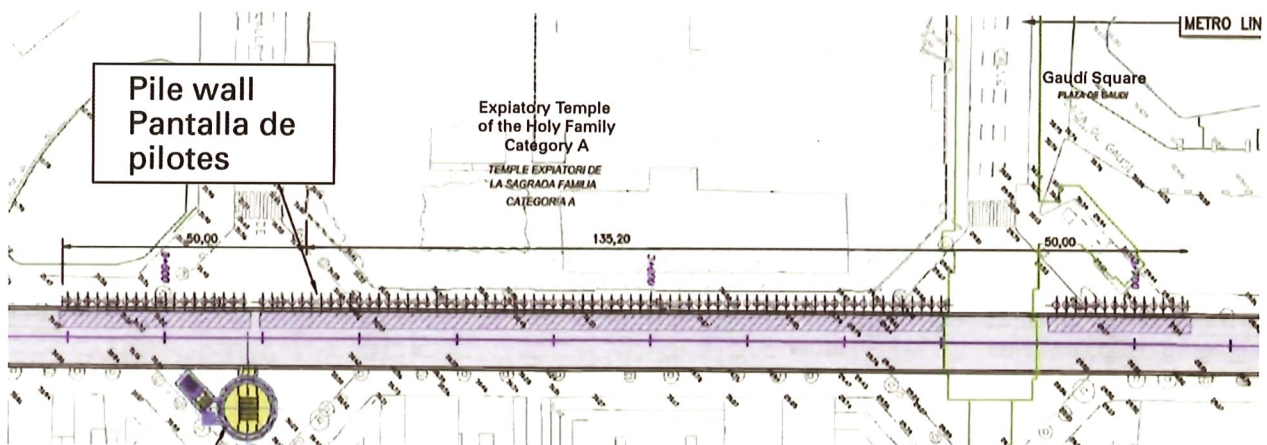


Figure 2: Pile wall as envisaged in the design
Figura 2: Pantalla de pilotes contemplada en el Proyecto

The drawing in Figure 3, taken from the detailed design, shows the geometric details for the protection elements and the position of the tunnel with respect to the pile wall and the Glory Façade.

The wall was to consist of 104 piles joined at the top by a tie beam measuring 2.00 wide by 2.00 m deep. The piles were to be 1.50 m in diameter and spaced at 2.00 m, centres, i.e., with a 0.50-m gap between adjacent members. Measuring from the bottom of the tie beam, the wall was to be 41.00 m deep.

Further to the design drawings, the pile wall stood at a distance of 1.95 m from the foundations under the Glory

Como medidas de seguridad para evitar afecciones al Templo por la construcción del Túnel, en el Proyecto de Construcción, se preveía la ejecución, antes del paso de la tuneladora, de medidas de protección, consolidación y refuerzo. Así, el Proyecto contemplaba la construcción de una pantalla de pilotes del lado del Túnel más próximo a la Sagrada Familia. De acuerdo con el Proyecto Constructivo, la pantalla de pilotes se desarrollaba entre los puntos kilométricos P.K. 3+480 y P.K. 3+710 del tramo, con una longitud de 230 m. Esta pantalla se extendía a lo largo de la calle Mallorca abarcando toda la Fachada de la Gloria del Templo de la Sagrada Familia, y se interrumpía entre los puntos kilométricos P.k. 3+660 y P.k. 3+680 (calle Marina), debido a la existencia del Túnel de la línea 2 de metro, y también a la altura de los P.k.3+516 y P.k. 3+520 (calle Cerdeña). En la Figura nº 2 se puede observar el desarrollo de la pantalla de pilotes propuesta.

En la Figura nº 3, extraída del Proyecto de Construcción, se pueden observar los detalles geométricos relativos a los elementos de protección, y la posición del Túnel respecto a la pantalla de pilotes y la Fachada de la Gloria del Templo.

La pantalla está constituida por un total de 104 pilotes unidos en cabeza por un viga riostra de 2,00 m de ancho por 2,00 m de canto. Los pilotes presentan un diámetro de 1,50 m con una separación entre ejes de 2,00 m, por lo que la separación entre caras de pilotes es de 0,50 m. La longitud de la pantalla respecto a la cara inferior de la viga riostra es de 41,00 m.

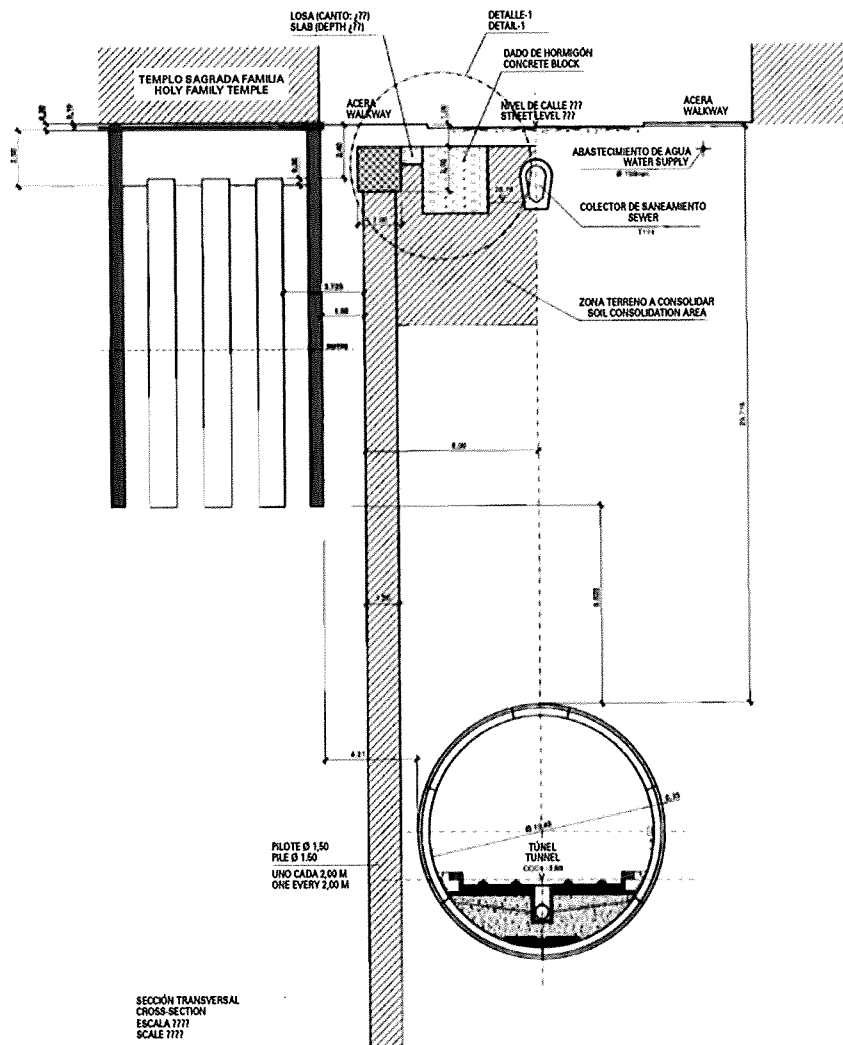


Figura 3: Descripción esquemática de las medidas de protección previstas en el Proyecto
 Figure 3: Protective measures called for in the design

Façade, while the theoretical distance between the outer side of the piles and the site for tunnel excavation was 0.76 m at the critical point, namely the outer edge of the side wall.

The tie beam was joined laterally along its entire length to a slab 0.80 m deep and 1.00 m wide, in turn connected to a concrete block 3.00 m deep and 3.00 m wide that rested on soil previously consolidated by injection.

The concrete block and the improved soil combined to form a stiff member designed to limit movement at the pile heads.

The soil was treated as described above before tunnelling operations began. Once the wall was in place, injections were driven into the soil at a pressure of less than 100 kPa through holes in rows staggered at 0.70-m intervals. The aforementioned tie beam, slab and concrete block were built last.

The tunnel was to be built by involved excavating its full cross-section with an earth pressure balance shield (EPBS).

3. BRIEF DESCRIPTION OF THE EXPIATORY TEMPLE OF THE HOLY FAMILY

Figure 4 contains a sketch of the plan view of the temple. As the figure shows, the temple has a Latin cross plan, in which the *main nave* is the long arm of the cross. The *Glory Façade* (south façade) lies at the base of the cross facing Mallorca Street, where the tunnel was to be bored. Other temple elements regarded as relevant to the inquiry were the *Nativity* and *Passion Façades* and the *apse*.

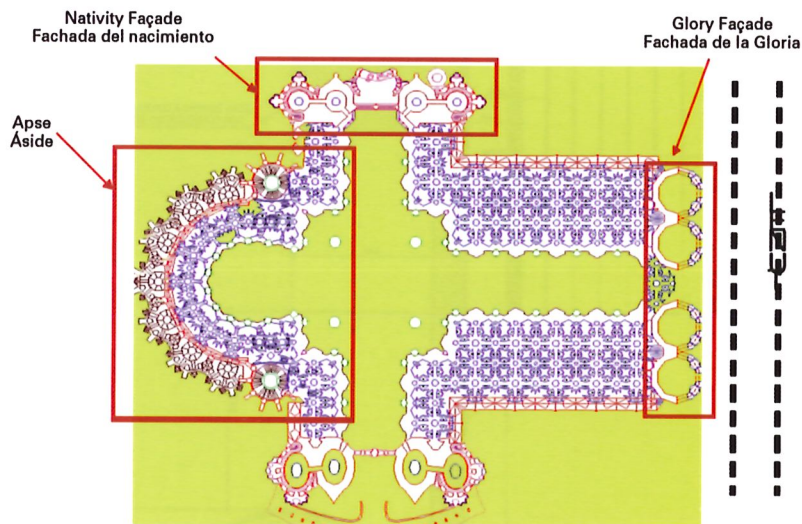


Figure 4: Sketch of temple – plan view
Figura 4: Croquis de planta del Templo

The *Nativity Façade* is depicted in Figure 5. Figure 6, in turn, shows a cross-section of the main nave, photos of which are reproduced in Figure 7.

En los planos de Proyecto se indicaba que la separación entre los elementos de cimentación del Templo de la Sagrada Familia en la zona de la Fachada de la Gloria y la pantalla de pilotes es de 1,95 m, mientras que entre la cara exterior de los pilotes de la pantalla y la excavación del Túnel proyectado la distancia teórica era del orden de 0,76 m en el punto más crítico, en el extremo del "hastial".

La viga riostra se conectaba lateralmente, en toda su longitud, a una losa de 0,80 m de canto y 1,00 m de ancho, que a su vez se conectaba a un dado de hormigón de 3,00 m de ancho por 3,00 m de canto, que se asentaba sobre el terreno en el que previamente se realizaría una consolidación mediante inyecciones.

El conjunto dado de hormigón y terreno mejorado constituía así un elemento rígido para restringir los movimientos en cabeza de los pilotes.

El tratamiento del terreno que se ha descrito se efectuó antes del paso de la tuneladora, construyendo en primer lugar los pilotes para posteriormente realizar las inyecciones del terreno, ejecutadas al tresbolillo con una distancia de 0,70 m, a una presión inferior a 100 kPa. Finalmente se ejecutó la viga de atado, la losa y el dado de hormigón antes mencionados.

Para la ejecución del Túnel se seleccionó un procedimiento constructivo a sección completa mediante el empleo de un escudo de presión de tierras (E.P.B).

3. BREVE DESCRIPCIÓN DEL TEMPLO EXPIATORIO DE LA SAGRADA FAMILIA

En la Figura nº 4 mostramos un croquis de planta del Templo. Como se puede observar en dicha Figura, el Templo tiene planta de cruz latina, en la que la *Nave Principal* es el lado largo de la cruz, encontrándose cerrada a sus pies (fachada *Sur*) por la *Fachada de la Gloria*, adyacente a la calle Mallorca, por la que discurre el Túnel. Destacan también la *Fachada del Nacimiento*, la *Fachada de la Pasión* y el *ábside*.

En la Figura nº 5 mostramos vista de la *Fachada del Nacimiento*. En la Figura nº 6 exponemos sección transversal del Templo en la Nave Central, y en la Figura nº 7 unas vistas de la misma.



Figura 5: Fachada del Nacimiento
Figure 5: Nativity Façade

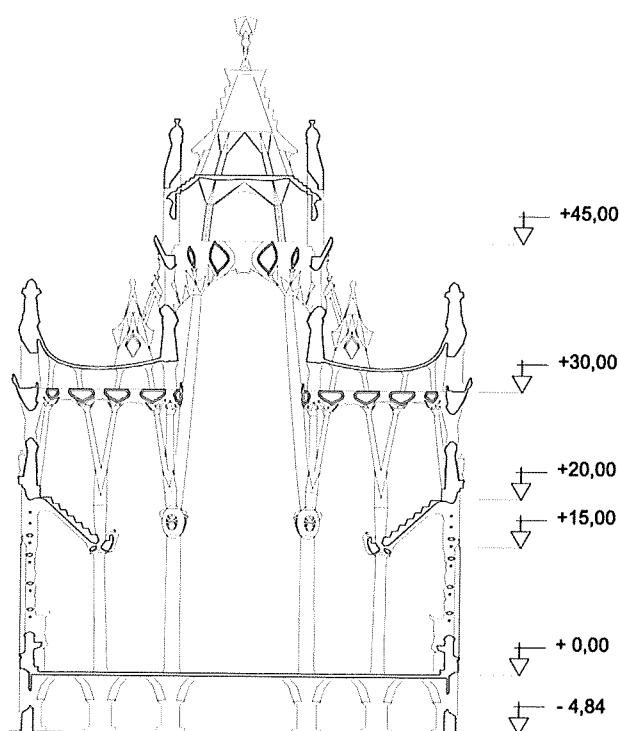


Figure 6: Cross-section of the main nave
Figura 6: Sección transversal del Templo proyectada en la Nave Principal

The areas closest to the tunnel (*Glory Façade* and *main nave*) have what is essentially a concrete structure and are built over deep (pile) foundations. The oldest areas, namely the *Nativity Façade* and the *apse*, which are made of stone masonry, stand on shallow (likewise stone) foundations.

4. RESEARCH CONDUCTED BY INTEMAC TO GATHER ADDITIONAL INFORMATION

The following is a list of research tasks proposed by INTEMAC to supplement the information furnished by ADIF and the temple's CONSTRUCTION BOARD.

A) Detailed inspection of the accessible areas in the temple

The purpose of this inspection was to gather all the information on the behaviour of the structure and foundations that could be obtained from a thorough survey of the temple.

Further to the wishes of the temple's CONSTRUCTION BOARD, the inspection was conducted in two phases: the first was limited to the *Glory Façade* and the part of the main nave between the façade and the crossing, while the second (performed after the main conclusions had been reached) covered the rest of the temple.

No anomalies of any consequence were observed in the part of the temple that might possibly be affected by the tunnel.

B) Further geotechnical information

The geotechnical information available, furnished by ADIF and the HOLY FAMILY CONSTRUCTION BOARD, was extensively reviewed, while relevant documents from other sources were also sought and analysed. These included the documents furnished Clavegueram de Barcelona (CLABSA) on underground water and variations in the groundwater table in Barcelona; the Jaume Almera Earth Science Institute (a Spanish National Research Council body), likewise on the variation in the groundwater table at a number of points on the piezometer network installed in the city of Barcelona; and other sundry documents (such as geotechnical and geological maps of the area analysed).



