

# CUADERNOS INTEMAC

## El muro de contención para el nuevo Museo de Colecciones reales

### Retaining wall for the new Museum of Royal Collections

Roberto Barrios Corpa  
Ingeniero de Caminos  
Jefe del Dpto. de Control de  
Edificación Madrid, INTEMAC

Alberto Blanco Zorroza  
Geólogo  
Jefe del Dpto. de Ensayos  
y Estudios Geotécnicos, INTEMAC

José Ángel Corbacho  
Ingeniero de Caminos  
Dpto. de Ensayos y Estudios  
Geotécnicos, INTEMAC



METIRE UT SCIAS

**INTEMAC**

INSTITUTO TECNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES

**N.º 77**

**1.º TRIMESTRE '10**



METRE 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

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

INFORMES DE PATOLOGÍA, REHABILITACIÓN Y REFUERZOS DE CONSTRUCCIONES

OBRAS PÚBLICAS  
EDIFICACIÓN  
INSTALACIONES



**INTEMAC**  
A U D I T

### 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**  
**E C O**

### AUDITORÍA TÉCNICA MEDIOAMBIENTAL

CONTROL DE IMPACTO AMBIENTAL

Obras Públicas  
Edificación  
Instalaciones

CONTROL DE CALIDAD AMBIENTAL

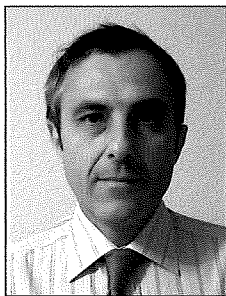
Aire  
Agua  
Ruido

AUDITORIA MEDIOAMBIENTAL

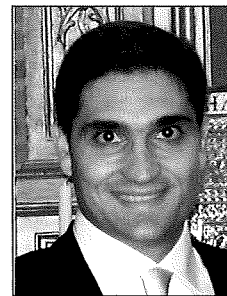
ASESORAMIENTO EN MATERIA DE MEDIO AMBIENTE

---

**EL MURO DE CONTENCIÓN PARA EL NUEVO MUSEO DE COLECCIONES REALES**  
**RETAINING WALL FOR THE NEW MUSEUM OF ROYAL COLLECTIONS**



**Alberto Blanco Zorroza**  
Geólogo  
Jefe del Dpto. de Ensayos  
y Estudios Geotécnicos, INTEMAC  
Geologist  
Head of INTEMAC'S  
Geotechnical Dept.



**Roberto Barrios Corpa**  
Ingeniero de Caminos  
Jefe del Dpto. de Control de  
Edificación Madrid, INTEMAC  
Civil Engineer  
Head of INTEMAC'S Edification  
Madrid Control Dept.



**José Ángel Corbacho**  
Ingeniero de Caminos  
Dpto. de Ensayos  
y Estudios Geotécnicos, INTEMAC  
Civil Enginner  
Geotechnical Dept. INTEMAC

---

Copyright © 2010, 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. INTRODUCCIÓN
2. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES REALIZADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO Y DE LAS CIMENTACIONES DE EDIFICIOS DEL ENTORNO
3. PROYECTO
  - 3.1. CONDICIONANTES
  - 3.2. SOLUCIÓN ESTRUCTURAL
4. ANÁLISIS DE DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO
  - 4.1. HIPÓTESIS ADOPTADAS EN EL DIMENSIONAMIENTO
  - 4.2. COMPROBACIONES DE CÁLCULO EFECTUADAS
5. CONSTRUCCIÓN
6. INSTRUMENTACIÓN, AUSCULTACIÓN, SEGUIMIENTO Y CONTROL
  - 6.1. AUSCULTACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL MURO
  - 6.2. MONITORIZACIÓN Y AUSCULTACIÓN DE EDIFICACIONES ANEXAS
  - 6.3. RESULTADOS OBTENIDOS Y COMPARACIÓN CON LOS MODELOS
  - 6.4. RESULTADO SEGUIMIENTO DE EDIFICACIONES ANEXAS

## CONTENTS

1. INTRODUCTION
2. CHARACTERISATION OF SOIL AND SURROUNDING BUILDING FOUNDATIONS
3. DESIGN
  - 3.1. CONDITIONING FACTORS
  - 3.2. STRUCTURAL SOLUTION
4. DESIGN AND DIMENSIONING
  - 4.1. DIMENSIONING ASSUMPTIONS
  - 4.2. CALCULATIONS PERFORMED
5. CONSTRUCTION
6. INSTRUMENTATION, LOGGING, MONITORING AND CONTROL
  - 6.1. INSTRUMENTAL MONITORING
  - 6.2. MONITORING AND INSTRUMENTING ADJACENT BUILDINGS
  - 6.3. INSTRUMENTAL FINDINGS AND COMPARISON WITH MODEL RESULTS
  - 6.4. RESULTS OF MONITORING ADJACENT BUILDINGS

---

## ABSTRACT

*Construction of the future Museum of Royal Collections, located in Madrid alongside the city's Almudena Cathedral and Royal Palace, entailed substantial earthworks, which in turn called for a retaining wall adjacent to those two buildings and surrounding the rest of the compound.*

*Singular in a number of respects, this wall retains the embankment formed around the 30-m deep excavation required, as well as the foundations of historic buildings located behind it and positioned at elevations considerably higher than the bottom of the pit.*

*The present Paper describes the key features of wall structural engineering and construction, as well as the quality control and instrumental monitoring conducted.*

## 1. INTRODUCTION

The future Museum of Royal Collections will be sited inside the Royal Palace compound in Madrid, bounded on the north by the Royal Armoury, on the east by Almudena Cathedral, on the south by "Cuesta de la Vega", a public thoroughfare, and on the west by the "Campo del Moro" (former palace gardens).

The building is being constructed by the Crown Heritage under the supervision of architect Juan Antonio Hernández Ferrero to a design by architects Emilio Manuel Tuñón Álvarez and Luis Moreno García Mansilla (Mansilla and Tuñón).

The architects were assisted by GOGAITE (Alfonso Gómez Gaité, civil engineer) for the structural engineering. This company authored the design in conjunction with the Central Engineering Division of Fomento de Construcciones y Contratas (FCC Construcción), the general contractors. The chief resident engineer is Santiago Esteban Hernán Martín, associate architect.

Quality control and technical assistance for the construction of the wall in question was entrusted to the Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC), under the supervision of Elena Díaz Heredia, civil engineer, and Marta Rivera Jiménez, associate civil engineer. Other INTEMAC staff and departments involved included the Instrumental Monitoring Department under the leadership of Jorge Ley Urzáiz, civil engineer; the Geotechnical Department, under manager José Tapia Menéndez, civil engineer; and the Special Control Department, headed by Ramón Álvarez Cabal, mechanical engineer.

The museum consists of several storeys, with an entrance at grade level on Almudena Square. Most of the rest of the building is located below grade, underneath the square. Given this layout, building construction entailed substantial excavation, preceded by erection of the respective retaining wall.

The wall is characterised by significant geometrical and structural particularities deriving both from the design layout, which calls for excavating to a depth of 30 m, and the historic nature of the surrounding buildings, whose constructional characteristics vary and whose foundations, at elevations substantially higher than the excavation to be dug, are also retained by the wall.

The present Paper describes the key features of wall structural engineering and construction, as well as the quality control and instrumental monitoring conducted.

## RESUMEN

*El futuro Museo de las Colecciones Reales ubicado en Madrid y medianero con la Catedral de la Almudena y el Palacio Real ha requerido para su construcción de un importante vaciado de tierras previa la construcción del correspondiente muro de contención en las medianerías mencionadas y resto de contorno.*

*El muro de contención presenta importantes singularidades, con una excavación de más de 30 metros de altura, con edificaciones en su trasdós de marcado carácter histórico que poseen características constructivas variables y disposición de cimentaciones a cotas notablemente superiores a las del vaciado a realizar y por lo tanto contenidas por dicho muro.*

*En el presente Documento se hace una exposición de los principales aspectos de carácter estructural del proyecto y la construcción del muro, así como de las diferentes actividades de control y auscultación realizadas.*

## 1. INTRODUCCIÓN

El futuro Museo de las Colecciones Reales se encuentra ubicado en Madrid, dentro del recinto del Palacio Real y limitado al norte en medianería con las dependencias de la Real Armería, al este en medianería con la Catedral de la Almudena, al sur con la vía pública denominada Cuesta de la Vega y al oeste con los jardines del Campo del Moro.

El Proyecto del edificio, promovido por PATRIMONIO NACIONAL bajo la dirección del Dr. Arquitecto D. Juan Antonio Hernández Ferrero, es obra de los Drs. Arquitectos D. Emilio Manuel Tuñón Álvarez y D. Luis Moreno García Mansilla (Mansilla & Tuñón).