Figura 7: Vistas de la Nave Principal
Figure 7: Photographs of the main nave

De forma muy resumida podemos indicar que la estructura en las zonas más próximas al Túnel (*Fachada de la Gloria* y *Nave Principal*) es básicamente de hormigón con una cimentación profunda mediante pilotes. Las zonas más antiguas (*Fachada del Nacimiento* y *ábside*) son de fábrica, con una cimentación relativamente superficial también de fábrica.

4. TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN REALIZADOS POR INTEMAC PARA AMPLIAR LA INFORMACIÓN DISPONIBLE

Indicamos a continuación los trabajos de investigación que planteó INTEMAC para complementar la información facilitada tanto por ADIF como por la JUNTA CONSTRUCTORA DEL TEMPLO.

A) Inspección detallada de las zonas accesibles del Templo

Esta inspección tuvo por objeto tomar toda aquella información relativa al comportamiento de la estructura y cimentación que pudiera obtenerse a partir del reconocimiento minucioso del Templo.

Atendiendo a los deseos de la JUNTA CONSTRUCTORA DEL TEMPLO, la Inspección se realizó en dos fases: una primera, limitada a la Fachada de la Gloria y a la parte de la Nave Central comprendida entre dicha Fachada y el Cruce-ro; y una segunda (realizada una vez obtenidas las conclusiones principales del estudio) extendida al resto del Templo.

En la zona de posible influencia del Túnel no se observaron anomalías notables en el Templo.

B) Ampliación de la información geotécnica

Se efectuó una minuciosa revisión de la información geotécnica disponible, tanto la facilitada por ADIF como por la JUNTA CONSTRUCTORA DE LA SAGRADA FAMILIA. Además se buscó y analizó otra documentación relevante procedente de otras fuentes, como por ejemplo la facilitada por Clavegueram de Barcelona (CLABSA) relativa a las aguas subterráneas y a la evolución de los niveles freáticos en Barcelona; la aportada por Institut de Ciències de la Terra "Jaume Almera" (C.S.I.C.), también relativa a la evolución de niveles freáticos en diversos puntos de la red de piezómetros instalados en la ciudad de Barcelona; así como documentación diversa (mapas geotécnicos y geológicos de la zona analizada, etc.).

Based on its review of all this information, INTEMAC identified a need for additional surveys

A total of nineteen boreholes were drilled to extract cores and a further four exclusively to install piezometers.

In addition, a total of forty-eight (48) pressure meter trials were conducted at different depths and Marchetti dilatometer (DMT) tests were performed in one borehole (borehole S-E), also at different depths (ranging from 0 to 36 m).

Lefranc and Gilg-Gavard constant- and falling-head permeability tests were likewise conducted inside the boreholes to determine the hydro-geological properties of the materials encountered.

Geophysical surveys, consisting of cross-hole seismic tomography between eight pairs of boreholes and two longitudinal passive seismic tomography experiments parallel to Mallorca Street, were conducted to supplement the borehole explorations.

Lastly, tests were conducted at INTEMAC's Central Laboratory on the samples removed from the boreholes to complete the geotechnical characterisation of the soils in the units sampled.

The characteristics of the soil deduced from these surveys are discussed in Section 5.

C) Instrumental monitoring

The temple was instrumented to gather information on the monument's own movements, vibrations and accelerations with a view to subsequent monitoring during construction. The instruments were installed essentially to:

- take vibration readings
- monitor topographic variables, both manually and automatically, at numerous points both inside and outside the temple
- take acceleration readings (see Figure 8).



Accelerometer with its protective casing
Vista de uno de los acelerómetros colocados,
con su carcasa protectora



Data acquisition and control unit
Vista del equipo de adquisición y control

Figure 8: Acceleration-measuring instrumentation installed by INTEMAC at various sites on the temple (Data were continuously recorded throughout the inquiry, until tunnelling was concluded alongside the temple and the TBM was at a sufficient distance from the monument.)

Figura 8: Instrumentación para medida de aceleraciones dispuesta por INTEMAC en diferentes puntos del Templo. Se realizó un registro continuo durante el periodo de realización del estudio y se continuó hasta que la tuneladora pasó frente al Templo y se alejó suficientemente del mismo

Tras analizar esta información, INTEMAC consideró oportuno efectuar otros trabajos de reconocimiento adicionales.

Se llevaron a cabo un total de diecinueve sondeos mecánicos con recuperación de testigo y cuatro sondeos exclusivamente para la instalación de piezómetros en su interior.

Además, se efectuó un total de cuarenta y ocho (48) ensayos presiométricos a distintas profundidades, y en un sondeo (sondeo S-E), también a distintas profundidades (comprendidas entre 0 m y 36 m), se realizaron ensayos dilatómétricos Marchetti (DMT).

Por otra parte, para la determinación de las propiedades hidrogeológicas de los distintos materiales detectados, se efectuaron ensayos específicos de permeabilidad in situ tipo Lefranc y de fondo (Gilg-Gavard), de carga constante y variable en el interior de los sondeos.

Complementariamente al reconocimiento efectuado mediante sondeos mecánicos se efectuaron prospecciones geofísicas, consistentes en ocho perfiles de sísmica cross-hole entre parejas de sondeos y dos perfiles de sísmica pasiva longitudinales a la calle Mallorca.

Por último, para completar la caracterización geotécnica de los suelos de las distintas unidades diferenciadas, se realizaron ensayos en el Laboratorio Central de INTEMAC sobre las muestras obtenidas en los sondeos.

En el Apartado 5 se exponen las características del terreno deducidas de los trabajos realizados.

C) Auscultación

Para conocer los movimientos propios del Templo y las vibraciones y aceleraciones, de cara a obtener información suficiente para el seguimiento posterior de la obra, se realizó una auscultación del Templo, consistente básicamente en:

- Medidas de vibraciones.
- Seguimiento topográfico, tanto manual como robotizada, en una amplia muestra de puntos tanto del interior como del exterior del Templo.
- Medidas de aceleraciones (obsérvese la Figura nº 8).

Posteriormente, antes del paso de la tuneladora y también con posterioridad a dicho paso se llevó a cabo una instrumentación complementaria en el interior del Templo, mediante nivelaciones de precisión en el arranque de las columnas más próximas a la calle Mallorca, instrumentación de algunas de las fisuras y juntas más relevantes, etc. Esta instrumentación en el interior del Templo fue realizada siguiendo las recomendaciones del Comité de Expertos antes descrito.

5. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO Y CONDICIONES HIDROGEOLÓGICAS

De forma resumida, podemos indicar que el terreno (por debajo de un pequeño espesor de rellenos artificiales, irrelevantes para este estudio), está constituido por un nivel superior de depósitos cuaternarios de carácter predominantemente cohesivo, con un espesor en esta zona variable comprendido entre 7 m y 15 m aproximadamente. Estos depósitos están formados fundamentalmente por arcillas de color rojizo, con zonas de arcillas con gravas, y presentan generalmente un alto grado de carbonatación, siendo frecuentes las partículas o nódulos de carbonato, apareciendo en ocasiones niveles de costras carbonatadas de color claro, de espesor decimétrico pero con reducida continuidad lateral. Estos materiales presentan una consistencia elevada y en general una permeabilidad reducida, inferior a la del sustrato plioceno subyacente que constituye el acuífero de la zona.

A continuación aparece dicho sustrato terciario plioceno, constituido por una sucesión de niveles de espesor métrico o decimétrico de arenas algo arcillosas o arcillosas, y en menor medida, de arcillas arenosas o algo arenosas. Estos materiales, en los que se encuentra el acuífero en esta zona, presentan un carácter predominantemente granular, y por lo tanto, como término medio, presentan una permeabilidad media-alta.

En el entorno del Templo, la superficie piezométrica se situaba entre las cotas 14 y 17 (cota absoluta sobre el nivel del mar). El flujo de las aguas subterráneas tiene en esta zona una dirección aproximada Este-Sureste, y el gradiente medio de dicho flujo alcanza un valor del orden del 1 %.

En la Figura n° 9 se muestra un perfil litológico transversal al templo, por el eje del Crucero, y en la Figura n° 10, un mapa de isolíneas de cotas del nivel piezométrico, de acuerdo con los datos de la fecha de realización del estudio.

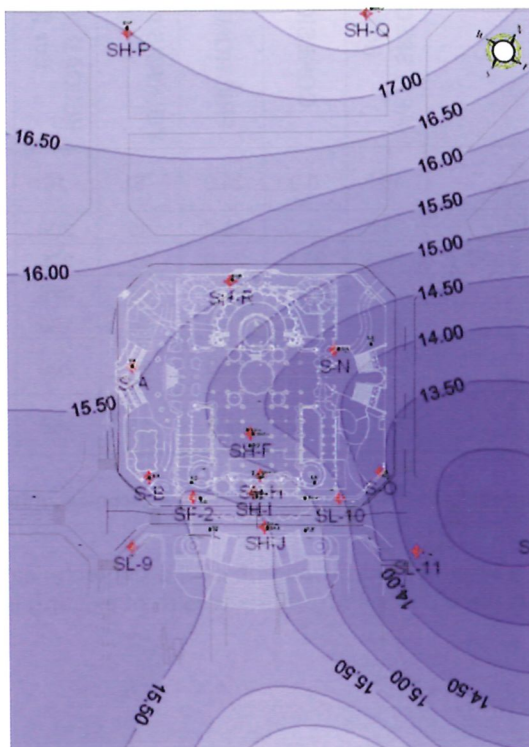


Figura 10: Mapa de isolíneas de posición del nivel piezométrico en cotas absolutas
Figure 10: Contour map showing the piezometric levels in absolute elevations

Con base en los resultados obtenidos en la caracterización geotécnica realizada para el estudio, llevada a cabo a partir de la amplia información existente sobre reconocimientos y ensayos del terreno, se consideraron, a efectos de las comprobaciones de cálculo, los valores característicos de parámetros y propiedades geotécnicas de las distintas unidades geotécnicas que se muestran en la Tabla n° 1:

GEOTECHNICAL UNIT	LITHOLOGIC DESCRIPTION	APP. SPEC. WEIGHT (kN/m ³)	COHESION (kPa)	FRICTION ANGLE (°)	YOUNG'S MODULUS, E' (MPa)	RELOAD MODULUS, Eur (MPa)	SOIL MODULUS, Esubs (MPa)	K=Eur/Ep	v	OCR	k ₀
R	CONCRETE OR CLAY & SAND WITH SOME RUBBLE	18.5	0.0	25.0	5	15	-	3.0	0.3	1.0	0.50
Q1	CLAY WITH SOME GRAVEL	21,3	40.0	26.0	40	200	30	5.0	0.35	1.8	0.75
Q2/ Q4	CLAY & GRAVEL / CLAYEY SAND	21,3	35.0	27.0	55	275	55	5.0	0.35	1.8	0.75
Q3	CARBONATE CRUST	21.0	40.0	27.0	55	275	50	5.0	0.35	1.8	0.75
T1	SANDY CLAY	20,6	40.0	29.0	40	120	35	3.0	0.30	5.0	1.10
T2	MODERATELY CLAYEY SAND TO CLAYEY SAND	20,1	5.0	34.0	50	200	37	4.0	0.30	5.0	1.10
T3	SUCCESSION OF CLAY & SAND LAYERS	20,3	25.0	32.0	45	158	35	3.5	0.30	5.0	1.10

Table 1: Summary of characteristics for the geotechnical units identified

The characteristic values for the parameters and properties of the geotechnical units used in the calculations are given in Table 1 below. These values were deduced from the wealth of existing information on soil studies and tests mentioned earlier.

6. ANALYSES CONDUCTED

The analyses conducted on the interaction between temple works and tunnel construction are discussed briefly below.

A) Possible impact of pile wall construction on the temple

INTEMAC used three-dimensional numerical models (see Figure 11) to estimate soil movements generated by pile construction, including excavation, concrete casting and subsequent setting.

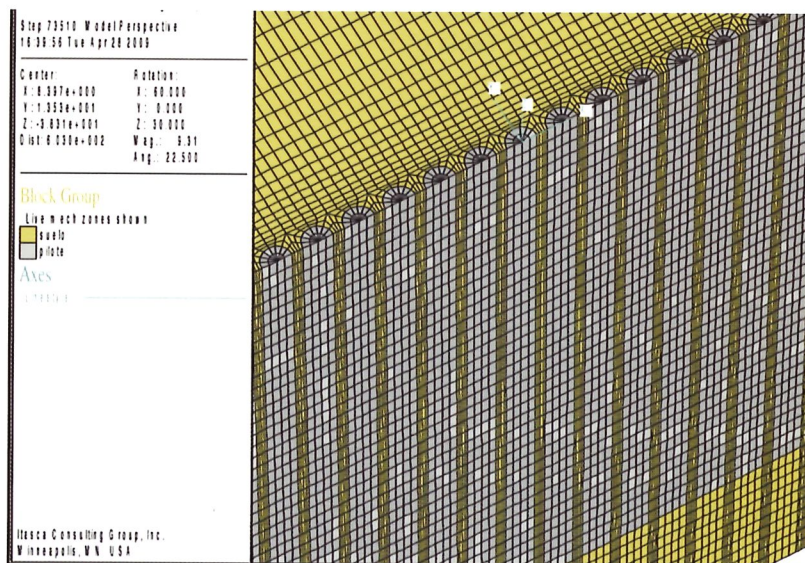


Figure 11: Three-dimensional model to analyse possible effect of pile wall construction on the soil

Figura 11: Modelo tridimensional del terreno para análisis de la posible influencia de la ejecución de la pantalla de pilotes

UNIDAD GEOTÉCNICA	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	PESO ESP. AP. (kN/m ³)	COHESIÓN (kPa)	ÁNG. ROZ. INT (°)	MÓDULO DE YOUNG, E' (MPa)	MÓDULO DE RECARGA, Eur (MPa)	MÓDULO DE DEFORMACIÓN EN EXTENSIÓN, Esubs (MPa)	K=Eur/Ep	ν	O.C.R.	k_0
R	HORMIGÓN O ARCILLAS Y ARENAS CON ALGÚN ESCOMBRO	18,5	0,0	25,0	5	15	-	3,0	0,3	1,0	0,50
Q1	ARCILLAS CON ALGUNA GRAVA	21,3	40,0	26,0	40	200	30	5,0	0,35	1,8	0,75
Q2/ Q4	ARCILLAS Y GRAVAS/ ARENAS ARCILLOSAS	21,3	35,0	27,0	55	275	55	5,0	0,35	1,8	0,75
Q3	COSTRA CARBONATADA	21,0	40,0	27,0	55	275	50	5,0	0,35	1,8	0,75
T1	ARCILLAS ARENOSAS	20,6	40,0	29,0	40	120	35	3,0	0,30	5,0	1,10
T2	ARENAS ALGO ARCILLOSAS A ARCILLOSAS	20,1	5,0	34,0	50	200	37	4,0	0,30	5,0	1,10
T3	SUCESIÓN DE NIVELES DE ARCILLAS Y ARENAS	20,3	25,0	32,0	45	158	35	3,5	0,30	5,0	1,10

Tabla 1: Tabla resumen de las características las unidades geotécnicas establecidas

6. ANÁLISIS REALIZADOS

Se exponen a continuación de forma resumida los análisis efectuados sobre la interacción entre las obras del Templo y el Túnel.