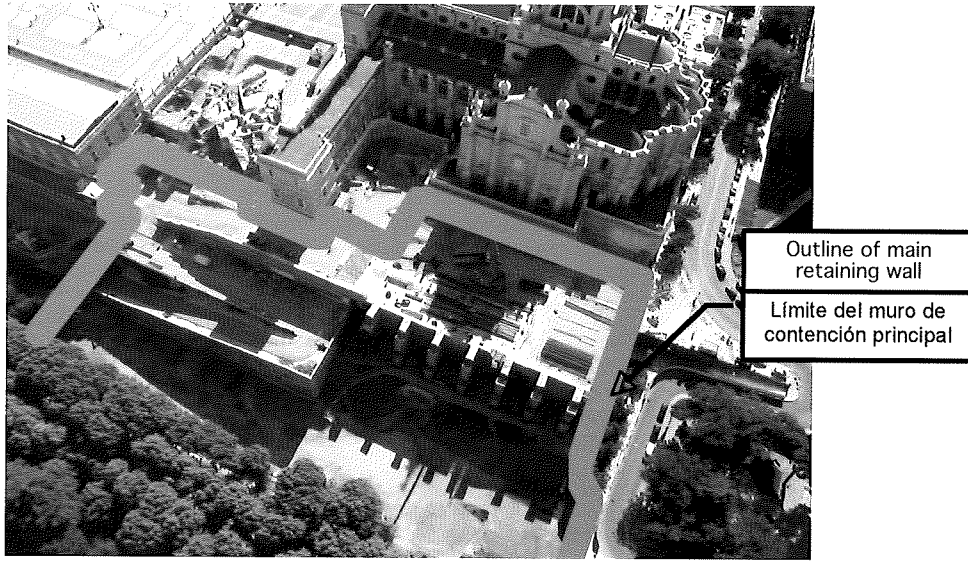
En lo referente al Proyecto Estructural, los Arquitectos han contado con la participación de GOGAITE (D. Alfonso Gómez Gaité - Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos) como consultora de estructuras, la cual ha desarrollado el Proyecto con la colaboración de los Servicios Técnicos Centrales de Fomento de Construcciones y Contratas (FCC Construcción), empresa constructora adjudicataria de las obras. La Dirección de ejecución de las obras ha sido desempeñada por D. Santiago Esteban Hernán Martín, Arquitecto Técnico.

Las actividades de Control de Calidad y Asistencia Técnica durante las obras de construcción del muro en cuestión han sido desarrolladas por el Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC), bajo la dirección de D<sup>a</sup> Elena Díaz Heredia, Dra. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y D<sup>a</sup> Marta Rivera Jiménez, Ingeniero Técnico de Obras Públicas, habiendo colaborado asimismo otros equipos de INTEMAC pertenecientes al Departamento de Auscultación, bajo la Dirección de D. Jorge Ley Urzáiz, Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos; al Departamento de Geotecnia, bajo la Dirección de D. José Tapia Menéndez, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos y al Departamento de Controles Especiales bajo la Dirección de D. Ramón Álvarez Cabal, Dr. Ingeniero Industrial.

El Museo cuenta con diferentes niveles, disponiendo su acceso a la cota de la Plaza de la Almudena, y desarrollándose de manera general bajo la rasante de dicha plaza. Ésta configuración implica para la construcción del Museo un importante vaciado de tierras previa la construcción del correspondiente muro de contención.

El muro de contención presenta, en lo relativo a su proyecto y construcción, importantes singularidades derivadas tanto de las características geométricas y estructurales impuestas por la configuración del proyecto, con una excavación de más de 30 metros de altura, como por la constitución de los edificios medianeros, de marcado carácter histórico, con características constructivas variables y disposición de cimentaciones a cotas notablemente superiores a las del vaciado a realizar y por lo tanto contenidas por dicho muro.

En el presente Documento se hace una exposición de los principales aspectos de carácter estructural del proyecto y la construcción del muro, así como de las diferentes actividades de control y auscultación realizadas.

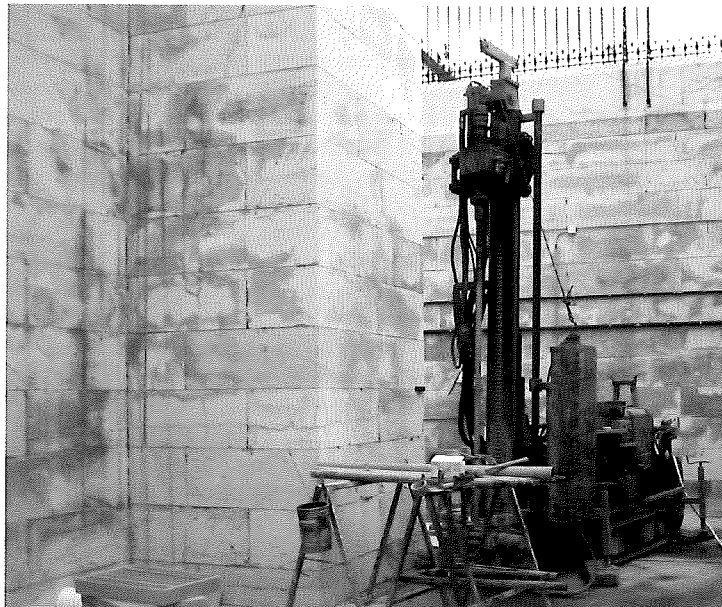


**Figure 1. Works boundaries. Aerial view**  
**Figura 1. Vista general del ámbito de las obras**

## **2. SOIL AND SURROUNDING BUILDING FOUNDATIONS. CHARACTERISATION**

The documentation for characterising the subsoil included the twelve geotechnical surveys conducted for the design, which consisted of core drilling to 15- to 57-m depths.

Subsequently, during pile wall construction, a number of supplementary surveys were conducted to obtain specific information on questions such as the thickness and distribution of the anthropic fill, the presence of buried ruins or former structures, or the depth of the existing foundations. A total of around seventy additional surveys were conducted.



**Figure 2. Survey conducted alongside cathedral wall and buttresses**  
**Figura 2. Realización de sondeo adosado a muro y contrafuertes de la Catedral**

The site map in Figure 5 shows the location of all the surveys conducted.



## 2. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES REALIZADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL TERRENO Y DE LAS CIMENTACIONES DE EDIFICIOS DEL ENTORNO

Para la caracterización del subsuelo, se dispuso en primer lugar de los estudios geotécnicos realizados para el proyecto, que incluían doce sondeos mecánicos a rotación con extracción de testigos, de entre 15 m y 57 m de profundidad.

Posteriormente, durante la fase de ejecución de los muros pantalla, se efectuaron numerosos sondeos complementarios para obtener información concreta sobre diversos aspectos, especialmente del espesor y distribución de rellenos antrópicos, presencia de ruinas o construcciones antiguas enterradas, profundidad de cimentaciones existentes (ver Figura 2), etc. En total se efectuaron del orden de setenta sondeos adicionales.

En el plano que se adjunta en la Figura 5, se representa la situación de todos los sondeos llevados a cabo.

Como complemento a los sondeos, se efectuaron también varios perfiles por el método de sismica pasiva, distribuidos por la parcela, con el objeto de obtener más información sobre la distribución de rellenos y la existencia de construcciones enterradas y/o antiguas cimentaciones. Se efectuaron ocho perfiles, con una longitud total de implantación del orden de 300m.

Los sondeos que se realizaron adyacentes al edificio anexo a la Catedral, que alberga las dependencias del Tribunal de la Rota, dado que era medianero al futuro recinto apantallado, se aprovecharon para llevar a cabo ensayos de sismica paralela con el objeto de determinar la longitud y profundidad de los pilotes que constituían las cimentaciones de este edificio.

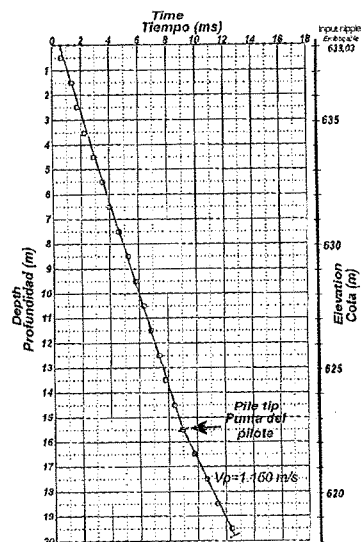


Figura 3. Realización y gráfico de resultados de ensayo de sismica paralela  
Figure 3. Parallel seismic test and graph

Para la determinación de la tipología y profundidad de las cimentaciones de la Catedral de la Almudena, del muro que conforma el patio inglés que separa a la Catedral del recinto apantallado y también de la Real Armería del Palacio Real, además de los sondeos, se efectuaron algunas calicatas de reconocimiento.