A) Sobre la posible influencia de la ejecución de la pantalla en el Templo

Para la estimación de los movimientos originados por la ejecución de los pilotes INTEMAC llevó a cabo modelos tridimensionales de cálculo del terreno (ver Figura nº 11), en los que se modelizaron además las diferentes secuencias de ejecución (el efecto de la excavación, el hormigonado y posterior fraguado de los pilotes).

De estos análisis se deducía que la ejecución de la pantalla no influiría en el Templo. Para asegurar la menor afección posible, la solución más adecuada desde el punto de vista constructivo era la ejecución de la perforación con el empleo de lodos, si bien en la parte superior (la zona más afectada por la existencia de posibles galerías y conducciones y más solicitada por la concentración de maquinaria), la perforación se debía hacer al amparo de una entubación no recuperable, dejándola perdida en el interior del pilote se debería introducir hasta una profundidad no inferior a entre 10 m y 12 m (11 m fue lo finalmente establecido). Este procedimiento, para el que se dieron algunas pautas y recomendaciones, fue el finalmente elegido.

No obstante, algunos de los aspectos relativos a dicha conclusión exigían una verificación por medio de una muestra suficientemente representativa de pilotes de prueba.

B) Sobre el procedimiento constructivo de la pantalla. Ejecución de pilotes de prueba

Dada la complejidad de la pantalla, con pilotes de 1,50 m de diámetro separados 0,50 m entre sí, y con una exigencia de verticalidad e integridad muy importante, INTEMAC analizó el procedimiento constructivo de la pantalla, estableciendo recomendaciones al mismo.

La verificación de algunos de los aspectos constructivos de la pantalla (verticalidad, integridad de las paredes de la excavación de manera que se mantuviese la sección del pilote en profundidad, afección al terreno durante la ejecución, niveles de vibraciones que se producen, etc.) exigía, en opinión de INTEMAC, la realización de una serie de pilotes de prueba en una zona suficientemente alejada del Templo como para descartar cualquier tipo de afección a éste.

The conclusion drawn from these analyses was that pile construction would not affect the temple. To ensure the lowest possible impact, the most appropriate solution was found to consist of filling the bores with slurry, although the upper few metres of the holes (the area most affected by the existence of possible galleries and ductways and under greatest stress due to the loads generated by the machinery) would have to be cased with sacrificial tubing to a depth of no less than 10 to 12 m (11 m was the depth finally established). This was the procedure ultimately chosen and implemented in accordance with the guidelines and recommendations provided.

Nonetheless, some of the key issues leading to that conclusion had to be verified by building a series of sufficiently representative test piles.

B) Pile wall construction procedures. Test pile construction

Given the complexity of the wall, with 1.50-m diameter piles spaced at 0.50 m and very demanding verticality and integrity requirements, INTEMAC analysed the construction process proposed and made a number of recommendations in this regard.

In INTEMAC's opinion, a series of test piles would have to be built in an area far enough away from the Temple to rule out any possible impact on the monument to ensure that the wall could be built to design in terms of verticality, integrity of the sides of the excavation for pile section uniformity along the entire depth, impact on the soil during construction and vibration levels.

This recommendation was implemented and the test piles were in fact constructed on the Sants end of the wall (see Figure 12). The items monitored while these piles were under construction included the nature of the excavated soil, verticality and integrity of the excavation (using a Kodan ultrasonic drilling monitor, see Figure 13), the suitability of the facilities for the supply and regeneration of slurry, reinforcement positioning and concrete casting, and pile integrity using cross-hole techniques. Pressure cells and inclinometers were also installed to ensure that the vibrations generated and the movements induced in the soil were negligible (see Figure 12).

After these test piles were built to the required quality and their construction was observed to cause no alteration whatsoever in the surrounding soil or generate any perceptible vibrations, INTEMAC reported that it deemed the construction procedure to be valid.

C) Possible impact of the pile wall on the hydrogeology of the surrounding area

The wall envisaged, with piles spaced at 0.50 m between sides, is a discontinuous (and consequently a permeable) element. That notwithstanding, prior to pile construction INTEMAC ran an exhaustive analysis of the possible impact of the wall on the hydrogeology of the soil that supports the temple.

In this analysis, a three-dimensional numerical model of the soil was developed with FLAC3D software for an area measuring 600 m in the direction parallel to the wall and 300 m in the perpendicular direction (see Figure 14). The wall was entered in the model along with the other structures in the subsoil: the foundations under the temple's own Glory Façade, a Barcelona underground tunnel and station under Marina Street adjacent to the temple's Nativity Façade, and the high speed rail tunnel.

All the data gathered during the inquiry on matters such as water table position and slope and soil permeability values were likewise entered in the model.

A tal efecto, se efectuaron una serie de pilotes de prueba. Se eligieron, de entre los previstos en la pantalla, los del extremo más próximo al lado Sants (ver Figura nº 12). Durante la ejecución de estos pilotes se comprobaron aspectos tales como la naturaleza del terreno excavado, la verticalidad e integridad de la excavación (empleando la técnica de ultrasonidos *Koden*, ver Figura 13), la idoneidad de las instalaciones para el suministro y regeneración de lodos, la puesta en obra de la armadura y el hormigón, la integridad de los pilotes mediante técnicas *Cross-Hole*, la verificación de que las vibraciones generadas en el proceso eran despreciables, y que también lo eran los movimientos inducidos en el terreno (para lo cual se dispusieron células de presión e inclinómetros, etc.) obsérvese la misma Figura nº 10.

Una vez verificado el que estos pilotes de prueba se efectuaron con la calidad exigible y que su ejecución no alteraba en modo alguno el entorno ni generaba niveles de vibraciones apreciables, INTEMAC informó validando el proceso constructivo.

C) Sobre la posible afección de la pantalla al entorno hidrogeológico

La tipología de pantalla prevista, a base de pilotes con una separación entre caras de 0,50 m, constituye un elemento discontinuo, y por lo tanto permeable. Esto no obstante, INTEMAC había llevado a cabo previamente a la ejecución de los pilotes de prueba un análisis riguroso sobre la posible afección que la pantalla podría provocar en el entorno hidrogeológico del terreno sobre el que se encuentra el Templo.

Para este análisis se confeccionó un modelo numérico tridimensional del terreno con el programa FLAC3D, con una longitud total de 600 m en la dirección paralela a la pantalla y 300 m en la dirección perpendicular (ver Figura nº 14). El modelo incluía tanto la pantalla como otras estructuras existentes en el subsuelo en el entorno del Templo, como son la cimentación de la Fachada de la Gloria del propio Templo, el túnel de la Línea 2 de Metro de Barcelona que discurre paralelo a la Fachada del Nacimiento por la calle de la Marina adyacente al Templo (incluida la estación de dicha Línea de Metro situada frente al Templo), el propio Túnel de la Línea de Alta Velocidad,...

En este modelo se introdujeron todos los datos recabados en la investigación realizada en cuanto a posición y gradiente del nivel freático, permeabilidades del terreno, etc.

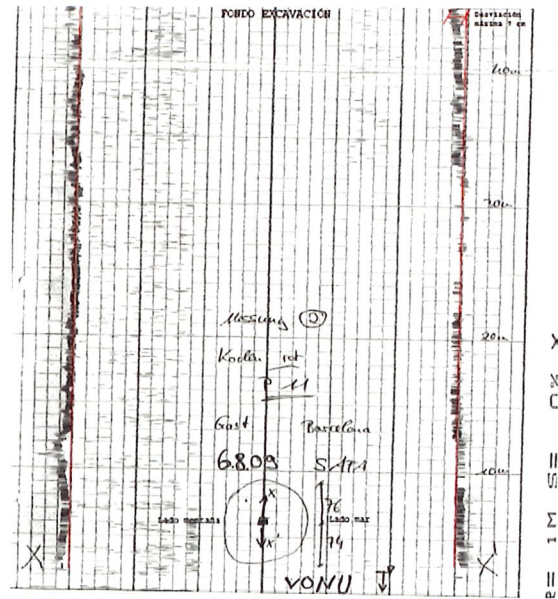


Vista de una de las fases de la ejecución
Pile wall construction



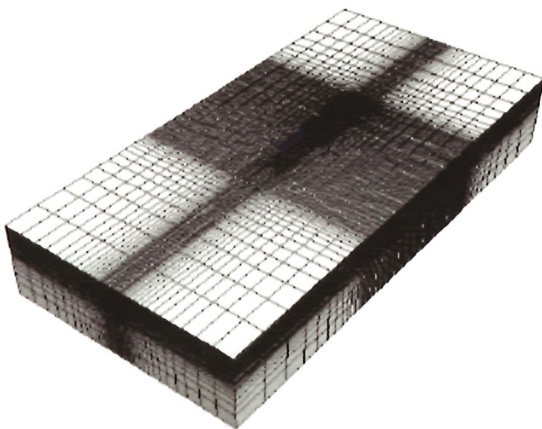
Control de vibraciones
Vibration monitoring

Figure 12: Test piles
Figura 12: Pilotes de prueba

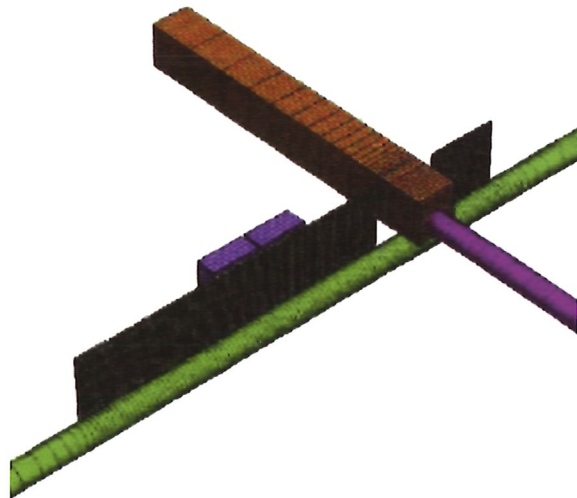


Verification of excavation verticality and integrity with Koden drilling monitor
 Verificación de la integridad y verticalidad de la excavación mediante el sistema Koden

Figure 13: Test piles
Figura 13: Pilotes de prueba



Overview of model
 Vista general del modelo



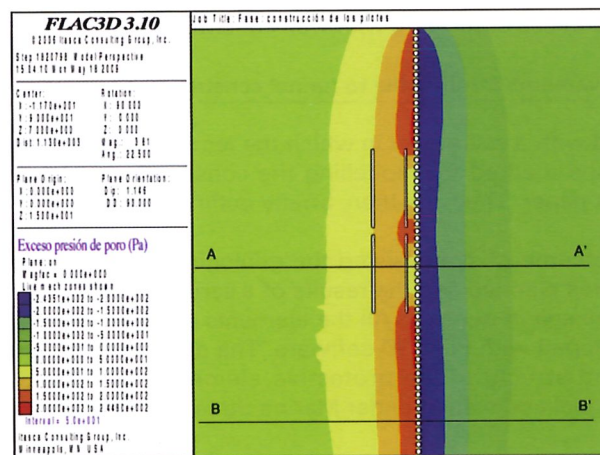
Modelled structures
 Vista de las estructuras modelizadas

Figure 14: Model used to analyse the possible impact of the wall on the surrounding hydrogeology
Figura 14: Vista del modelo empleado para el análisis de la posible influencia de la pantalla en la hidrogeología del entorno

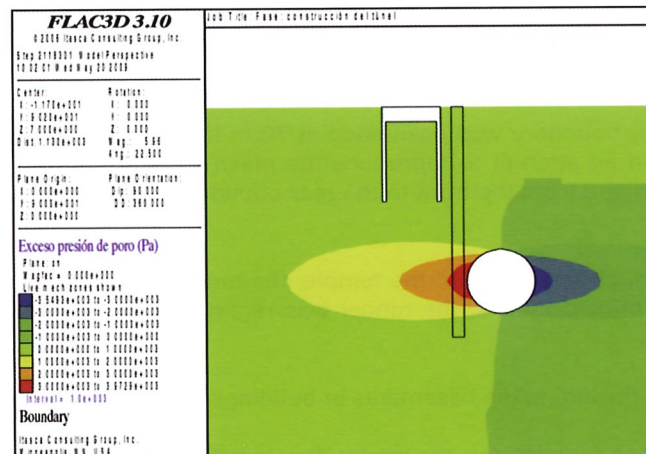
The model also included the stratigraphic characteristics and distribution deduced from the geotechnical survey. Each level was assigned the horizontal and vertical permeability values deduced during the preliminary research, while the position and slope of the water table established on those same grounds were also taken into consideration. To enlarge the margin of safety, the slope, which was actually oblique, was assumed to be normal to the wall.

El modelo incluía las características y distribución estratigráfica deducidas de los trabajos de investigación geotécnica. A cada nivel se le asignaron las permeabilidades, tanto en horizontal como en vertical, que se dedujeron de los trabajos de investigación realizados. Se tuvo en cuenta la posición del nivel freático y su gradiente de acuerdo con la amplia investigación realizada al efecto. Del lado de la seguridad, se supuso dicho gradiente ortogonal a la pantalla (en realidad es oblicuo a ésta)

Los resultados indicaban que, tanto por la pantalla como por el túnel, las variaciones en el nivel freático era sólo centimétricas y por lo tanto no afectaría a las condiciones hidrogeológicas del entorno. En la Figura nº 15, se muestra la variación de presiones de poro obtenidas en cálculo originadas por las obras de la línea de alta velocidad. Así, por efecto de la construcción de dicha pantalla, se producen modificaciones en la presión de poro de magnitud muy pequeña. A efectos prácticos, ello se traduce en que en las inmediaciones de la cimentación del Pórtico de la Gloria se obtiene un ascenso del nivel freático máximo de 2,6 cm aguas arriba, y un descenso de 2,5 cm aguas abajo. La construcción del túnel, de acuerdo con las comprobaciones de cálculo, da lugar a modificaciones de presión de poro algo mayores (valores máximos del orden de 4 Kpa en la zona de hastiales), pero que se traducen en variaciones de la posición del nivel freático a nivel de base de cimentación del Pórtico de la Gloria de sólo 3 cm.



Efecto de la construcción de la pantalla de protección (planta a cota de base de cimentación del Pórtico de la Gloria)
Effect of protective wall construction (at the bottom of the Glory Façade foundations)



Efecto de la construcción del túnel (sección)
Effect of tunnel excavation (cross-section)

Figura 15: Variación de presiones de poro en una sección vertical producidas por las obras de la línea de alta velocidad
Figure 15: High speed rail-induced variations in pore pressure in a vertical cross-section

The findings showed that the variations generated in the groundwater level by both the wall and the tunnel could be measured in centimetres and would consequently not affect area hydrogeology. Figure 14 shows the variation in pore pressure values induced by the high speed rail line as obtained with the model. The findings indicated that the change in pore pressure as a result of building the wall was very small. For practical purposes, this translated into a maximum rise in the water table upstream of the Glory Façade of 2.6 cm and a decline in the water level downstream of the façade of 2.5 cm. While according to the model calculations, tunnel excavation per se would give rise to somewhat greater pore pressure changes (maximum values on the order of 4 KPa on the outer edge of the wall), these variations would translate into a mere 3-cm change in the position of the water table around the bottom of the Glory Façade foundations.

Moreover, the surrounding soil had been pre-consolidated and exhibited a medium-high consistency and compactness. Consequently it was scantily prone to significant deformation as a result of fluctuations in the groundwater level. At the depth of the temple foundations, the soil is subject to no significant risk of volumetric change due to the internal instability associated with variations in moisture.