Además, se empleó el método de georadar para tratar de determinar la tipología y características de las cimentaciones por el exterior de los muros de la Catedral, en la zona de los contrafuertes del patio inglés.

Por otro lado, se revisó la información disponible, entre la que cabe destacar los planos de planta, alzados y secciones de la Catedral de La Almudena, perfiles transversales del terreno procedentes del Archivo Diocesano y planos topográficos y catastrales de la zona de estudio pertenecientes al Instituto Geográfico Nacional.

Las características de las cimentaciones deducidas de las actividades de reconocimiento y revisión de documentación realizadas, se exponen en el apartado posterior de análisis de diseño y dimensionamiento, de forma concreta para cada una de las secciones diferenciadas a estos efectos.

---

To supplement the surveys, a number of soil profiles were also drawn at various points on the construction site. The passive seismic method was used for these profiles, intended to obtain further information on fill distribution and the existence of buried structures or older foundations. The eight profiles drawn had a total implementation length of around 300 m.

Since the building adjacent to the cathedral that houses the premises of the Tribunal of the Roman Rota was to share a party wall with the future walled compound, the boreholes drilled alongside it were also used to conduct parallel seismic tests to determine the length and depth of the piles in the foundations supporting that building.

In addition to the boreholes, a number of trial pits were made in the wall around the English courtyard that separates the cathedral from the palace compound and the Royal Armoury, to determine the typology and depth of the foundations under Almudena Cathedral.

Ground penetrating radar was used to attempt to determine the typology and characteristics of the foundations outside the cathedral walls in the English courtyard area where the buttresses are located.

All the available information was also reviewed. This included the plan, elevation and cross-sectional drawings of Almudena Cathedral, cross-sectional profiles of the soil furnished by the Diocesan Archives, and National Geographic Institute topographic and cadastre drawings of the area studied.

The section on the analysis of wall design and dimensions contains a specific discussion of the characteristics of the foundations identified in each section of the wall during this documentary review.

The conclusion drawn from the documentary study and soil surveys was that the subsoil consists of three stratigraphic levels, described below.

- **Level I: anthropic fill**  
This level contains a mix of varying proportions of sand and clay with substantial amounts of construction rubble (wood, concrete), loosely or medially compacted, along with archaeological remains (rubble masonry and brick walls, for instance). These materials were detected to variable depths, with thicknesses ranging from very thin or practically non-existent (in areas close to the cathedral and the large courtyard between Royal Armoury Square and the cathedral), to up to 25 m deep in the areas behind the brick wall between the courtyard and the "Campo del Moro" gardens located at the low end of the compound.
- **Level II: sandy clay**  
This layer contains Tertiary deposits in which coarse, moderately sandy clay (known locally as *toscas*) alternates primarily with coarse sandy clay, although sandier strata are found locally, particularly in the shallower depths. This level lies at the top of the natural soil and is characterised by a generally hard consistency.
- **Level III: transition between sandy and pre-consolidated clay**  
The soil lying under the sandy clay layer down to the maximum borehole depth consists of a brown plastic clay with very hard green layers.

Furthermore, during the core drilling performed for the geotechnical survey, perched water tables, concurring with more granular lenses, were detected at depths ranging from 13,4 to 38,8 m, i.e., elevations 598,1 to 626,8.

### **3. DESIGN**

#### **3.1. CONDITIONING FACTORS**

The nature of the building and its surroundings imposed demanding boundary conditions on retaining wall design. The most prominent are discussed below.

##### ***Proximity of the construction site to Almudena Cathedral and the Royal Armoury***

Both Almudena Cathedral and the Royal Armoury, an annex to the Royal Palace, share party walls with a substantial length of wall. As explained in the reports of previous studies, the foundations for these buildings were found to be at much shallower depths than the maximum excavation required and therefore their structural performance would be directly affected by any deformations in the retaining wall. In addition, the stiffness of these structures and their historic significance imposed the need to limit such possible deformation to a very narrow range of values so that any settlement induced by deformation would cause no damage. Lastly, the presence of these foundations conditioned the geometric layout of the soil anchors.

Del conjunto de determinaciones realizadas para el reconocimiento del terreno, se concluyó que el subsuelo estaba constituido por tres niveles estratigráficos, con las siguientes características y distribución:

- **Nivel I: Rellenos antrópicos.**  
Constituidos por una mezcla de arenas y arcillas en proporciones variables con abundantes restos de materiales de construcción (madera, hormigón) y compacidad de muy floja a media, y restos arqueológicos (muros de mampostería, fábricas de ladrillo, etc.). Estos materiales se detectaban hasta profundidades muy variables, desde prácticamente inexistentes o con pequeños espesores en algunos puntos próximos a la Catedral y explanada existente entre la Plaza de la Real Armería y la Catedral, hasta 25 m de profundidad en zonas próximas al trasdós de los muros de fábrica de ladrillo que separaban dicha explanada de la parte inferior perteneciente a los Jardines del Campo del Moro.
- **Nivel II: Toscos.**  
Constituido por depósitos de edad Terciaria en los que fundamentalmente se alternan capas de arcillas algo arenosas (toscos) con arcillas arenosas (toscos arenosos), si bien, especialmente en la parte superior, aparecían localmente niveles más arenosos. Este nivel constituye la parte superior del terreno natural y presenta consistencia generalmente dura.
- **Nivel III: Transición Tosco-Peñuela.**  
Por debajo del nivel tosquizo y hasta la máxima profundidad alcanzada en los sondeos se han detectado arcillas plásticas de color marrón con niveles verdosos de consistencia muy dura.

Por otro lado, durante la ejecución de los sondeos realizados para el Estudio Geotécnico, se detectaron niveles de agua de carácter colgado, coincidiendo con lentejones más granulares, a profundidades muy variables, comprendidas entre 13,4 m y 38,8 m que corresponden a cotas comprendidas entre 598.1 y 626.8.

### 3. PROYECTO

#### 3.1. CONDICIONANTES

De cara a la definición estructural del muro de contención el proyecto contó con importantes condicionantes derivados del entorno y la naturaleza del futuro edificio entre los que cabría destacar los siguientes:

##### ***Proximidad de las construcciones de la Catedral de la Almudena y la Real Armería del Palacio Real***

Tanto la Catedral de la Almudena como las dependencias de la Real Armería del Palacio Real resultan medianeras en una gran parte del trazado longitudinal del muro. Como se ha expuesto anteriormente en las investigaciones realizadas se detectó que las profundidades de cimentación de estas edificaciones se situaban muy por encima de la cota máxima de vaciado necesaria y por lo tanto se verían directamente afectadas por las deformaciones del muro de contención durante su trabajo estructural. Adicionalmente la rigidez de las construcciones y la importancia histórica determinaban la necesidad de limitar a valores muy estrictos las posibles deformaciones del muro, de manera que los asentamientos inducidos en las mismas por las deformaciones no supusieran daños. Por otro lado la presencia de estas cimentaciones condicionaba la disposición geométrica de los anclajes al terreno.

##### ***Existencia de galerías atravesando el muro a diferentes profundidades***

Dentro de los reconocimientos del terreno y en las investigaciones documentales efectuadas se constató la existencia de diferentes galerías que de manera errática atravesaban el muro a distintas cotas a lo largo de la altura. Esto conllevó la necesidad de descartar el empleo de lodos bentoníticos o tixotrópicos como sistema de estabilización durante la excavación, de cara a evitar que pudieran producirse fugas de los mismos que implicaran problemas funcionales y ambientales siendo necesario por lo tanto emplear elementos estructurales que pudieran disponer de sistemas alternativos de estabilización.

##### ***Existencia de construcciones y restos***

La ubicación del Museo en el entorno de los orígenes de la ciudad de Madrid en un punto de localización histórica de construcciones implicó la previsión de aparición de restos de antiguas edificaciones. Estos restos podrían resultar tanto puntuales como masivos y con diferentes naturalezas y configuraciones en espesor y posición en planta. A partir de estas premisas sería necesario establecer tipologías que permitieran el empleo de sistemas de perforación

### **Galleries cutting through the wall at different depths**

The soil surveys and documentary reviews conducted revealed the existence of galleries that cross the wall at different elevations. This ruled out the use of bentonite or thixotropic slurry stabilisation systems during excavation, due to potential leakage that would have posed functional as well as environmental problems. Consequently, structural members to which alternative stabilisation systems would be applicable were required.

### **Presence of prior construction and remains**

In light of the museum location, alongside the oldest quarter of the city where buildings have stood for many centuries, provision had to be made for the appearance of the remains of older structures. *A priori*, such ruins could have been either sporadic or massive and of a variable nature, thickness, depth and position. Based on these premises, provision had to be made for the use of penetration systems for the wall members that could cut through these remains with a minimum deviation from the vertical.