Another factor assessed in this analysis was the long- and short-term trends in groundwater levels in Barcelona. The magnitude of both the seasonal fluctuations and especially of the variations over the last few decades proved to be much greater than the differences associated with wall construction.

D) Soil and temple foundation movements attributable to tunnel construction

The calculations were performed with a soil model in which the temple structure was also included. Given the complexity of the model itself and the method for modelling the construction procedure, a full description would be much too lengthy for the present paper. They are, then, briefly outlined below.

The soil model used was the outcome of synthesising the geological-geotechnical information on the soil, all the structures and protective measures planned and the results of a series of parametric analyses conducted to suitably calibrate the characteristics of the soil in question. All the elements and structures present in the area were entered into the model, which was developed with FLAC3D software. The elements and structures included were: the Holy Family Temple foundations and structure, the protective elements envisaged (especially the pile wall), the Barcelona line 2 underground tunnel and station under Marina Street, and the railway tunnel itself (see Figure 16).

Furthermore, the geological, geotechnical and hydrogeological characteristics of the soil were reproduced, based on both the geotechnical survey conducted specifically for this inquiry and prior information.

The model boundaries were situated far enough away from the area under study to ensure that they would not affect the results. Horizontally, in the direction perpendicular to the tunnel, the mountain-side boundary (closest to the temple) was positioned at 140 m and the sea-side boundary at 100 m from the tunnel centreline. Longitudinally, the total model length was established at 290 m so that neither the front nor the rear boundary could affect the results of the calculations.

Vertically, the lower, horizontal boundary was positioned at 70 m from the tunnel, while the incline on the upper boundary was made to vary in an attempt to reproduce the mean slope in the terrain in this area of Barcelona, declining slightly both seaward and from the front to the rear boundary. Vertical displacements were established at the lower boundary.

On a cross-section cutting through the centre of the temple, the tunnel centreline was 31.85 m below the surface. For the intents and purposes of calculations, the tunnel was regarded to be horizontal throughout the area concerned.

The effect of nearby structures (including the basements of buildings that had them) was also entered in the model.

To enter the temple structure and foundations, the model developed was calibrated and subsequently adapted with ANSYS® software as described in item E) below for subsequent integration into the soil model. The result was a comprehensive soil-foundations-structure model able to suitably analyse the interaction among these elements (see Figure 17).

The effect of nearby buildings was likewise entered, modelling not only their basements as mentioned above, but also the loads transmitted to the soil.

Independientemente debe tenerse en cuenta que los terrenos del entorno corresponden a materiales preconsolidados, de consistencia y/o compacidad media a alta, y por lo tanto poco sensibles a que las oscilaciones en los niveles freáticos se tradujeran en deformaciones significativas. Por otro lado, los terrenos existentes en los niveles en los que está cimentado el Templo no presentan riesgo relevante de sufrir cambios volumétricos por procesos de inestabilidad interna asociados a modificaciones de humedad.

Se valoró además el hecho de las oscilaciones que han experimentado los niveles freáticos en Barcelona en las últimas décadas, así como las variaciones periódicas estacionales, cuya magnitud, especialmente las primeras, han sido muy superiores a las oscilaciones que se podrían producir en la zona, asociadas a la construcción de la pantalla.

D) Cálculo de movimientos en el terreno y cimentaciones del Templo por la ejecución del Túnel

Los cálculos se realizaron apoyándonos en un modelo del terreno en el que, además, se incluyó la estructura del Templo. La descripción de este modelo y de cómo modelizó en éste el proceso constructivo es muy compleja y su extensión es incompatible con el alcance del presente documento. Pasamos a continuación a resumir a grandes rasgos los citados aspectos.

El modelo del terreno empleado es el resultado de la síntesis de la información geológica-geotécnica del terreno, del conjunto de estructuras y medidas de protección previstas, y de los resultados de unos análisis paramétricos realizados para calibrar adecuadamente las características del terreno. Este modelo de cálculo fue desarrollado con el programa FLAC3D, y para llevar a cabo este análisis se introdujeron todos los elementos y estructuras presentes en la zona: cimentación y estructura del Templo de la Sagrada Familia, elementos de protección previstos (particularmente la pantalla de pilotes), e incluso la estación y Túnel de la Línea 2 de FMB (Ferrocarril Metropolitano de Barcelona) que discurren bajo la calle Marina, así como el propio Túnel (ver Figura nº 16).

Asimismo, se reprodujeron las características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del medio de acuerdo con la investigación geotécnica realizada específicamente para este estudio y con la información previa disponible.

Los contornos del modelo fueron situados lo suficientemente alejados de la zona de estudio como para que los resultados no se viesan afectados por aquellos. En horizontal, en la dirección transversal al eje del Túnel el contorno lado montaña (más próximo al Templo) se sitúa a 140 m del eje del Túnel, y el lado mar a 100 m del eje. En la dirección longitudinal el modelo tenía una longitud total de 290 m, de forma que tanto el contorno anterior como el posterior no influyesen en los resultados del cálculo.

En la dirección vertical, el contorno inferior del modelo era horizontal y se situaba a 70 m del eje del Túnel, mientras que el contorno superior presentaba una inclinación variable, tratando de reproducir la inclinación media de la superficie del terreno en esta zona de Barcelona, con una ligera pendiente buzando hacia el lado mar y del contorno anterior al posterior. En el contorno inferior se fijaron los desplazamientos verticales.

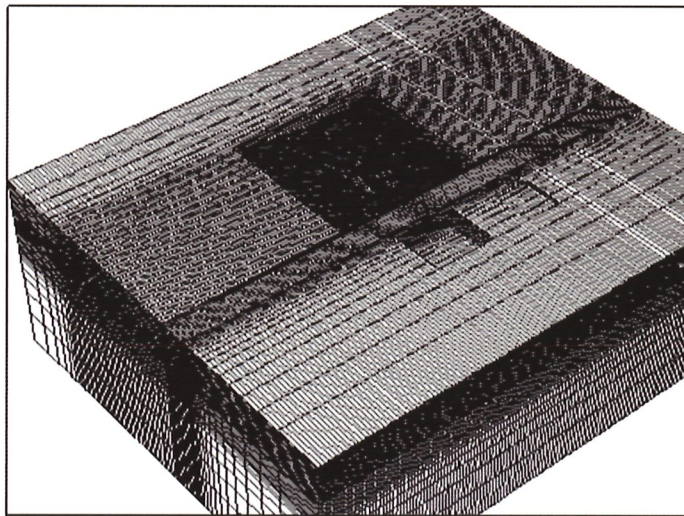
La profundidad del eje del Túnel en una sección transversal por el centro del Templo es de 31,85 m respecto a la superficie en dicho punto. A efectos de cálculo, se consideró que el eje del Túnel es horizontal en todo el dominio.

En el modelo se incluyeron también el efecto de las construcciones próximas (incluidos los sótanos de aquellos edificios que cuentan con ellos).

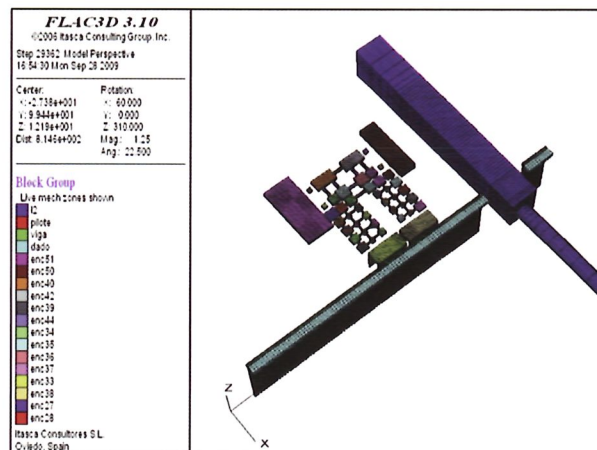
La cimentación y la estructura del Templo se incluyeron también en el modelo. Para ello se adaptó el modelo desarrollado con el programa ANSYS® según se explica en el Apartado E siguiente, una vez calibrado, para integrarlo en el modelo del terreno. Como resultado se obtuvo un modelo integral terreno-cimentación-estructura que permitiese un adecuado análisis de la interacción entre dichos elementos (ver Figura nº 17).

También fue introducido el efecto de edificaciones próximas, modelizando no sólo sus plantas de sótano como ya se ha indicado anteriormente, sino también las cargas que introducen en el terreno.

Examples of the FLAC3D models results are shown in Figures 15 and 16.



Overview of model
Vista general del modelo



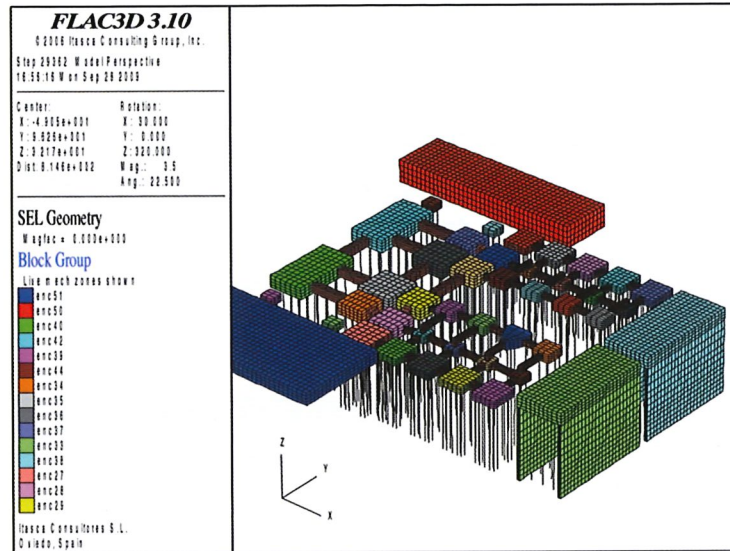
Detail of model structures
Detalle de las estructuras incluidas en el modelo

Figure 16: Soil model with underground structures added
Figura 16: Vistas de la parte geotécnica del modelo y de las estructuras subterráneas incluidas

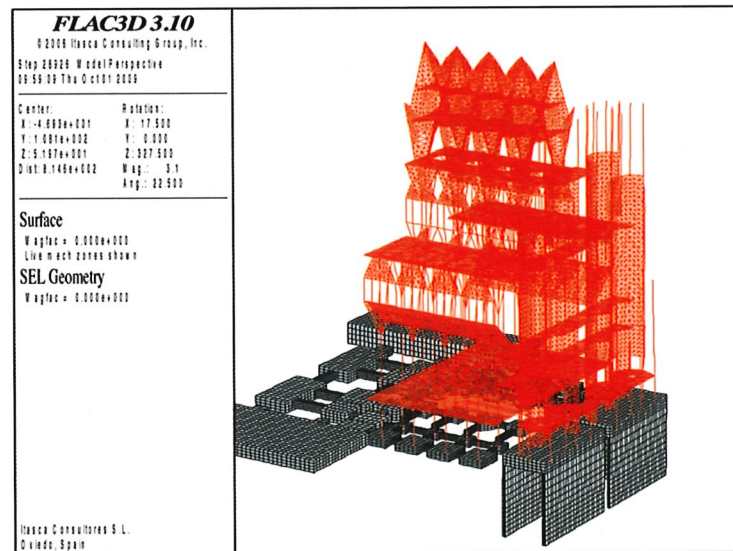
This was the model used to analyse tunnel construction. Broadly speaking, in the simulation of construction with an EPB tunnel-boring machine, the forward progress of the machine was assumed to be discontinuous and to consist of the instantaneous excavation of cylindrical tunnel sections of a length equal to the length of the segmental lining rings. Each discontinuous excavation step was divided into three consecutive sub-steps: application of the newly excavated face of a total pressure equal to the earth pressure in the EPB excavation chamber; forward movement of the shield skin to the working face; and deployment of the mesh elements that simulated both the segment ring and tail-skin grouting between the soil and the outer surface of the liners.

Another consideration factored into the model was that the EPB machine used in tunnel construction injected bentonite through a series of holes in the shield body to reduce the gap between the soil and the skin and therefore minimise settlement. This reduction in volume of the EPB-soil gap was accounted for in the model by increasing the

En las figuras 15 y 16 se muestran unas vistas del modelo FLAC 3D establecido.



Vista de perspectiva de los elementos cimentación
Perspective view of foundation members



Modelo estructural de FLAC3D y conexión con la cimentación
FLAC3D structural model showing connection to foundations

Figura 17: Vistas de la cimentación y estructura incluidas en el modelo general
Figure 17: Foundations and structure integrated into the general model

En este modelo se analizó el proceso constructivo del Túnel. A grandes rasgos, la simulación del proceso constructivo mediante la tuneladora de tipo EPB empleada se realizó suponiendo que el avance es discontinuo, excavando de forma instantánea cilindros de Túnel de longitud igual a la de los anillos del revestimiento. Para cada uno de estos pases discontinuos de excavación se modelizó sucesivamente la aplicación, en el frente recién excavado, de una presión total correspondiente a la presión de tierras en la cámara de excavación de la EPB, el avance de la coraza del escudo hasta el frente de excavación y la activación de los elementos del mallado que simulaban tanto el anillo de dovelas como la inyección continua de mortero por la cola del escudo entre el terreno y el extradós de las

dimensions of the TBM at both the head and tail, thus reducing the existing gaps. The adjustment of the stress-strain effects in the model translated into increased strain around the gap created and greater stresses on the shield and lining segments (see Figures 18 and 19).

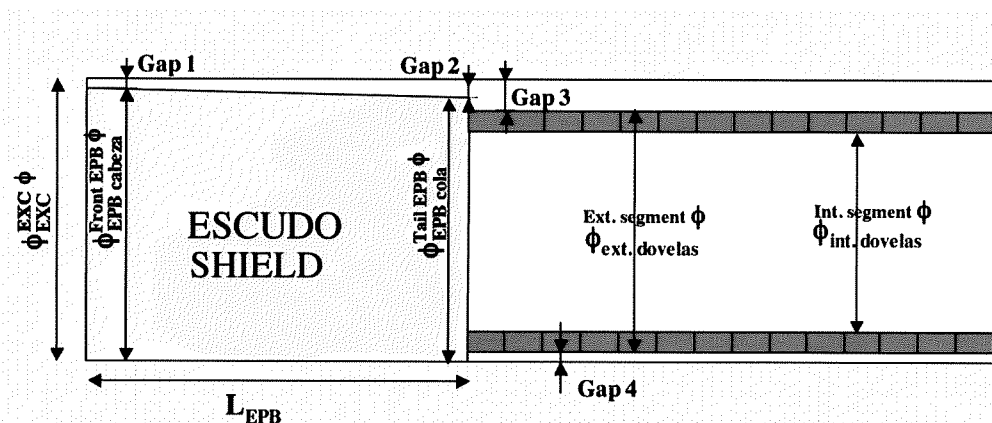


Figure 18: Idealised geometry of the tunnel face area
 Figura 18: Geometría idealizada del entorno del frente del Túnel

The working face was exposed to earth pressure, which in the model was defined as a horizontal mechanical pressure. The conditions assumed in the shield tail were the expected EPB working conditions, with continuous grout injection from the shield that completely filled the gap generated.

The model was developed by stages. After entering the initial soil stress conditions, underground line 2 was included in the model and the loads from the buildings adjacent to the Holy Family Temple were added. In the next stage, the data on the temple foundations and the part of the structure in place during tunnel construction (Glory Façade and main nave) were entered. The loads applied to the foundation members were the loads transmitted by the structure at that time. Lastly, the protective measures envisaged in the design were included and tunnel excavation was modelled.