### **Watertightness**

The need to strictly control the relative humidity in the future museum, irrespective of its ventilation systems, to conserve the objects custodied called for maintaining water seepage through the wall within narrow limits and channelled across localised points only. This was a relevant design consideration in view of the hydrogeological characteristics of the area, with nearby troughs and brooks.

## **3.2. STRUCTURAL SOLUTION**

The structural solution finally used for the retaining wall is described below.

### **Diaphragm wall**

The wall panels consist of reinforced concrete piles 1350 mm in diameter spaced at 2-m intervals, centres, which provide structural stability, and overlapping mortar piles 1000 mm in diameter that, in conjunction with the RC piles, render the wall sufficiently watertight. Since the mortar piles are designed to restrict seepage across the wall, they were cast deep enough to be embedded in the impermeable layer, but not as deep as the structural piles, generally speaking. In certain localised areas 1.000-mm diameter structural piles were used.

Stability was attained during excavation with re-usable steel sheathing. Where this sheathing was needed, the penetration and casting diameter for the piles was expanded to 1.500 mm.

The pile depths and excavation fronts varied across the wall, as summarised in Table 1.

|                       |           | <b>Tie beam elevation</b> | <b>Bottom elevation</b> | <b>Excavation elevation</b> | <b>Mortar pile elevation</b> | <b>Depth (m)</b> | <b>Height (m)</b> |
|-----------------------|-----------|---------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------|-------------------|
| <b>DESIGN SECTION</b> | <b>1</b>  | 627,0                     | 590,0                   | 602,3                       | 615,5                        | 37,0             | 24,7              |
|                       | <b>2</b>  | 628,5                     | 590,0                   | 602,3                       | 615,5                        | 38,5             | 26,2              |
|                       | <b>3</b>  | 636,5                     | 590,0                   | 603,3                       | 615,5                        | 46,5             | 33,2              |
|                       | <b>4</b>  | 629,8                     | 587,0                   | 602,3                       | 615,5                        | 42,8             | 27,4              |
|                       | <b>5</b>  | 634,0                     | 590,0                   | 602,3                       | 615,5                        | 44,0             | 31,7              |
|                       | <b>6</b>  | 634,0                     | 590,0                   | 602,3                       | 615,5                        | 44,0             | 31,7              |
|                       | <b>7</b>  | 629,8                     | 587,0                   | 602,3                       | 615,5                        | 42,8             | 27,4              |
|                       | <b>8</b>  | 627,0                     | 592,0                   | 603,3                       | 615,5                        | 35,0             | 23,7              |
|                       | <b>9</b>  | 625,6                     | 596,0                   | 603,3                       | 613,0                        | 29,6             | 22,2              |
|                       | <b>10</b> | 617,2                     | 600,0                   | 603,3                       | 606,0                        | 17,2             | 13,8              |
|                       | <b>11</b> | 628,8                     | 594,0                   | 602,3                       |                              | 34,8             | 26,4              |
|                       | <b>12</b> | 623,4                     | 597,0                   | 603,3                       |                              | 26,4             | 20,1              |
|                       | <b>13</b> | 621,0                     | 598,0                   | 603,3                       |                              | 23,0             | 17,7              |
|                       | <b>14</b> | 614,5                     | 600,0                   | 606,3                       |                              | 14,5             | 8,2               |
|                       | <b>15</b> | 627,0                     | 592,0                   | 603,3                       |                              | 35,0             | 23,7              |

**Table 1. Summary of wall elevations**

para los elementos del muro que fueran capaces de atravesar los diferentes restos sin que la desviación respecto a la vertical resultara excesiva.

### **Estanqueidad**

Los condicionantes que el uso del edificio a construir como museo implica de cara a las condiciones higrométricas necesarias para la conservación de los objetos en él albergados hacían necesario, independientemente de los posteriores sistemas de ventilación del Museo, controlar la cantidad de agua de posible filtración a través del muro dentro de parámetros reducidos y en puntos locales controlados. Esto resultaba relevante teniendo en consideración las características hidrogeológicas del entorno, con la proximidad de antiguas vaguadas y arroyos.

### **3.2. SOLUCIÓN ESTRUCTURAL**

A continuación se expone la solución estructural finalmente empleada para el muro de contención.

#### **Muro Pantalla**

El muro cuenta de manera general con un lienzo formado por una pantalla de pilotes secantes, empleándose pilotes estructurales de hormigón armado de diámetro 1.350 mm con intereje de 2 m, a los que se les confiere la estabilidad estructural y otros pilotes de mortero de 1.000 mm de diámetro que, secantes con los anteriores y en combinación con los mismos, dotan al muro de las características de estanqueidad requeridas. Puesto que como se ha mencionado ya los pilotes de mortero tienen como misión aportar restricciones a las filtraciones a través del mismo, la profundidad de estos se extiende hasta quedar empotrados en el sustrato impermeable, no extendiéndose en toda la profundidad de los pilotes estructurales de manera general. En zonas localizadas se emplearon pilotes estructurales de 1.000 mm.

De cara a la estabilidad del terreno durante la excavación se estableció el empleo de camisas metálicas recuperables. En las zonas en las que era necesario su empleo la perforación del pilote y su hormigonado se aumentaban a 1.500 mm.

Las profundidades de los pilotes y los frentes de excavación resultaron variables a lo largo del muro, mostrándose en la Tabla 1 un resumen orientativo de las mismas.

|                         |           | <b>Cota Viga Cadena</b> | <b>Cota Pie Muro</b> | <b>Cota Excavación</b> | <b>Cota Pilote Mortero</b> | <b>Profundidad (m)</b> | <b>Altura (m)</b> |
|-------------------------|-----------|-------------------------|----------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------|
| <b>SECCIÓN PROYECTO</b> | <b>1</b>  | 627,0                   | 590,0                | 602,3                  | 615,5                      | 37,0                   | 24,7              |
|                         | <b>2</b>  | 628,5                   | 590,0                | 602,3                  | 615,5                      | 38,5                   | 26,2              |
|                         | <b>3</b>  | 636,5                   | 590,0                | 603,3                  | 615,5                      | 46,5                   | 33,2              |
|                         | <b>4</b>  | 629,8                   | 587,0                | 602,3                  | 615,5                      | 42,8                   | 27,4              |
|                         | <b>5</b>  | 634,0                   | 590,0                | 602,3                  | 615,5                      | 44,0                   | 31,7              |
|                         | <b>6</b>  | 634,0                   | 590,0                | 602,3                  | 615,5                      | 44,0                   | 31,7              |
|                         | <b>7</b>  | 629,8                   | 587,0                | 602,3                  | 615,5                      | 42,8                   | 27,4              |
|                         | <b>8</b>  | 627,0                   | 592,0                | 603,3                  | 615,5                      | 35,0                   | 23,7              |
|                         | <b>9</b>  | 625,6                   | 596,0                | 603,3                  | 613,0                      | 29,6                   | 22,2              |
|                         | <b>10</b> | 617,2                   | 600,0                | 603,3                  | 606,0                      | 17,2                   | 13,8              |
|                         | <b>11</b> | 628,8                   | 594,0                | 602,3                  |                            | 34,8                   | 26,4              |
|                         | <b>12</b> | 623,4                   | 597,0                | 603,3                  |                            | 26,4                   | 20,1              |
|                         | <b>13</b> | 621,0                   | 598,0                | 603,3                  |                            | 23,0                   | 17,7              |
|                         | <b>14</b> | 614,5                   | 600,0                | 606,3                  |                            | 14,5                   | 8,2               |
|                         | <b>15</b> | 627,0                   | 592,0                | 603,3                  |                            | 35,0                   | 23,7              |

**Tabla 1. Resumen de configuración de alturas del muro**

A tie beam measuring 1.500 mm deep by 1.600 mm wide was laid on top of the pile wall to ensure uniform pile behaviour and deformation.

Materials:

Concrete: RC-30/F/20/IIa+Qb.

Corrugated steel: B-500sd

### Anchors and angle braces

Soil anchors were generally used to secure wall stability and control deformation. The number of levels and anchor strength varied depending on the area of the wall, with maximum nominal loads of 180 tonnes. The ultimate bond stress considered to dimension the bulbs was 0,35 MPa. Anchor load distribution across the piles was attained with reinforced concrete beams laid flush against the piles at anchor height.

The soil anchors were provisional, since wall stability would be ultimately guaranteed by the museum structure itself, once built. To ensure the highest possible performance, the slope on the anchors was set at  $20 \pm 2,5^\circ$  for a variation between two consecutive anchors of  $5^\circ$ .

Table 2 gives the main anchor characteristics, by area of wall.

|              |   | DESIGN SECTION    |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |
|--------------|---|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|--|--|--|--|
|              |   | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 8     | 9     | 10   | 11   | 12    | 13    | 14   |      |  |  |  |  |
| ANCHOR LEVEL | 1 | $L_{nominal}$ (t) |       |       | 100,0 |       |       |       |       |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{cl}$ (m)      |       |       | 32,0  |       |       |       |       |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{bulb}$ (m)    |       |       | 11,0  |       |       |       |       |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{total}$ (m)   |       |       | 43,0  |       |       |       |       |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |
|              | 2 | $L_{nominal}$ (t) |       | 50,0  | 165,0 | 30,0  | 50,0  | 50,0  |       |      |      | 30,0  |       |      |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{cl}$ (m)      |       | 26,5  | 29,5  | 26,5  | 27,0  | 27,0  |       |      |      | 23,5  |       |      |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{bulb}$ (m)    |       | 6,5   | 17,0  | 3,5   | 6,5   | 6,5   |       |      |      | 3,5   |       |      |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{total}$ (m)   |       | 33,0  | 46,5  | 30,0  | 33,5  | 33,5  |       |      |      | 27,0  |       |      |      |  |  |  |  |
|              | 3 | $L_{nominal}$ (t) | 125,0 | 125,0 | 180,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 45,0  | 25,0 |      | 90,0  | 45,0  | 45,0 |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{cl}$ (m)      | 24,0  | 24,0  | 26,5  | 24,0  | 24,0  | 24,0  | 22,5  | 26,5 |      | 19,0  | 20,5  | 22,5 |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{bulb}$ (m)    | 14,0  | 14,0  | 18,0  | 11,0  | 11,0  | 11,0  | 5,0   | 3,5  |      | 9,5   | 5,0   | 4,0  |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{total}$ (m)   | 38,0  | 38,0  | 44,5  | 35,0  | 35,0  | 35,0  | 27,5  | 30,0 |      | 28,5  | 25,5  | 26,5 |      |  |  |  |  |
|              | 4 | $L_{nominal}$ (t) | 165,0 | 165,0 | 180,0 | 125,0 | 125,0 | 125,0 | 150,0 | 60,0 | 25,0 | 120,0 | 75,0  | 75,0 | 60,0 |  |  |  |  |
|              |   | $l_{cl}$ (m)      | 20,0  | 20,0  | 23,5  | 20,0  | 21,5  | 20,5  | 19,0  | 18,0 | 20,0 | 15,5  | 12,0  | 12,5 | 12,0 |  |  |  |  |
|              |   | $l_{bulb}$ (m)    | 17,0  | 17,0  | 18,0  | 14,0  | 14,0  | 14,0  | 15,5  | 6,5  | 3,5  | 12,5  | 8,0   | 8,0  | 6,5  |  |  |  |  |
|              |   | $l_{total}$ (m)   | 37,0  | 37,0  | 41,5  | 34,0  | 35,5  | 34,5  | 34,5  | 24,5 | 23,5 | 28,0  | 20,0  | 20,5 | 18,5 |  |  |  |  |
|              | 5 | $L_{nominal}$ (t) | 165,0 | 165,0 | 180,0 | 150,0 | 165,0 | 165,0 | 165,0 | 90,0 | 25,0 | 105,0 | 105,0 | 90,0 |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{cl}$ (m)      | 17,5  | 17,5  | 21,5  | 17,5  | 19,0  | 18,0  | 16,0  | 13,5 | 8,0  | 12,0  | 9,5   | 9,0  |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{bulb}$ (m)    | 17,0  | 17,0  | 18,0  | 15,5  | 17,0  | 17,0  | 17,0  | 9,5  | 3,5  | 11,0  | 11,0  | 9,5  |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{total}$ (m)   | 34,5  | 34,5  | 39,5  | 33,0  | 36,0  | 35,0  | 33,0  | 23,0 | 11,5 | 23,0  | 20,5  | 18,5 |      |  |  |  |  |
|              | 6 | $L_{nominal}$ (t) | 150,0 | 150,0 | 180,0 | 150,0 | 165,0 | 150,0 | 135,0 |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{cl}$ (m)      | 14,5  | 14,5  | 19,5  | 14,5  | 17,0  | 15,0  | 13,0  |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{bulb}$ (m)    | 15,5  | 15,5  | 18,0  | 15,5  | 17,0  | 15,5  | 14,0  |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{total}$ (m)   | 30,0  | 30,0  | 37,5  | 30,0  | 34,0  | 30,5  | 27,0  |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |
|              | 7 | $L_{nominal}$ (t) |       |       | 165,0 |       | 150,0 |       |       |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{cl}$ (m)      |       |       | 17,5  |       | 14,5  |       |       |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{bulb}$ (m)    |       |       | 17,0  |       | 15,5  |       |       |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |
|              |   | $l_{total}$ (m)   |       |       | 34,5  |       | 30,0  |       |       |      |      |       |       |      |      |  |  |  |  |

Note: Angle braces were used for stability in sections 7 and 15.

Table 2. Summary of anchor characteristics

Con objeto de conseguir una mayor unidad en el comportamiento y deformación de los pilotes en la parte superior del muro pantalla se dispuso una viga cadena de dimensiones 1500 mm de canto por 1600 mm de ancho.

Materiales:

Hormigón: HA-30/F/20/IIa+Qb.

Acero Corrugado: B-500sd

### Anclajes y Codales

El sistema empleado de manera general para la estabilidad del muro y el control de deformaciones ha sido la utilización de anclajes al terreno. El número de niveles empleado y la capacidad de los anclajes han variado a lo largo del muro según las zonas, alcanzando cargas nominales máximas de 180 toneladas. La tensión límite de adherencia considerada para el dimensionamiento de los bulbos fue de 0,35 MPa y el reparto de las cargas de los anclajes sobre los pilotes se realizó mediante vigas de hormigón armado corridas a lo largo de cada nivel de anclajes.

Los anclajes al terreno eran de carácter provisional, ya que la estabilidad final del muro la garantiza la estructura definitiva del propio Museo. Con objeto de obtener la mayor efectividad posible de los anclajes se estableció una inclinación de  $20 \pm 2,5^\circ$  de manera que entre anclajes consecutivos existiera una variación de  $5^\circ$ .

En la Tabla 2 con las principales características por zonas de los anclajes.