A total of 130 calculation steps were required to model construction of the entire tunnel. Each step included excavation; the application to the recently excavated face of the same amount of pressure as the total earth pressure on the EPB excavation chamber; the advance of the shield skin to the working face; and, after the advance of the shield, activation of the mesh elements that simulated both the segment ring and the continuous tail-skin grouting in the space between the soil and the outer surface of the lining segments.

In the preceding description the EPB was assumed to operate to standard. Nonetheless, INTEMAC also analysed a number of exceptional situations (assuming accidents) which, while highly unlikely, might have arisen, to determine whether the protective measures envisaged in the design (pile wall) would have effectively prevented any significant impact on the temple.

The model was also used to predict the consequences of anomalous EPB operation, such as a tail-skin incident in which no bentonite would be injected in any part of the section studied. Other incidents were also analysed, such as anomalous setting of the mortar on the outer surface of the segments, mortar loss, misalignment of the pressure in the chamber due to mechanical or geotechnical contingencies or total loss of pressure in the chamber.

The possible interaction between the completed tunnel and the temple after conclusion of the works was analysed as well.

The possible impact of tunnel drainage was likewise explored.

Lastly, soil and temple behaviour were analysed assuming that the temple was completed in the absence of the tunnel and the planned protective and consolidation measures.

dovelas. Se tuvo en cuenta que la máquina EPB empleada en la construcción del Túnel contemplaba la inyección de bentonita por una serie de orificios en el cuerpo del escudo, con la finalidad de reducir el hueco entre el terreno y la coraza (gap) y por tanto reducir los asentamientos en superficie. Esta reducción del volumen del hueco entre el escudo y el terreno se reprodujo en el modelo aumentando las dimensiones de la máquina tuneladora, tanto en la cabeza como en la cola, reduciendo por tanto los "gaps" existentes. Tras estas operaciones, el modelo se sometía a un reajuste tensodeformacional mecánico, lo que se traducía en un incremento de deformaciones alrededor del hueco creado y de las tensiones sobre el escudo y dovelas (ver figuras 18 y 19).

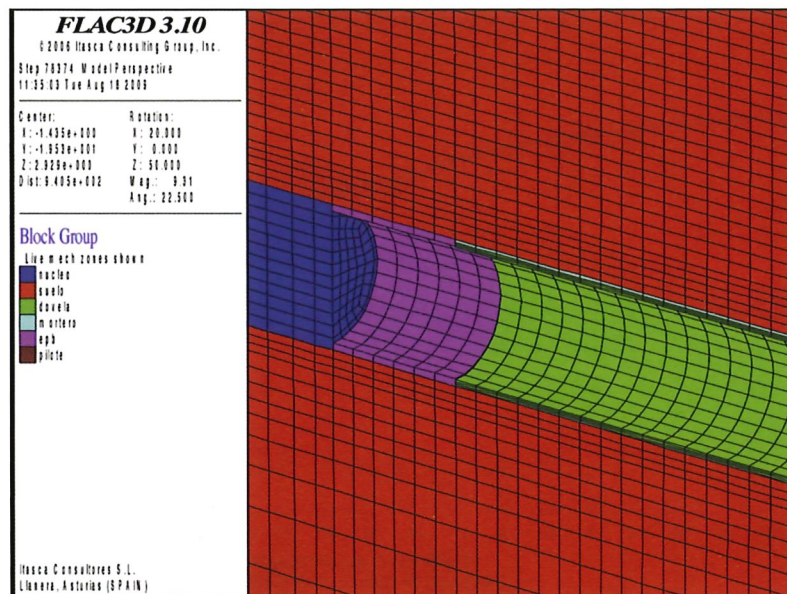


Figura 19: Modelo 3D de cálculo (detalle de la geometría del frente de Túnel, de la máquina EPB y de los anillos de dovelas inyectados)

Figure 19: 3D numerical model (detail of the geometry of the tunnel face, EPB machine and of grouted segment rings)

En el frente de avance se introducía la presión de tierras, que en el modelo se aplicaba como una presión mecánica horizontal. En cola del escudo se adoptaron las condiciones previstas de trabajo para la tuneladora, con la inyección continua de mortero por la cola del escudo que llenaba completamente el hueco creado.

El modelo se desarrolló por fases. Una vez establecidas las condiciones iniciales de tensiones en el terreno, se procedió a la implantación en el modelo de la Línea 2 de Metro y aplicación de las cargas correspondientes a los edificios colindantes al Templo de la Sagrada Familia y, a continuación, a la introducción de la cimentación del Templo y la parte de la estructura que había sido construida hasta el momento y que fue considerada en el modelo (Pórtico de la Gloria y Nave). En los elementos de cimentación se aplicaron las cargas de la estructura que existían hasta ese momento. Por último, antes de modelizar la excavación del Túnel se introdujeron las medidas de protección previstas en el Proyecto.

La excavación completa del Túnel a lo largo de la zona modelizada se desarrollaba en 130 fases de cálculo, como se ha indicado anteriormente cada una de estas fotos incluía la excavación, la aplicación en el frente recién excavado de una presión total correspondiente a la presión de tierras en la cámara de excavación de la EPB, el avance de la coraza del escudo hasta el frente de excavación y tras el avance del escudo, la activación de los elementos del mallado que simulaban tanto el anillo de dovelas como la inyección continua de mortero por la cola del escudo entre el terreno y el extradós de las dovelas.

La descripción antes indicada correspondería a la situación nominal de trabajo de la tuneladora. INTEMAC, sin embargo, analizó diferentes situaciones accidentales que, aunque poco probables, pudieran ocurrir, para verificar que las medidas de protección previstas en el Proyecto (pantalla de pilotes, etc.) se mostraban eficaces de cara a evitar cualquier afección significativa al Templo.

The movements in the soil supporting the foundations were obtained for all these assumptions and the possible impact of such movements on the temple subsequently analysed, as discussed in item E) below.

By way of example, Figure 20 shows the subsidence trough forecast for the soil under the normal tunnelling assumption in a cross-section perpendicular to the tunnel and cutting through the midpoint of the Glory Façade. At no more than 2 mm, the maximum movements observed in the area around the temple can be regarded as negligible (see Figure 21).

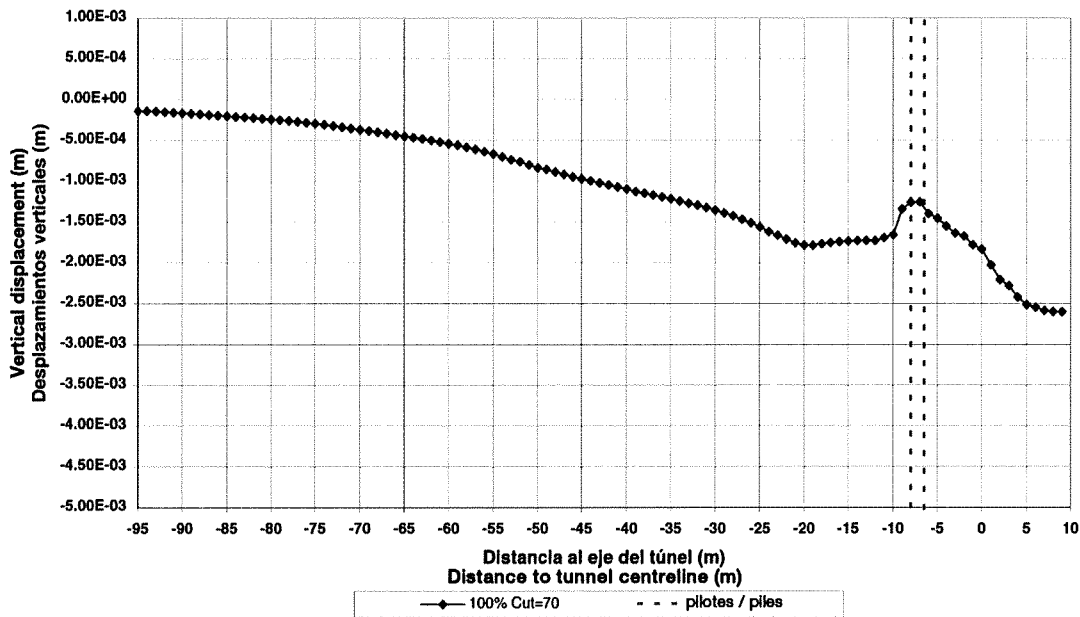


Figure 20: Subsidence trough obtained with the numerical model assuming normal EPB operation along a plane perpendicular to the tunnel, positioned at the midpoint on the Glory Façade

Figura 20: Cubeta de asientos obtenida del modelo de cálculo para la hipótesis de funcionamiento normal de la tuneladora, por un plano perpendicular al Túnel localizado en la mitad de la fachada de la Gloria

E) Analysis of the significance of the soil movements on temple structure

The criterion followed in formulating the numerical model for analysing structural member behaviour in the area studied in response to tunnel construction, in particular for analysing the effect of the movements induced by tunnel boring deduced as described in item D) above, was to trust the designers' judgement, on the grounds that theirs would be the best informed opinion in light of their full and detailed familiarity with the works. That notwithstanding, a few minor adjustments were made after consultations with the 2 BUXADÉ MARGARIT Y FERRANDO, S.L. team of architects responsible for the structural aspects of the temple.

The comprehensive model, developed with ANSYS® software, is depicted in Figure 22.

Así, se analizó también la posibilidad de que la tuneladora trabajase, a lo largo de todo el tramo analizado, sin un funcionamiento adecuado de la inyección de la coraza del escudo. Se consideraron también situaciones accidentales que podrían producirse (problemas de fraguado del mortero de relleno del trasdós de los anillos de dovelas, pérdidas de dicho mortero, desajuste de la presión prevista en la cámara por incidencias mecánicas o geotécnicas, pérdida total de la presión de cámara, ...).

En el modelo se estudió además la posible interacción entre el Túnel ya construido y el Templo, con motivo de la terminación de las obras de éste último.

También se analizó el posible efecto drenaje del Túnel.

Por último, se analizó el comportamiento del terreno y del propio Templo bajo la hipótesis de que éste se construya por completo, sin haberse ejecutado el Túnel ni las medidas previas de protección y consolidación.

Para todas estas hipótesis se obtuvieron los movimientos en el terreno de apoyo de la cimentación, para el posterior análisis de la influencia de tales movimientos en el Templo, aspecto que se comenta en el Punto E siguiente.

A modo de ejemplo, exponemos en la Figura nº 20 mostramos la cubeta de asientos prevista en el terreno para la hipótesis de funcionamiento normal de la tuneladora, en una sección transversal al Túnel en la mitad de la fachada de la Gloria. Como puede observarse los movimiento máximos en la zona del Templo no superaban los 2 mm, movimientos que desde todo punto de vista pueden considerarse despreciables (véase la Figura nº 21).

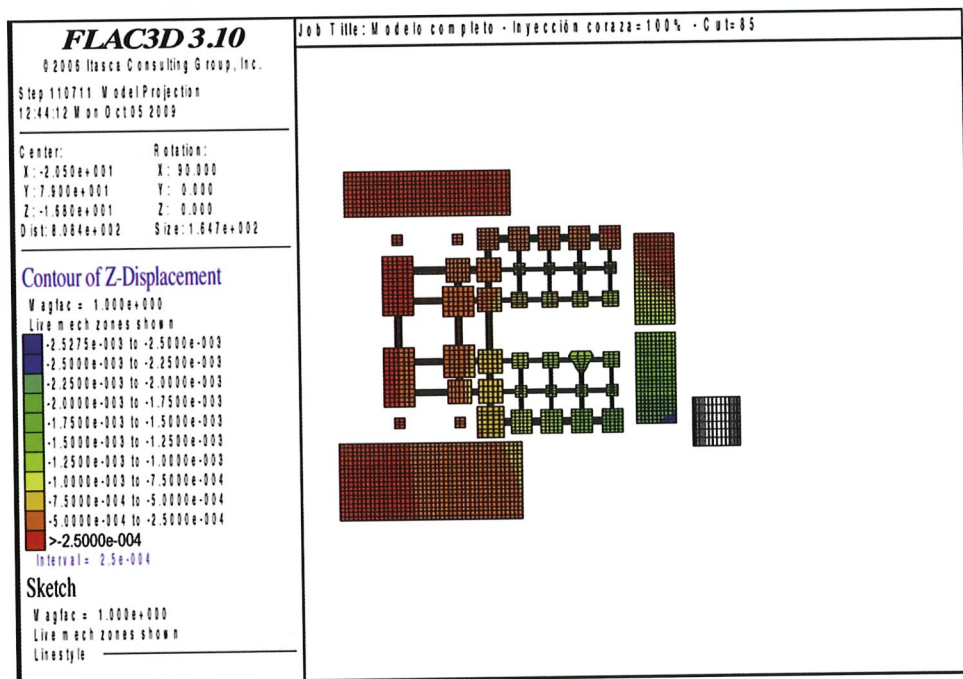


Figura 20: Desplazamientos verticales en la cimentación
Figure 20: Vertical movements in the foundations

E) Análisis de la trascendencia de los movimientos del terreno sobre la estructura del Templo

El criterio seguido al elaborar el modelo de cálculo para el estudio del comportamiento de los elementos estructurales de la zona en estudio ante las obras de construcción del Túnel, en particular para analizar la influencia de los movimientos inducidos por la ejecución del Túnel obtenidos de acuerdo con lo expuesto en el Punto D) anterior, fue el de respetar al máximo los criterios adoptados por el Proyectista, como figura con mayor autoridad por su más completo e íntimo conocimiento de la obra, con algunas matizaciones que fueron comentadas con el equipo de Arquitectos de 2 BUXADÉ, MARGARIT Y FERRANDO, S. L. encargados de los aspectos estructurales del Templo.

El modelo completo se elaboró con el programa ANSYS®, y se representa en la Figura nº 22.

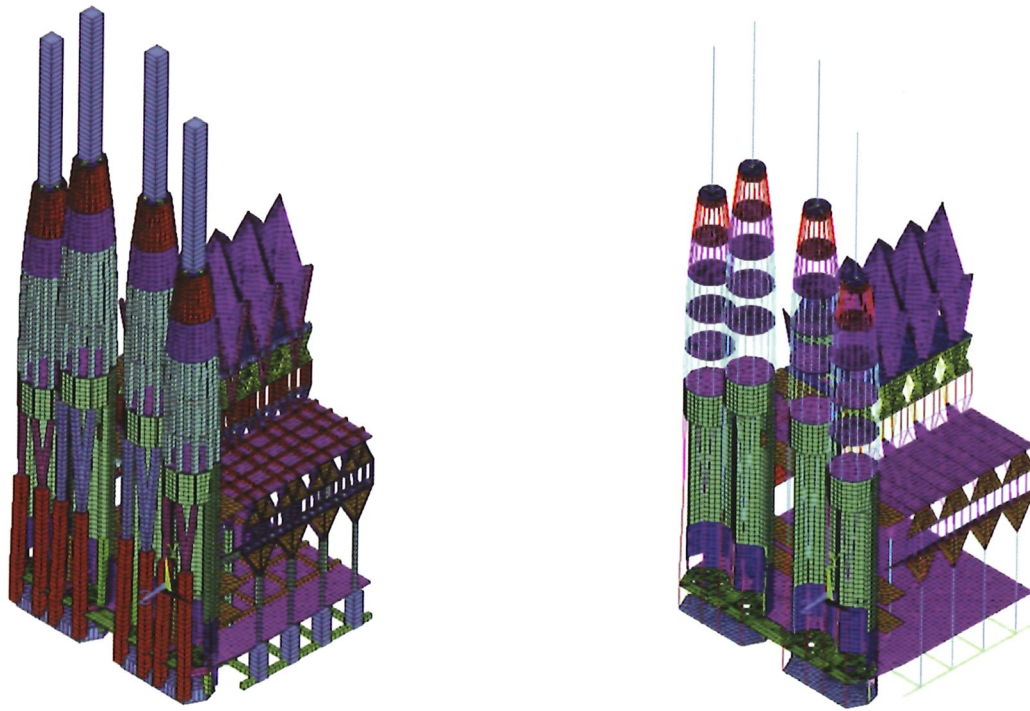


Figure 22: Model developed with ANSYS® software to analyse the temple structure
Figura 22: Vista del modelo desarrollado con el programa ANSYS® para análisis de la estructura del Templo

The temple elements that were not yet in place during tunnel construction were disregarded in this comprehensive model. Broadly speaking, the structures standing at that time included the outer columns on the ground storey and the inner walls on the Glory Façade towers up to the elevation where they receive the vaults over the nave.