|                     |   | SECCIONES PROYECTO       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |       |       |      |      |
|---------------------|---|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|------|------|
|                     |   | 1                        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 8     | 9     | 10   | 11   | 12    | 13    | 14   |      |
| NIVELES DE ANCLAJES | 1 | C <sub>nominal</sub> (t) |       |       | 100,0 |       |       |       |       |      |      |       |       |      |      |
|                     |   | L <sub>libre</sub> (m)   |       |       | 32,0  |       |       |       |       |      |      |       |       |      |      |
|                     |   | L <sub>bulbo</sub> (m)   |       |       | 11,0  |       |       |       |       |      |      |       |       |      |      |
|                     |   | L <sub>total</sub> (m)   |       |       | 43,0  |       |       |       |       |      |      |       |       |      |      |
|                     | 2 | C <sub>nominal</sub> (t) |       | 50,0  | 165,0 | 30,0  | 50,0  | 50,0  |       |      |      | 30,0  |       |      |      |
|                     |   | L <sub>libre</sub> (m)   |       | 26,5  | 29,5  | 26,5  | 27,0  | 27,0  |       |      |      | 23,5  |       |      |      |
|                     |   | L <sub>bulbo</sub> (m)   |       | 6,5   | 17,0  | 3,5   | 6,5   | 6,5   |       |      |      | 3,5   |       |      |      |
|                     |   | L <sub>total</sub> (m)   |       | 33,0  | 46,5  | 30,0  | 33,5  | 33,5  |       |      |      | 27,0  |       |      |      |
|                     | 3 | C <sub>nominal</sub> (t) | 125,0 | 125,0 | 180,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 45,0  | 25,0 |      | 90,0  | 45,0  | 45,0 |      |
|                     |   | L <sub>libre</sub> (m)   | 24,0  | 24,0  | 26,5  | 24,0  | 24,0  | 24,0  | 22,5  | 26,5 |      | 19,0  | 20,5  | 22,5 |      |
|                     |   | L <sub>bulbo</sub> (m)   | 14,0  | 14,0  | 18,0  | 11,0  | 11,0  | 11,0  | 5,0   | 3,5  |      | 9,5   | 5,0   | 4,0  |      |
|                     |   | L <sub>total</sub> (m)   | 38,0  | 38,0  | 44,5  | 35,0  | 35,0  | 35,0  | 27,5  | 30,0 |      | 28,5  | 25,5  | 26,5 |      |
|                     | 4 | C <sub>nominal</sub> (t) | 165,0 | 165,0 | 180,0 | 125,0 | 125,0 | 125,0 | 150,0 | 60,0 | 25,0 | 120,0 | 75,0  | 75,0 | 60,0 |
|                     |   | L <sub>libre</sub> (m)   | 20,0  | 20,0  | 23,5  | 20,0  | 21,5  | 20,5  | 19,0  | 18,0 | 20,0 | 15,5  | 12,0  | 12,5 | 12,0 |
|                     |   | L <sub>bulbo</sub> (m)   | 17,0  | 17,0  | 18,0  | 14,0  | 14,0  | 14,0  | 15,5  | 6,5  | 3,5  | 12,5  | 8,0   | 8,0  | 6,5  |
|                     |   | L <sub>total</sub> (m)   | 37,0  | 37,0  | 41,5  | 34,0  | 35,5  | 34,5  | 34,5  | 24,5 | 23,5 | 28,0  | 20,0  | 20,5 | 18,5 |
|                     | 5 | C <sub>nominal</sub> (t) | 165,0 | 165,0 | 180,0 | 150,0 | 165,0 | 165,0 | 165,0 | 90,0 | 25,0 | 105,0 | 105,0 | 90,0 |      |
|                     |   | L <sub>libre</sub> (m)   | 17,5  | 17,5  | 21,5  | 17,5  | 19,0  | 18,0  | 16,0  | 13,5 | 8,0  | 12,0  | 9,5   | 9,0  |      |
|                     |   | L <sub>bulbo</sub> (m)   | 17,0  | 17,0  | 18,0  | 15,5  | 17,0  | 17,0  | 17,0  | 9,5  | 3,5  | 11,0  | 11,0  | 9,5  |      |
|                     |   | L <sub>total</sub> (m)   | 34,5  | 34,5  | 39,5  | 33,0  | 36,0  | 35,0  | 33,0  | 23,0 | 11,5 | 23,0  | 20,5  | 18,5 |      |
|                     | 6 | C <sub>nominal</sub> (t) | 150,0 | 150,0 | 180,0 | 150,0 | 165,0 | 150,0 | 135,0 |      |      |       |       |      |      |
|                     |   | L <sub>libre</sub> (m)   | 14,5  | 14,5  | 19,5  | 14,5  | 17,0  | 15,0  | 13,0  |      |      |       |       |      |      |
|                     |   | L <sub>bulbo</sub> (m)   | 15,5  | 15,5  | 18,0  | 15,5  | 17,0  | 15,5  | 14,0  |      |      |       |       |      |      |
|                     |   | L <sub>total</sub> (m)   | 30,0  | 30,0  | 37,5  | 30,0  | 34,0  | 30,5  | 27,0  |      |      |       |       |      |      |
|                     | 7 | C <sub>nominal</sub> (t) |       |       | 165,0 |       | 150,0 |       |       |      |      |       |       |      |      |
|                     |   | L <sub>libre</sub> (m)   |       |       | 17,5  |       | 14,5  |       |       |      |      |       |       |      |      |
|                     |   | L <sub>bulbo</sub> (m)   |       |       | 17,0  |       | 15,5  |       |       |      |      |       |       |      |      |
|                     |   | L <sub>total</sub> (m)   |       |       | 34,5  |       | 30,0  |       |       |      |      |       |       |      |      |

Nota: En las secciones 7 y 15 se disponen codales como sistema de estabilidad

Tabla 2. Resumen de configuración de anclajes

---

Moreover, given the geometry of the wall, if the anchors were used as the sole system, where the wall angles run inward into the excavation, the families of anchors on the two sides would have intersected. This arrangement, which would have been undesirable for the risk of interference involved during construction, led to the use of braces to stabilise these areas. The braces ultimately designed consisted of reinforced concrete slabs. The three triangular braces in the area around the cathedral were 800 mm thick and fitted with an edge beam for greater stiffness measuring 1400 mm deep and 1000 mm wide. The 700-mm slabs built for the four rectangular braces in the area near the Royal Armoury had edge beams 1200 mm deep by 1000 mm wide. The option initially considered, namely to use steel lattice braces, was ultimately ruled out in light of the deformability needed to control wall deformation.

Materials:

Steel in cables: Y-1870-S7

Concrete: RC-30/F/20/IIa

Corrugated steel: B-500sd

### ***Lining wall and buttresses***

With stability ensured thanks to the pile wall and respective anchors and angle braces, a concrete lining wall and a series of buttresses were built to obtain a more monolithic, watertight structure, particularly in the areas where the piles did not overlap.

To this end, a 470-mm thick lining wall was erected in front of the pile wall. Its exterior concurred with the outermost arc on the piles and its interior adapted to the geometry resulting from the spacing between them. This lining afforded the pile wall a more regular geometry and greater stiffness. Its contribution is particularly important where the latter performs significant structural work in its own plane, such as in the areas near the angle braces with uncompensated thrust. It also connects the pile wall to the vertical stiffening members that were built in a subsequent stage.

Buttresses measuring 1000 mm wide and up to 4000 mm deep were built against to the lining wall to stiffen the pile wall further, reduce deformation and better distribute the anchor reactions while stability depended on these members, i.e., through completion of the museum structure. These buttresses were designed to play an active role in final stability, together with the rest of the structure, for the permanent retaining system.

Materials:

Concrete: RC-30/F/20/IIa+Qb in lining wall and RC-30/F/20/IIa+Qb in buttresses

Corrugated steel: B-500sd

### ***Drainage***

In light of the geotechnical survey findings relating to area hydrogeology behind the pile walls, a number of California-type drains were installed in the area around the impermeable substrate to control variations in the water levels.

## **4. DESIGN AND DIMENSIONING**

A series of calculations were performed for retaining system design and dimensioning to determine the forces and movements affecting the walls, as well as the movements in the soil behind them.

These calculations had a dual purpose. Firstly, they sought to define retaining system dimensions that would ensure it would be sufficiently robust to counter the thrust in the soil induced by the earthworks. This entailed establishing suitable reinforcement ratios to absorb the forces generated in the walls during the various stages of the work. And secondly, they were run to verify that the pile wall would be subject only to admissible displacements during the various stages of the work, guaranteeing the stability of the foundations underneath the emblematic buildings located behind the walls.

### **4.1. DIMENSIONING ASSUMPTIONS**

The most significant geotechnical, stratigraphic distribution and geometric characteristics of the foundations supporting the nearby buildings and the loads adopted for the calculations are discussed briefly below.



Por otro lado, dadas las características geométricas del muro en planta, en caso de emplear anclajes como único sistema, en aquellos casos en los que existían ángulos entrantes hacia el interior de la excavación, habría resultado necesario realizar un cruce de las familias de anclajes correspondientes a ambos lados. Esta situación no deseable por los riesgos constructivos que implicaría la propia ejecución, en la que podrían darse interferencias, llevó a la disposición de acodamientos como sistema de estabilización en estas zonas. Los acodamientos finalmente proyectados fueron de hormigón armado con losas de espesor 800 mm, que contaban con una viga de borde para mayor rigidez de 1.400 mm de canto y 1.000 mm de ancho en el caso de los tres acodamientos triangulares en el entorno de la Catedral, y losas de 700 mm con viga de borde de 1.200 mm de canto y 1.000 mm de ancho para los cuatro acodamientos rectangulares en el entorno de la Real Armería. Si bien inicialmente se planteó la posible opción de proyectar los acodamientos con una solución mediante celosías metálicas, finalmente se desechó la opción ante los requerimientos de deformabilidad necesarios para controlar las deformaciones de las pantallas.

Materiales:

Acero Cables: Y-1870-S7  
Hormigón: HA-30/F/20/IIa.  
Acero Corrugado: B-500sd

### **Muro Forro y Contrafuertes**

Garantizada la estabilidad del muro mediante la pantalla de pilotes y los correspondientes anclajes y codales, con objeto de conseguir un mayor monolitismo y rigidez del muro, junto con una mayor estanqueidad, especialmente en las zonas en las que no se disponían pilotes secantes, se dispuso un muro de hormigón denominado muro forro y diferentes contrafuertes.

El muro forro se dispone por delante de la pantalla de pilotes con un espesor mínimo de 470 mm coincidente con las generatrices exteriores de los pilotes y adaptándose en el interior a la geometría resultante de la disposición de los mismos. Este muro confiere una mayor regularidad geométrica y rigidez a la pantalla de pilotes, siendo especialmente importante su colaboración en los casos en los que la pantalla desarrolla un trabajo estructural relevante en su propio plano, como en las zonas próximas a la disposición de codales con empujes no compensados. Asimismo, sirve como conexión entre el muro pantalla de pilotes y los elementos verticales de rigidización posterior.

De manera complementaria al muro forro, para una mayor rigidez del muro, una menor deformación y un mejor reparto de la evolución de las reacciones de los anclajes durante el tiempo en el que la estabilidad queda confiada al mismo hasta la terminación de la estructura del museo, se dispusieron contrafuertes conectados con el muro forro con un ancho de 1.000 mm y un canto máximo de 4.000 mm. a lo largo del contorno este. Estos contrafuertes se diseñaron con el objeto de ser parte activa en la estabilidad final junto con el resto de la estructura para la contención en fase definitiva.

Materiales:

Hormigón: HA-30/F/20/IIa+Qb en muro forro y HA-30/F/20/IIa en contrafuertes.  
Acero Corrugado: B-500sd

### **Drenaje**

De cara a tener en consideración la hidrogeología de la zona y la posibilidad de variación de los niveles de agua existentes en el trasdós del muro pantalla, con objeto de controlar las variaciones asociadas de empujes hidrostáticos previstos en función de las investigaciones geotécnicas realizadas, se dispusieron algunos drenes de tipo californiano en las proximidades de la aparición del sustrato impermeable.

## **4. ANÁLISIS DE DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO**

Para el diseño y dimensionamiento del sistema de contención se realizaron distintas comprobaciones de cálculo, con el objeto de determinar los esfuerzos y desplazamientos de los muros pantalla y los movimientos en el terreno de trasdós de los mismos.

Las comprobaciones de cálculo tuvieron una doble finalidad. En primer lugar, el correcto dimensionamiento del sistema de contención, de forma que fuera suficientemente robusto para contrarrestar los empujes del terreno provo-

For the intents and purposes of dimensioning and constructional considerations, the wall was divided into a series of areas with common conditioning factors and characteristics. The result was fifteen design sections, some of which were in turn divided into subsections.

The values of the geotechnical parameters adopted for the units on the basis of the geotechnical survey conducted are summarised in Table 3.

|  | Apparent unit weight (kN/m <sup>3</sup> ) | Cohesion (kN/m <sup>2</sup> ) | Internal angle of friction (°) | Horizontal subgrade reaction modulus (kN/m <sup>3</sup> ) | Modulus of deformation (kN/m <sup>2</sup> ) |
|--|---|-------------------------------|--------------------------------|---|---|
| Level I: anthropic fill  | 18,0                                      | 0,0                           | 28                             | 5000  | 8000  |
| Level II "Toscos": coarse sandy clay                           | 21,0                                      | 30,0                          | 30                             | 90000   | 150000                                      |
| Level III "Transición tosco-peñuela": transition tosco-peñuela | 20,0                                      | 50,0                          | 28                             | 107150  | 250000                                      |

Table 3. Soil parameters used to calculate thrust

Further to the geotechnical report drafted for the design, the groundwater table was assumed to be located two metres above the anthropic fill / natural soil interface, as confirmed in all the sections tested, assuming a linear hydrostatic pressure gradient up to that border. In the design calculations, moreover, water pressure was assumed to be constant and uniform in the natural tertiary soil up to a depth of around nine metres from the top of that layer.

Other variables such as fill thickness, foundation characteristics and back loads were the object of specific assumptions in each of the standard sections considered. Figure 4 shows the denomination and scope of each section.

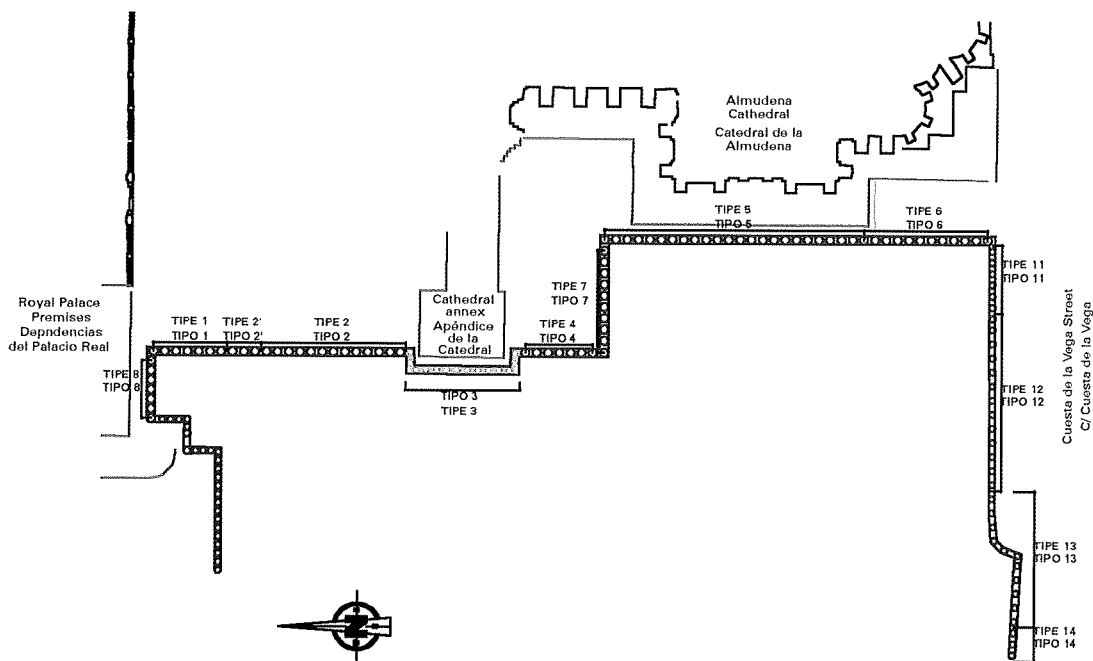


Figure 4. Standard sections of pile wall  
 Figura 4. Secciones tipo del muro pantalla

cados por las excavaciones, dotando a los muros de adecuados esquemas de armado, capaces de absorber los esfuerzos que se produjeran en los muros pantalla durante las diferentes fases de obra. Por otra parte, verificar que los desplazamientos de los muros pantalla durante las diferentes fases de obra resultaran admisibles, asegurando un comportamiento correcto de las cimentaciones de las edificaciones singulares existentes en el trasdós de dichos muros pantalla.

#### 4.1. HIPÓTESIS ADOPTADAS EN EL DIMENSIONAMIENTO

A continuación se exponen de forma esquemática los aspectos más relevantes relativos a los parámetros y condicionantes geotécnicos, distribución estratigráfica y geometría y características de cimentaciones de edificios próximos y cargas consideradas, adoptados en las comprobaciones de cálculo.

El desarrollo completo de la pantalla se dividió a efectos de dimensionamiento y constructivos en una serie de zonas de condicionantes y características comunes, dando lugar a un total de quince secciones de proyecto, con subsecciones en algunos casos.

Para los parámetros geotécnicos de las diferentes unidades, se adoptaron los valores que se recomendaban en el estudio geotécnico que se resumen en la Tabla 3:

|                                      | Peso específico aparente (kN/m <sup>3</sup> ) | Cohesión (kN/m <sup>2</sup> ) | Ángulo de rozamiento interno (°) | Módulo de balasto horizontal (kN/m <sup>3</sup> ) | Módulo de deformación (kN/m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------------------|---|-------------------------------|----------------------------------|---|--|
| Nivel I: Rellenos antrópicos.        | 18,0  | 0,0                           | 28                               | 5000  | 8000                                       |
| Nivel II: Toscos.                    | 21,0  | 30,0                          | 30                               | 90000   | 150000                                     |
| Nivel III: Transición tosco-peñuela. | 20,0  | 50,0                          | 28                               | 107150  | 250000                                     |

Tabla 3. Parámetros del terreno considerados para la evaluación de empujes

Con relación a los empujes de agua, se ha tenido en cuenta, de acuerdo con el informe geotécnico de proyecto, la existencia de un nivel freático que se ha situado, en todas las secciones comprobadas, 2 metros por encima del nivel de contacto entre el relleno antrópico y el terreno natural, considerando hasta esta línea de contacto una ley de presiones hidrostática. Además, en las comprobaciones de Proyecto, a efectos de cálculo, en el terreno natural terciario se consideró una ley de presiones de agua constante y uniforme afectando a una profundidad del orden de 9 m en el interior del mismo.

Otras variables, tales como el espesor de rellenos, características de cimentaciones y cargas en trasdós, etc., se consideraron de forma particular en cada una de las secciones tipo. En la Figura 4 se muestra la denominación y alcance de cada una de estas secciones

En la Tabla 4, se indican los espesores de rellenos artificiales considerados en el trasdós de algunas de las secciones más relevantes de la estructura de contención y la cota de aparición de terreno natural en cada caso.