With these changes, the model was deemed to be sufficiently accurate to analyse the impact of tunnelling on the temple structure.

The structural models were consequently integrated into the soil and foundation models to calculate the theoretical subsidence under the various construction assumptions described above in item D).

The analysis of the impact of the soil movements on the temple structure conducted with these specific models showed that, even assuming the accidental situations envisaged, tunnelling would be of no structural consequence whatsoever. In fact, the effect of tunnel construction would be absolutely negligible compared to the impact of completing construction of the temple itself. Furthermore, the movements were concentrated primarily in the area around the recently erected Glory Façade (initiated in the nineteen eighties) and nil around the oldest structures.

By contrast, the soil movements calculated for the loads generated by construction of the rest of the temple were not observed to be negligible, particularly in the areas around the crossing and the Glory Façade. For that reason, inasmuch as such movements could have a non-negligible impact on the oldest areas of the temple, INTEMAC deemed that these areas should be inspected for subsequent analysis, and the structure monitored and assessed during temple construction. This recommendation was independent of tunnel construction.

In short, the results of the inquiry on the interaction between tunnel construction and the works to complete the temple can be summarised as set out below.

- The protective elements envisaged in the design, in particular the pile wall, could be built to the required quality and their construction would not alter the temple foundations or the hydrogeology of the surrounding soil.
- The pile wall effectively reduced the movements generated by tunnel construction in the soil on which the temple stands. The movements ultimately generated would not affect temple safety.

A partir de este modelo completo se anularon los elementos correspondientes al Templo que no estaban ejecutados en el momento de la construcción del Túnel. A grandes rasgos en ese momento estaban ejecutados los pilares exteriores en el tramo de Planta Baja y las pantallas interiores de las torres de la Fachada de la Gloria hasta la cota en que se reciben las bóvedas de la Nave.

Con estas modificaciones, consideramos que el modelo resultaba suficientemente preciso para analizar la influencia en la estructura de las obras de ejecución del Túnel.

De esta forma, se anexaron los modelos de la estructura al del terreno y cimentación para el cálculo de las subsidencias teóricas en las diferentes hipótesis de construcción antes indicadas, según se ha explicado en el Punto D anterior.

Del análisis del efecto de los movimientos del terreno obtenidos en la estructura del Templo realizado con estos modelos específicos se deducía que el efecto de la construcción del Túnel, incluso con la consideración de las situaciones accidentales comentadas, no tendría trascendencia estructural alguna. Además, dicho efecto sería absolutamente despreciable en comparación con la influencia que tendrá la finalización de las obras del propio Templo. Además, los movimientos se concentraban en todo caso en las zonas próximas a la fachada de la Gloria, de reciente construcción (iniciada en la década de los ochenta del pasado siglo XX) en relación con el resto de zonas del Templo, anulándose en las zonas más antiguas del mismo.

Sin embargo, los movimientos del terreno calculados para las cargas previstas debidas a la construcción del resto del Templo no resultaban despreciables, especialmente en las zonas en torno al crucero y a la Fachada de la Gloria. Por esta razón, dado que estos movimientos podrían suponer una afectación no despreciable en las zonas de construcción más antiguas, expusimos nuestro convencimiento de que estas zonas debían ser objeto de inspección y posterior análisis, así como de seguimiento y evaluación estructural durante la construcción de las obras del Templo. Este aspecto era independiente de que se construyese o no el Túnel.

En resumen, los resultados del estudio realizado sobre la interacción entre las obras del Túnel y las del Templo pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

- Los elementos de protección previstos en el Proyecto, y en particular la pantalla de pilotes, eran construibles con el nivel de calidad exigible, y su construcción no alteraría las condiciones de cimentación del Templo ni las del entorno hidrogeológico del terreno en el que éste se encuentra.
- La pantalla de pilotes resultaba eficaz en su misión de reducir los movimientos que la construcción del Túnel generaría en el terreno en el que se encuentra el Templo. Así, los movimientos que se producirían no afectarían a las condiciones de seguridad del Templo.
- Los movimientos que la construcción del Túnel inducía en el Templo en situación nominal de construcción eran de magnitud muy reducida (inferiores a 2 mm), y por lo tanto resultaban irrelevantes para el Templo desde cualquier punto de vista.
- Sólo en la hipótesis de que ocurriese alguna anomalía en el proceso de construcción del Túnel podría producirse una ligera fisuración y/o una leve evolución en las lesiones aisladas que presentaba el Templo, siempre sin afectar en modo alguno a sus condiciones de seguridad.

Para minimizar el riesgo de que se produjeran anomalías en la ejecución del Túnel se expusieron unas recomendaciones que básicamente buscaban asegurar que los procedimientos constructivos se ajustasen a los modelos teóricos adoptados el proceso constructivo, para lo cual debía contarse (como así se hizo) con un equipo humano y tecnológico dentro de las más altas cotas de preparación y desarrollo, estableciendo en paralelo un sistema de control de obra que garantizase el ajuste a las hipótesis establecidas.

7. SEGUIMIENTO DURANTE EL PASO DE LA TUNELADORA FRENTE AL TEMPLO

A continuación exponemos los resultados de la extensa instrumentación dispuesta en el Templo y su entorno durante el paso de la Tuneladora y en los meses posteriores.

-
- The movements induced by tunnel construction assuming normal operation were too small (less than 2 mm) to have any significant effect on the temple, from whatsoever perspective.
 - While a tunnel boring anomaly might have induced small cracks in the temple or slightly intensified existing damage, structural safety would not have been impacted in any way.

The recommendations put forward to minimise the risk of such anomalies in tunnel construction essentially sought to ensure that the construction procedures adhered to the theoretical models adopted. That entailed deploying a highly qualified team of engineers equipped with the necessary instruments to conduct parallel works control with a view to guaranteeing compliance with the working hypotheses established.

7. MONITORING TUNNELLING OPERATIONS ALONGSIDE THE TEMPLE

The data recorded by the dense network of instruments installed in the temple and environs during tunnel boring and in the months immediately after the operation are discussed below.

7.1. MOVEMENTS RECORDED BY SURVEYORS' INSTRUMENTS

Very briefly, movements in the temple and surroundings were monitored with the surveyors' instruments listed below.

- Levelling rods were positioned on the ground (both around the temple and along the centreline of the adjacent street and buildings) and on the façades of nearby buildings. Data were also available from the levelling instruments placed inside the temple at the base of the columns in the semi-basement under the supervision of Drs Wolfran Jäger and Rolf Katzenbach, in accordance with the criteria defined by the aforementioned Expert Committee.
- Surveying prisms that took automatic readings every half hour were installed at a number of sites inside and outside the temple. By way of example, Figure 23 and 24 show the prisms on the Glory Façade and the record of the continuous readings taken.
- "Deep" levelling rods were installed to measure subsidence at depths of 22 or 24 m, depending on the case.

INTEMAC monitored these instruments continuously for the duration of the boring operations along the entire length of the pile wall and reported the results daily.

Figure 25 reproduces the surface subsidence trough shown in Figure 20, obtained from the numerical model developed by INTEMAC in which the tunnelling shield was assumed to operate normally (assumption that ultimately materialised). The red circles on the graph indicate the maximum displacement measured by the levelling rods at ground level around the temple. The smaller blue circles represent the maximum movements recorded by the levelling rods positioned on the façades of the buildings on Mallorca Street opposite the temple. The subsidence trough plotted with a dashed line, which passes approximately through the empirical points on the graph, is perceptibly similar to the trough calculated with the model.

7.1. MOVIMIENTOS REGISTRADOS EN LA AUSCULTACIÓN TOPOGRÁFICA

De forma esquemática, el seguimiento de los movimientos en el Templo y su entorno mediante auscultación topográfica se ha realizado mediante:

- Hitos de nivelación dispuestos en suelo (tanto en el entorno del Templo como en el eje de la calle y edificios adyacentes) y en fachadas de los edificios próximos. También se cuenta con los resultados de las nivelaciones efectuadas en el interior del Templo en arranques de pilares del semisótano, llevadas a cabo bajo la dirección de Dr. Ing. Wolfran Jäger y Prof. Dr. Ing. Rolf Katzembach de acuerdo con los criterios establecidos en la Comisión de Expertos antes referida.
- Prismas para seguimiento topográfico con lectura automática cada media hora, colocados en diferentes puntos tanto del exterior como del interior del Templo. A modo de ejemplo, en las Figuras nº 23 y 24 mostramos los dispuestos en la Fachada de la Gloria, junto con los resultados obtenidos en el registro continuo de medidas.
- Hitos "profundos" para medida de asientos en profundidad (entre 22 m y 24 m, según el caso).

INTEMAC llevó a cabo un seguimiento continuo de esta instrumentación durante el paso de la tuneladora a todo lo largo de la pantalla de protección, informado diariamente de los resultados obtenidos.

En la Figura nº 25 reproducimos nuevamente la cubeta de asientos en superficie expuesta en la Figura nº 20, obtenida en las comprobaciones de cálculo realizadas por INTEMAC para la hipótesis de funcionamiento normal (es decir, sin situaciones accidentales) durante el trabajo de la tuneladora, que es la situación que realmente se produjo, indicando con círculos rojos los máximos desplazamientos medidos en hitos de suelo alrededor del Templo. Se indican además, con un círculo azul de menor tamaño, los movimientos máximos registrados en los hitos de nivelación dispuestos en las fachadas de los edificios situados frente al Templo, al otro lado de la calle Mallorca. Con una línea discontinua se ha trazado una cubeta de asientos sensiblemente afín a la de la obtenida en los cálculos, que pase aproximadamente por los puntos representados.

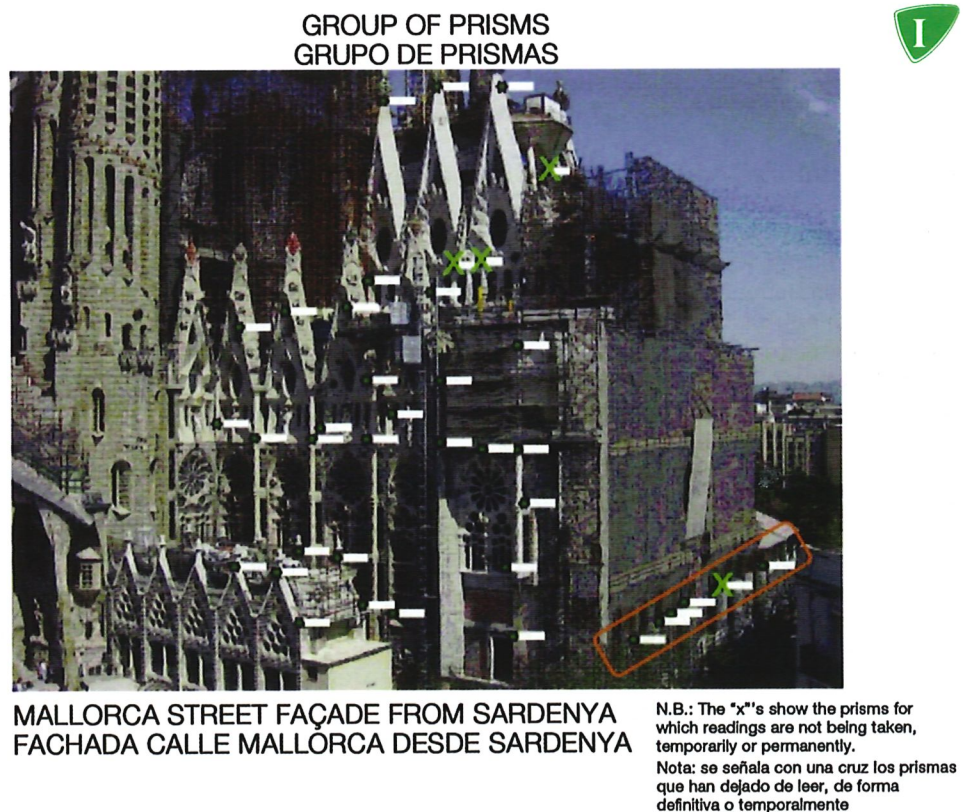


Figura 23: Movimientos registrados en los prismas dispuestos en las columnas de la Fachada de la Gloria
Figure 23: Movements recorded in the prisms on the Glory Façade columns

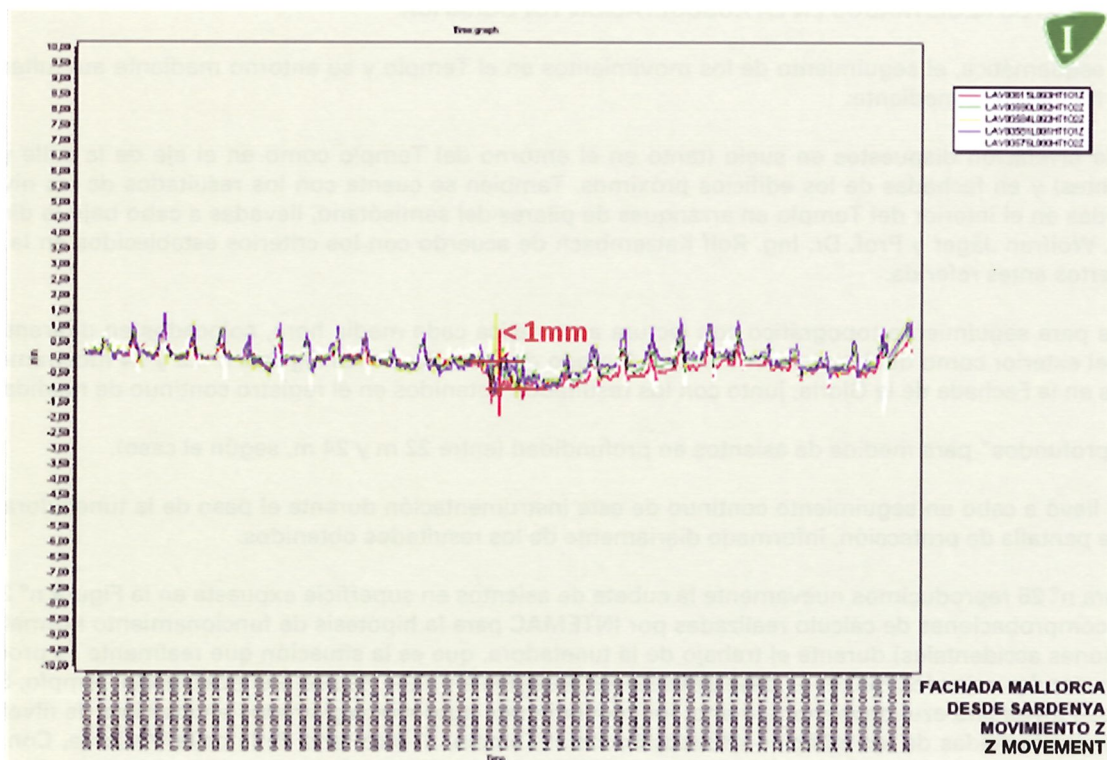


Figura 24: Movimientos registrados en los prismas dispuestos en las columnas de la Fachada de la Gloria
Figure 24: Movements recorded in the prisms on the Glory Façade columns

The actual measurements were slightly smaller than INTEMAC's estimates and consistent with those calculations, with maximum differences on the order of 0.5 mm, i.e., on the order of measuring instrument accuracy.

The movements recorded by the prisms were also consistent with (and of the same order of magnitude as) the leveling rod measurements (and, as the latter, with the results found with the model described in section D). By way of example, according to the surveyors' instrument findings shown in Figure 24 above, the movements recorded on the dates when tunnelling was underway were around or smaller than one millimetre. These values were on the order of the daily fluctuations associated with changes in the weather (temperature or rainfall) or system error. Moreover, these movements stabilised and, after a change in temperature lasting several days, the movements observed were of the same order of magnitude as recorded during tunnelling. (These prisms were not at ground level, but at elevations of 20 to 30 m, where the effect of temperature-induced movements is not negligible. This effect was naturally more intense in prisms positioned at higher elevations).

Analogous conclusions were drawn from the horizontal movements. The movements perpendicular to the tunnel were less than or on the order of one millimetre, while the horizontal readings were of the same or a slightly larger order and proved to be even less sensitive to tunnelling than to temperature in some cases. These values were also smaller than and consistent with the calculations performed by INTEMAC with the model developed.

In short, the movements recorded by the prisms were of the same or a smaller order of magnitude than the values calculated with the model referred to above.

The soil behaved satisfactorily at these depths and the differences between the surface and deep movements were consistent with the results of the calculations performed with the model (see Figure 26).

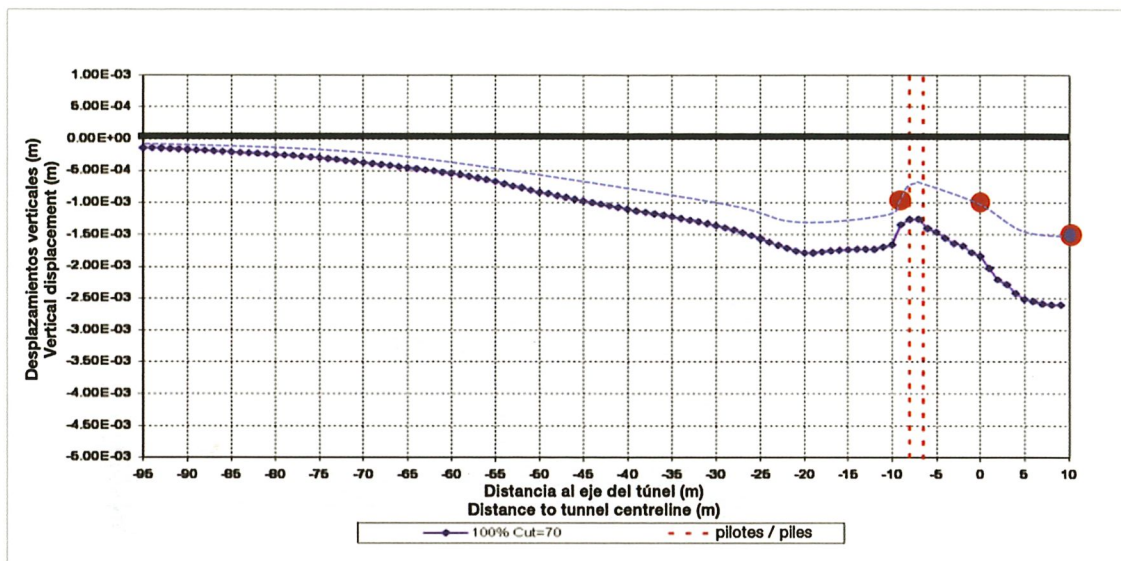


Figura 25: Comparación entre la cubeta de asientos obtenida en los cálculos efectuados para el Informe de INTEMAC para el análisis de la interacción entre las Obras del Túnel y las del Templo, y los movimientos registrados en los hitos de nivelación
 Figure 25: Comparison between the subsidence trough calculated with the INTEMAC model developed for the inquiry on the interaction between tunnel construction and works on the temple, and the movements recorded by the levelling rods

Como puede observarse, las medidas resultaron ligeramente inferiores a las estimadas por INTEMAC en los cálculos realizados, y son congruentes con los resultados obtenidos en dichos cálculos, con diferencias máximas del orden de 0,5 mm y por lo tanto dentro del margen de apreciación de los sistemas de medida.

Los movimientos registrados en los prismas fueron también congruentes (y del mismo orden de magnitud o inferiores) con los resultados de las medidas en hitos de nivelación (y también lo son, como ocurría con estos últimos, con los resultados de las modelizaciones efectuadas para el estudio de interacción referido en el Apartado 1). Véase a modo de ejemplo la anterior Figura nº 24, en la que se observa que los resultados de la auscultación topográfica automática indica que, en las fechas del paso de la tuneladora, se produjeron movimientos del orden o inferiores al milímetro, y cómo estos movimientos son incluso del orden de las oscilaciones diarias en las medidas debidas a influencias climáticas (cambios térmicos, efecto de la lluvia, etc.) y de los errores de apreciación del sistema. Nótese además cómo los movimientos se estabilizan, y cómo también el cambio térmico acaba por dar lugar, tras varios días, movimientos del mismo orden que el registrado al paso de la tuneladora (téngase en cuenta que estos prismas no se encuentran a nivel del suelo, sino a una altura de entre 20 m y 30 m, donde la influencia de los movimientos debidos a la temperatura no es despreciable. Esto es más acusado, lógicamente, en prismas dispuestos en fachadas a mayores alturas).

Con los movimientos horizontales se obtienen conclusiones análogas. Los perpendiculares al eje del túnel fueron inferiores o del orden del milímetro, y los horizontales del mismo orden de magnitud o ligeramente superiores (los movimientos horizontales se han mostrado, si cabe, aún más sensibles a los efectos térmicos en algunos casos). Estos resultados son también inferiores y congruentes con los cálculos realizados por INTEMAC para el estudio de interacción.

En resumen, los movimientos registrados por los prismas son del orden (ligeramente inferiores) a los obtenidos en el estudio de interacción antes referido.

El terreno en profundidad se comportó satisfactoriamente, y las diferencias entre los movimientos registrados en superficie y en profundidad fueron congruentes con los resultados de las comprobaciones de cálculo efectuadas para el estudio de interacción (ver Fig. 26).

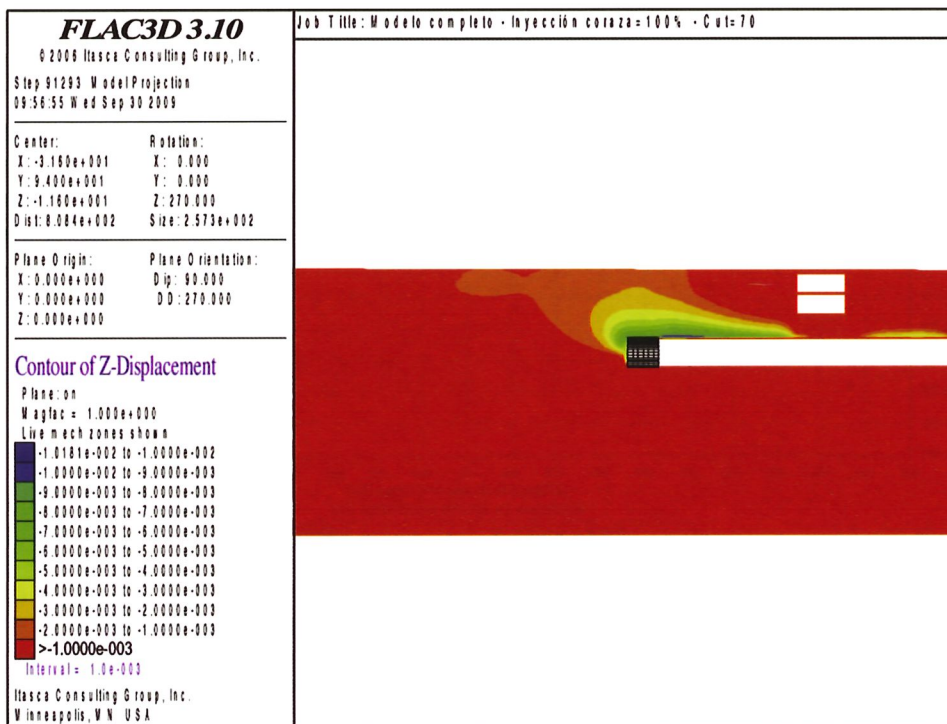


Figure 26: Movements at several depths during tunnel construction obtained with the model developed by INTEMAC
Figura 26: Movimientos durante la construcción del Túnel a diferentes profundidades obtenidos en el estudio de interacción

Summing up, the surveying instruments recorded movements of the same or a smaller order than obtained in the calculations performed with the model.

The instrumental monitoring of cracks and joints inside the temple corroborated the aforementioned instrument readings and confirmed, as predicted by INTEMAC's model, that the temple was unaffected by tunnel construction.

7.2. VIBRATION READINGS

From the outset, the vibrations between approximately 20:00 and 07:00 recorded by the accelerometers installed in the temple were negligible. Since tunnelling was conducted around the clock, these findings are an indication that it induced no perceptible vibrations. The vibrations recorded from 07:00 to 20:00 were greater than the night time readings and related to activity in the area (automobile traffic and works on the temple, to name two). They were generally smaller, however, than the readings taken in that time slot in the months prior to tunnelling. Furthermore, inasmuch as none of the values recorded crossed the thresholds specified in standards DIN 4150/2 and 4150/3, these vibrations could not have affected the structure or caused any discomfort to users.

8. CONCLUSIONS

The conclusions to be drawn from the preceding discussion are set out below.

- The movements recorded by the dense network of precision instruments in the temple and surroundings during and for a few months after tunnelling operations concurred with the calculations performed by INTEMAC with the model developed for this purpose.
- The magnitude of the movements induced was very small, as predicted, with subsidence values for the temple on the order of one millimetre. Such movements were of no significance whatsoever for the monument.
- The pile wall has not affected area hidrology.
- The high quality of all the work performed to build the tunnel, from the protective measures to the operation of the EPB itself, contributed largely to these optimal results.

In short, tunnel construction did not affect the temple in any manner whatsoever, confirming the results of the prior studies conducted on the occasion of both tunnel design and INTEMAC's inquiries into the interaction between tunnel construction and the works on the Expiatory Temple of the Holy Family.

En resumen, en la instrumentación topográfica se obtuvieron movimientos del orden (sólo ligeramente inferiores) a los obtenidos en las comprobaciones de cálculo efectuadas para el estudio de interacción.

En la auscultación en el interior del Templo en algunas fisuras y juntas los resultados confirmaron los anteriormente expuestos, y confirmaron que, como preveía el estudio de INTEMAC, no se ha provocado afección alguna al Templo.

7.2. MEDIDAS DE VIBRACIONES

En los acelerómetros dispuestos por INTEMAC en el Templo desde el comienzo del estudio, durante el paso de la tuneladora frente a la pantalla de protección se registraron vibraciones que, fuera del intervalo entre las 7:00 y las 20:00 aproximadamente, eran despreciables, lo que pone de manifiesto que los trabajos de la tuneladora (que se desarrollaban de forma continua durante las veinticuatro horas del día) no producían vibraciones apreciables. En el intervalo indicado las vibraciones eran mayores, ligadas a la actividad diurna (tráfico en el entorno, trabajos en el propio Templo, etc.) y en general del orden o inferiores a las registradas durante todo el seguimiento realizado en los meses previos. Además, ninguno de los valores registrados han superado los umbrales fijados por la normativa DIN 4150/2 y DIN 4150/3, lo que supone que no existió riesgo alguno de que las vibraciones afectaran a la estructura o provocado molestias a los usuarios.

8. CONCLUSIONES

De los aspectos referidos en los apartados anteriores cabe destacar las siguientes conclusiones:

- Los movimientos registrados por la amplia y rigurosa instrumentación dispuesta en el Templo y su entorno al paso de la tuneladora y en los meses posteriores coinciden con los obtenidos en las comprobaciones de cálculo realizadas por el estudio de interacción desarrollado por INTEMAC.
- La magnitud de los movimientos inducidos resultó, como preveía los modelos, muy reducida, registrándose valores de asientos en el Templo del orden del milímetro. Estos movimientos no tienen trascendencia alguna en el Templo desde ningún punto de vista.
- La pantalla de protección no ha afectado apreciablemente a las condiciones hidrológicas del entorno.
- Cabe destacar el excelente desarrollo de todos los trabajos relacionados con las obras de construcción del Túnel, tanto de las medidas de protección como del funcionamiento de la tuneladora. Este aspecto ha sido determinante en los óptimos resultados.

En resumen, la construcción del Túnel no ha afectado al Templo en modo alguno, confirmándose así los resultados de los estudios previos realizados tanto en el Proyecto del propio Túnel como en el estudio realizado por INTEMAC sobre la interacción entre las obras del Túnel y las del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia.

Relación de Personal Titulado de INTEMAC

Arquitectos

Benito Díez, María Pilar
Fernández Sáez, Ana María
Fraile Mora, Serafín
González Balseyro, María José
Luzón Cánovas, José M^a
Nieto Esteban, Eva
Sánchez Arroyo, Jesús M^a
Sicilia Mañá, Beatriz
Vergara Pérez, Carlos

Ingenieros Aeronáuticos

Alonso Gordo, Ana
Hernández Pamplona, Juan Vicente
* París Loreiro, Angel
Moreno Toriz, Juan José

Ingenieros de Caminos

Baena Alonso, Eva
* Barrios Corpa, Jorge
Barrios Corpa, Roberto
* Calavera Ruiz, José
Calderón Bello, Enrique
Castillo Fernández, Luis Javier
Corbacho Vicioso, José Angel
Cortés Bretón, Juan María
De la Cuerda del Olmo, Francisco Javier
De la Fuente Gómez, Ana Isabel
Dávila Sánchez-Toscano, Suyapa
* Díaz Heredia, Elena
Díaz Lorenzo, Lucía
Díaz Lozano, Justo
Díaz Pavón Cuaresma, Eduardo
* Fernández Gómez, Jaime Antonio
Fernández Montes, David Constantino
García Oliva, Miriam
García de Diego Cano, Eva María
Gómez Mariño, Cristina
González González, Juan José
* González Valle, Enrique
* Hostalet Alba, Francisco
* Izquierdo Bernaldo de Quirós, José M^a
Jiménez Ortiz, Gonzalo
León Bello, Raúl
* Ley Urzaiz, Jorge
López Dormal, Mariano
Menéndez Martínez, Laura
Mísol Moyano, Carolina
Pérez García, Noemí
* Rodríguez Escribano, Raúl Rubén
* Rodríguez Romero, Jesús M^a
Rueda Contreras, Jorge Ladislao
Ruiz Jiménez-Alfaro, Felipe
Sanz Pérez, Lorenzo
Tapia Menéndez, José
Torre Cobo, María Carmen

Valdés Fernández de Alarcón, Pablo
Villanueva Ramírez, Santiago

Ingeniero en Cartografía y Geodesia

López-Canti Casas, Elisa

Ingenieros Civiles

Almeida da Silva, Pedro Miguel
Teixeira Martins, Hermano Tiago

Ingenieros Geólogos

Catalán Navarro, Antonio

Ingeniero I.C.A.I.

Marín Estévez, Gonzalo

Ingenieros Industriales

* Alvarez Cabal, Ramón Amado
Argüelles Galán, Manuel
Arroyo Arroyo, José Ramón
Bayonne Sopo, Enrique
Borraz López, Alfonso
De la Cruz Morón, Diego
Estrada Gómez, Rafael
Gasca Martínez, Antonio
González Carmona, Manuel
Ibañez Mayayo, Miguel
Liébana Ramos, Miguel Angel
López de Asiaín Gamazo, Leticia Teresa
Mainar Durán, Alejandro
Martos Ojanguren, Víctor
Pou Esquiús, Carles
Ramírez de la Pinta, Rubén
Suárez Fernández, Antonio
* Valenciano Carles, Federico

Ingeniero de Minas

Ramos Sánchez, Adelina

Ingeniero de Montes

Carrillo Bobillo, Oliva

Dra. en Geografía e Historia

Calavera Vayá, Ana María

Licenciada en Administración y Dirección de Empresas

Perales Gómez, Natalia

Licenciado en Ciencias Ambientales

Gil Esteban, Luis Miguel

Licenciado en C. Económicas y Empresariales

González Chavero, Antonio

Licenciado en Ciencias Físicas

Salas Roa, Luis David

Licenciada en Ciencias Políticas y de la Administración

Estébanez Morer, Ana María

Licenciados en Ciencias Químicas

Grandes Velasco, Sylvia María

López Sánchez, Pedro

Morgado Sánchez, José Carlos

Licenciado en Derecho

Jarillo Cerrato, Pedro

Licenciados en Geología

Blanco Zorroza, Alberto

Casado Chinarro, Alejandro

Catalán Navarro, Antonio

Lara Avila, Carlos

López Velilla, Oscar

Martín López, Jesús Heliodoro

Usillos Espín, Pablo

Licenciada en Filología Hispánica

Valentín Sierra, M^a Consuelo

Licenciada en Psicología

Catalá Pellón, Diana

Master of Science in Civil Engineering

Hooendoorn, Peter Paul

Arquitectos Técnicos

Carrato Moñino, Rosa M^a

Díaz Lorenzo, Lucía

Jiménez Salado, Borja

Montejano Jiménez, María del Carmen

Vicente Minguela, Francisco

Ingeniero Técnico Aeronáutico

Mainar Durán, Alejandro

Ingeniero Técnico Forestal

Carrillo Bobillo, Oliva

Ingeniero Técnico en Informática de Gestión

Esteban Pérez, Ramón

Ingenieros Técnicos Industriales

Alcubilla Villanueva, Rubén

Ases Rodríguez, Cristóbal

Jiménez Rodríguez, José Antonio

Madueño López, Javier

Madueño Moraño, Antonio

Quílez Hernáiz, Sonia

Remacha Mangado, Mikel

Rodríguez Luque, Ana María

Ruiz Rivera, Rafael

Villar Riñones, Jesús

Ingeniero Técnico de Minas

Sillero Arroyo, Andrés

Ingenieros Técnicos Obras Públicas

Agudo Cordobés, José Manuel

Carrero Crespo, Rafael

Fernández-Cueto Fernández, Enrique

González Nuño, Luis

Martínez Vicente, Cristina

Mata Soriano, Juan Carlos

Montiel Sánchez, Ernesto

Muriel León, Carlos

Ortiz del Campo, Natalia

Pardo de Agueda, Juan Luis

Rivera Jiménez, Marta

Romero García, Daniel

Rosa Moreno, José Andrés

Rozas Hernando, José Juan

Sánchez Santiago, Sandra

Sánchez Tomé, Elena

Sanz Ruiz, Idoya

Vicente Girón, Susana

Ingenieros Técnicos Topógrafos

Amador Orenza, Germán

Barragán Bermejo, M^a Vicenta

Carreras Ruiz, Francisco

De Francisco Rodríguez, Francisco

López de Castro, Daniel

López Jiménez, Luis

Martínez Ochando, Eduardo

Sánchez Martín, María de la O

Torés Campos, Ana M^a

Técnicos en Administración de Empresas

Cebrián Sobrino, M^a José

Técnico en Publicidad

Blanco Armas, Cristina

*NOTA: Todo el personal de INTEMAC trabaja en dedicación completa y exclusiva, con la excepción de las personas arriba indicadas con * a las que se autoriza la dedicación a la Enseñanza Universitaria en régimen de dedicación parcial.

CUADERNOS INTEMAC

CUADERNOS INTEMAC es una publicación trimestral, bilingüe en español e inglés, en forma de monografías que recogen trabajos realizados por los técnicos del Instituto o presentados en los Cursos y Conferencias organizados por el mismo.

Los temas tratados cubren tanto el campo de las Obras Públicas como el de la Edificación y sus Instalaciones.

Precio de la suscripción Año 2010: 35 €



ÚLTIMOS TÍTULOS PUBLICADOS

Cuaderno N° 80

"Investigación sobre la resistencia, funcionalidad y durabilidad de las aceras".
Autor: **Fernando Catalá Moreno**.

Cuaderno N° 81

"Estudio de la interacción entre las obras del Templo de la Sagrada Familia y las del Túnel de Alta Velocidad entre las estaciones de Sants y La Sagrera, en Barcelona".
Autores: **Raúl Rodríguez Escribano y Alberto Blanco**.

CUADERNOS DE PRÓXIMA APARICIÓN

Cuaderno N° 82

"Certificación de aeropuertos".
Autor: **Ángel París Loreiro**.

Cuaderno N° 83

"Acciones en fachadas".
Autor: **Ramón Álvarez Cabal, Suyapa Dávila, Peter Paul Hoogendoorn**.

Consulte lista completa de la Colección

MONOGRAFÍAS INTEMAC

Publicación de INTEMAC con un carácter eminentemente práctico destinada a tratar temas muy concretos que, o bien presentan un nivel de problemas acusado en la práctica, o bien están insuficientemente cubiertos por la Normativa y la documentación técnica correspondientes.

MONOGRAFÍA INTEMAC N° 5

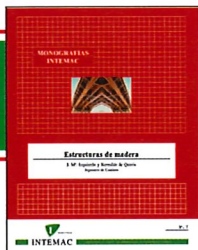
"Mantenimiento y reparación de paramentos de hormigón".
Autores: **R. Barrios Corpa, C. Beteta Cejudo, E. Díaz Heredia, Prof. J. Fernández Gómez, J. M. Rodríguez Romero**.
Precio de la Monografía 38 €

MONOGRAFÍA INTEMAC N° 6

"Patología, técnicas de intervención y limpieza de fábricas de ladrillo".
Autores: **P. López Sánchez, J. M. Luzón Cánovas, I. Martínez Pérez, A. Muñoz Mesto, A. Fernández Sáez**.
Precio de la Monografía 38 €

MONOGRAFÍA INTEMAC N° 7

"Estructuras de madera".
Autores: **J. M. Izquierdo y Bernaldo de Quirós**.
Precio de la Monografía 38 €



NOTAS DE INFORMACIÓN TÉCNICA NIT

Con independencia de la serie de Cuadernos de INTEMAC, de los que se publica un número trimestral, bilingüe en español e inglés, en INTEMAC se producen, con acentuada frecuencia notas de información sobre aspectos concretos que pensamos que no solamente tienen una utilidad interna, sino que pueden resultar interesantes para muchos Técnicos de la Construcción.

Las Notas se envían únicamente por correo (pago por transferencia o tarjeta de crédito).

NIT-5 (06)

Influencia de la oxidación y de las manchas de mortero sobre la adherencia de armaduras de hormigón
J. Calavera Ruiz, A. Delibes, J. M. Izquierdo y Bernaldo de Quirós, G. González Isabel.
Edición en español, en color. 12 páginas
Precio 14 €



NIT-6 (07)

El previsible descenso de la seguridad en pilares con la entrada en vigor del Eurocódigo EC-2, y la necesidad de un control estricto de la calidad del hormigón en pilares

J. Calavera Ruiz.

Edición en español, en color. 10 páginas

Precio 12 €

VÍDEOS TÉCNICOS Y DVD's

Fabricación y ensayo de probetas de hormigón.

N° 2001 (1-1)

Contempla de forma completa y detallada el proceso de toma de muestras de hormigón fresco en obra, la medida de la consistencia con el Cono de Abrams, fabricación de probetas, curado en obra, transporte al laboratorio, curado en cámara, refrentado y ensayo a compresión.

Esta nueva versión del vídeo 8801 (1), introduce las modificaciones de EHE y un sistema de estudio de la distribución de presiones de la prensa sobre la probeta así como los aspectos particulares del ensayo de hormigones de alta resistencia.
30 minutos - 25 €



Fabricación y control de calidad de barras y mallas para hormigón armado.

N° 2002 (1-2)

Muestra el proceso de laminación en fábrica de las barras y alambres, la fabricación de mallas y los ensayos de tracción, doblado, arrancamiento de nudos y determinación de las características geométricas del corrugado y el ensayo de Beam-test para la determinación de las características de adherencia.
30 minutos - 25 €



Compresión centrada en hormigón armado.

N° 2002 (1-4)

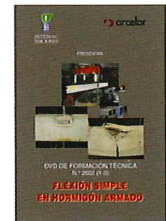
Contempla la rotura de siete pilares a escala real, variando resistencias de hormigón desde 25 Mpa a 70 Mpa, las cuantías de armaduras, la separación de estribos y la velocidad de carga conectando todo ello con las fórmulas de cálculo.
35 minutos - 25 €



Flexión simple en hormigón armado.

N° 2002 (1-3)

Incluye el ensayo a rotura de cinco vigas a escala real, con diferentes cuantías y diferentes desarrollos de adherencia conectando todo ello con las fórmulas de cálculo.
35 minutos - 25 €



Esfuerzo cortante en hormigón armado.

N° 2002 (1-5)

Muestra el ensayo a rotura de cinco vigas a escala real, con diferentes formas de rotura por corte (Tracción diagonal, corte flexión, compresión diagonal, etc.) conectando todo ello con las fórmulas de cálculo.
25 minutos - 25 €



BOLETÍN BIBLIOGRÁFICO

INTEMAC viene realizando desde su fundación un BOLETIN BIBLIOGRAFICO para uso interno, que ofrece, en una lectura rápida, un panorama general de todas las publicaciones técnicas disponibles. Desde 1991, esta publicación bimestral, ha sido puesta a disposición del público. EL BOLETIN BIBLIOGRAFICO incluye:

Fotocopia del índice y de los resúmenes de los artículos contenidos en las 105 revistas técnicas que se reciben en el Instituto referentes a los campos de la Edificación, Instalaciones, Obras Públicas y Urbanismo. Una sección de Normativa reciente, nacional y extranjera. Secciones de Bibliografía y Cursos. Una sección de Congresos, Reuniones Técnicas y Ferias de próxima celebración en todo el mundo.

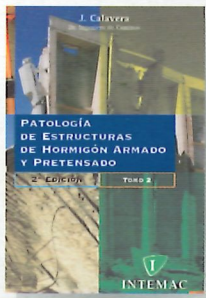
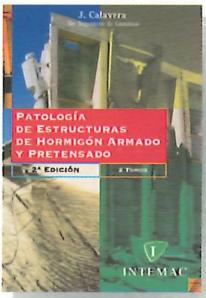
Tarifa de suscripción anual (6 números) 200 €



Consulte otras publicaciones

www.intemac.es

PUBLICACIONES



Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado 2ª edición (2 tomos)

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 135 €

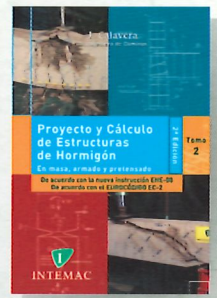
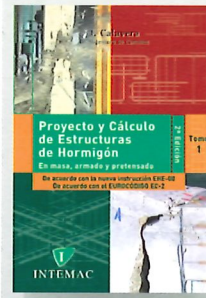


Fichas de ejecución de obras de hormigón 3ª edición

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 68 €

Nueva publicación

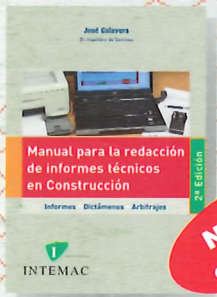


Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón 2ª edición (2 tomos)

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 180 €

Nueva edición



Manual para la redacción de informes técnicos en construcción 2ª edición

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 90 €

Nueva edición



Manual de Ferralla 3ª edición

J. Calavera, E. González Valle, J. Fernández Gómez, F. Valenciano

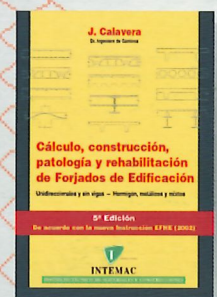
Precio: 45 €



Proyecto de estructuras de hormigón con armaduras industrializadas

J. Calavera, E. González Valle, J. Fernández Gómez, F. Valenciano

Precio: 50 €



Cálculo, construcción, patología y rehabilitación de forjados de edificación 5ª edición

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 113 €



Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón

J. Fernández Gómez, G. González Isabel, F. Hostalet Alba, J. Mª Izquierdo, J. Ley Urzaiz

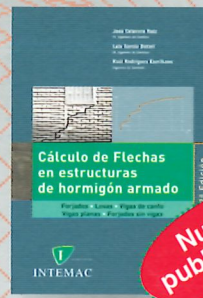
Precio: 64 €



Muros de contención y muros de sótano 3ª edición

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 80 €



Cálculo de flechas en estructuras de hormigón armado 2ª edición

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos), L. García Dutari (Ingeniero Civil), R. Rodríguez (Ingeniero de Caminos)

Precio: 110 €

Nueva publicación

El libro y el CD-ROM pueden adquirirse conjuntamente o por separado.

Software asociado en ficheros de AutoCAD

MANUAL DE DETALLES CONSTRUCTIVOS EN OBRAS DE HORMIGÓN ARMADO
J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

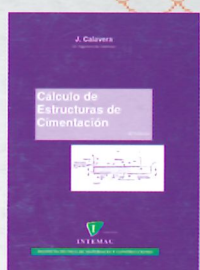
Libro: 123 € CD-ROM: 198 €



Ejecución y control de estructuras de hormigón

J. Calavera, P. Alaejos Gutiérrez, J. Fernández Gómez, E. González Valle, F. Rodríguez García

Precio: 133 €



Cálculo de estructuras de cimentación 4ª edición

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 80 €



Hormigón de alta resistencia

G. González-Isabel (Ingeniero Técnico de O. P.)

Precio: 47 €



Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón

A. Delibes (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 57 €