Table 4 gives the thickness assumed for the artificial fills behind some of the key sections of the retaining structure and the elevation at the top of the layer of natural soil in each case.

| Standard section | Sub-section | Natural soil elevation | Elevation of top of pile wall | Maximum thickness of anthropic layer behind the pile wall (m) |
|------------------|-------------|------------------------|-------------------------------|---|
| Section No. 1    |             | 620,00                 | 627,00                        | 15,00   |
| Section No. 2    |             | 620,00                 | 628,50                        | 20,00   |
| Section No. 3    | 3A          | 622,00                 | 635,00                        | 13,00   |
| Section No. 4    |             | 622,00                 | 630,12                        | 18,20   |
| Section No. 5    |             | 625,00                 | 632,50                        | 7,50  |
| Section No. 6    |             | 625,00                 | 632,50                        | 7,50  |
| Section No. 10   |             | 607,00                 | 617,22                        | 10,22   |
| Section No. 11   | 11A         | 621,00                 | 629,00                        | 8,00  |
|                  | 11B         | 620,00                 | 628,50                        | 8,50  |
| Section No. 12   | 12C         | 614,00                 | 622,70                        | 8,70  |

**Table 4. Thickness of artificial fills and elevation at top of natural soil layer**

The most significant standard sections in terms of foundation characteristics and back loads were 3, 5 and 6.

The recent enlargement to Almudena Cathedral that houses the Tribunal of the Roman Rota stands behind section 3. Further to the surveys conducted, this part of the building, which is located near the pile walls, has deep foundations consisting of 100-cm diameter reinforced concrete piles spaced at around 2,75 m. They measure approximately 18,0 m long and are embedded around 2,0 m in the coarse sandy clay soil layer described above. These piles are interconnected by means of a tie beam on which the building rests.

Standard sections 5 and 6 are located near the main body of the cathedral. According to the information obtained, the cathedral walls and buttresses closest to the pile wall rest directly on natural soil. An English courtyard stands between the cathedral and the pile walls. This structure, nearly abuts with the pile wall, is delimited by a rubble masonry wall with foundations on natural soil. The difference between sections 5 and 6 lies essentially in the distance between these sections and the cathedral wall and buttresses.

The characteristics of the anchors in each section are discussed in the preceding section. Table 5 below gives the geometry and mechanical properties of the most representative sections of the pile walls used in the calculations

| Standard section | Pile wall characteristics, by section |                             |                                    |   |           |                           |                             |
|------------------|---------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|---|-----------|---------------------------|-----------------------------|
|                  | Sub-section                           | Pile wall design length (m) | Pile diameter (cm) and spacing (m) | Equivalent thickness, rectangular cross-section (m) | EA (kN/m) | EI (kN*m <sup>2</sup> /m) | Weight (kN/m <sup>2</sup> ) |
| Section No. 1    |                                       | 37,00                       | 135 cm; 2,00 m                     | 0,993   | 28797000  | 2364080                   | 24,83                       |
| Section No. 2    |                                       | 38,50                       | 135 cm; 2,00 m                     | 0,993   | 28797000  | 2364080                   | 24,83                       |
| Section No. 3    | 3A                                    | 45,00                       | 135 cm; 1,85 m                     | 1,019   | 29546281  | 2555826                   | 25,48                       |
| Section No. 5    |                                       | 42,50                       | 135 cm; 2,00 m                     | 0,993   | 28797000  | 2364080                   | 24,83                       |
| Section No. 12   | 12 C                                  | 24,70                       | 100 cm; 2,50 m                     | 0,620   | 17980000  | 575959                    | 15,50                       |

**Table 5. Pile wall geometry and mechanical properties**

| Sección tipo  | Subsección | Cota de terreno natural | Cota de coronación de muro pantalla | Espesor máximo de relleno antrópico en trasdós de muro pantalla (m) |
|---------------|------------|-------------------------|-------------------------------------|---|
| Sección N° 1  |            | 620.00                  | 627.00                              | 15,00   |
| Sección N° 2  |            | 620.00                  | 628.50                              | 20,00   |
| Sección N° 3  | 3A         | 622.00                  | 635.00                              | 13,00   |
| Sección N° 4  |            | 622.00                  | 630.12                              | 18,20   |
| Sección N° 5  |            | 625.00                  | 632.50                              | 7,50  |
| Sección N° 6  |            | 625.00                  | 632.50                              | 7,50  |
| Sección N° 10 |            | 607.00                  | 617.22                              | 10,22   |
| Sección N° 11 | 11A        | 621.00                  | 629.00                              | 8,00  |
|               | 11B        | 620.00                  | 628.50                              | 8,50  |
| Sección N° 12 | 12C        | 614.00                  | 622.70                              | 8,70  |

**Tabla 4. Espesores de rellenos artificiales y cota de aparición de terreno natural.**

En cuanto a las características de las cimentaciones y cargas en trasdós, las secciones más relevantes son las tipo 3, 5 y 6.

En el trasdós de la Sección 3 se encuentra la ampliación de la Catedral de La Almudena en forma de apéndice, de reciente construcción, que alberga el Tribunal de La Rota. De acuerdo con las investigaciones que se realizaron, se llegó a la conclusión de que la cimentación que presentaba esta parte del edificio, en las proximidades de los muros pantalla, era de tipo profundo, resuelta mediante pilotes de hormigón armado de 100 cm de diámetro, con separación media del orden de 2,75 m, con una longitud del orden de 18,0 m, y empotrados aproximadamente 2,0 m en el terreno natural de naturaleza tosquita. Estos pilotes están recogidos mediante una viga de atado sobre la que se apoya el edificio.

Las secciones tipo 5 y 6 se encuentran en las inmediaciones del cuerpo principal de la Catedral. De acuerdo con la información obtenida, los muros y contrafuertes de la Catedral más próximos a los muros pantalla apoyan directamente sobre terreno natural. Entre la Catedral y los muros pantalla existe un patio inglés que está delimitado por un muro de mampostería cimentado sobre terreno natural y que es prácticamente adyacente a estos muros pantalla. La diferencia existente entre las secciones 5 y 6 radica fundamentalmente en la distancia existente entre los contrafuertes y muro de la Catedral al muro pantalla.

Las características de los anclajes en cada sección ya han sido expuestas en el Apartado anterior. En cuanto a los muros pantalla de pilotes, a efectos de cálculo las características geométricas y mecánicas consideradas en las secciones más representativas de estudio, se recogen en la Tabla 5.

| Características de la Pantalla de Pilotes según la sección de estudio |            |   |  |   |           |                           |                           |
|---|------------|---|--|---|-----------|---------------------------|---------------------------|
| Sección tipo  | Subsección | Longitud de cálculo de la pantalla de pilotes (m) | Diámetro (cm) y separación entre pilotes (m) | Espesor equivalente sección rectangular (m) | EA (kN/m) | EI (kN*m <sup>2</sup> /m) | Peso (kN/m <sup>2</sup> ) |
| Sección N° 1  |            | 37,00   | 135 cm cada 2,00 m                           | 0,993                                       | 28797000  | 2364080                   | 24,83                     |
| Sección N° 2  |            | 38,50   | 135 cm cada 2,00 m                           | 0,993                                       | 28797000  | 2364080                   | 24,83                     |
| Sección N° 3  | 3A         | 45,00   | 135 cm cada 1,85 m                           | 1,019                                       | 29546281  | 2555826                   | 25,48                     |
| Sección N° 5  |            | 42,50   | 135 cm cada 2,00 m                           | 0,993                                       | 28797000  | 2364080                   | 24,83                     |
| Sección N° 12   | 12 C       | 24,70   | 100 cm cada 2,50 m                           | 0,620                                       | 17980000  | 575959                    | 15,50                     |

**Tabla 5. Características geométricas y mecánicas de los muros pantalla**

## 4.2. CALCULATIONS PERFORMED

Two procedures were used for the calculations. Firstly, elastic-plastic equilibrium calculations were performed to design and dimension the retaining system using a finite differences method based on a generalisation of Winkler's hypothesis. Broadly speaking, this procedure consists of dividing the wall into beam-type members whose inner and outer faces rest on springs to simulate soil behaviour. These springs are characterised by a lateral reaction coefficient,  $K_h$  (horizontal subgrade reaction modulus). RIDO software was used for these calculations.

Design and dimensioning were conditioned by the maximum deflection that may arise in the sections of wall, verifying whether they were within the established limits, which in this case were set at 10 to 20 mm (depending on the conditions prevailing in each area). Specifically, in the most critical sections, namely S-8 (Royal Palace), S-3 (cathedral enlargement) and S-5 and S-6 (cathedral body), such movements were limited to 10 mm. For that reason, wall dimensioning as per the calculations performed with the aforementioned RIDO software led to the bracing arrangements required to meet that specification in each case.

Figure 5 shows the geometry of one of the sections checked and the thrust, deflection and forces acting on the wall for the excavation at its deepest.

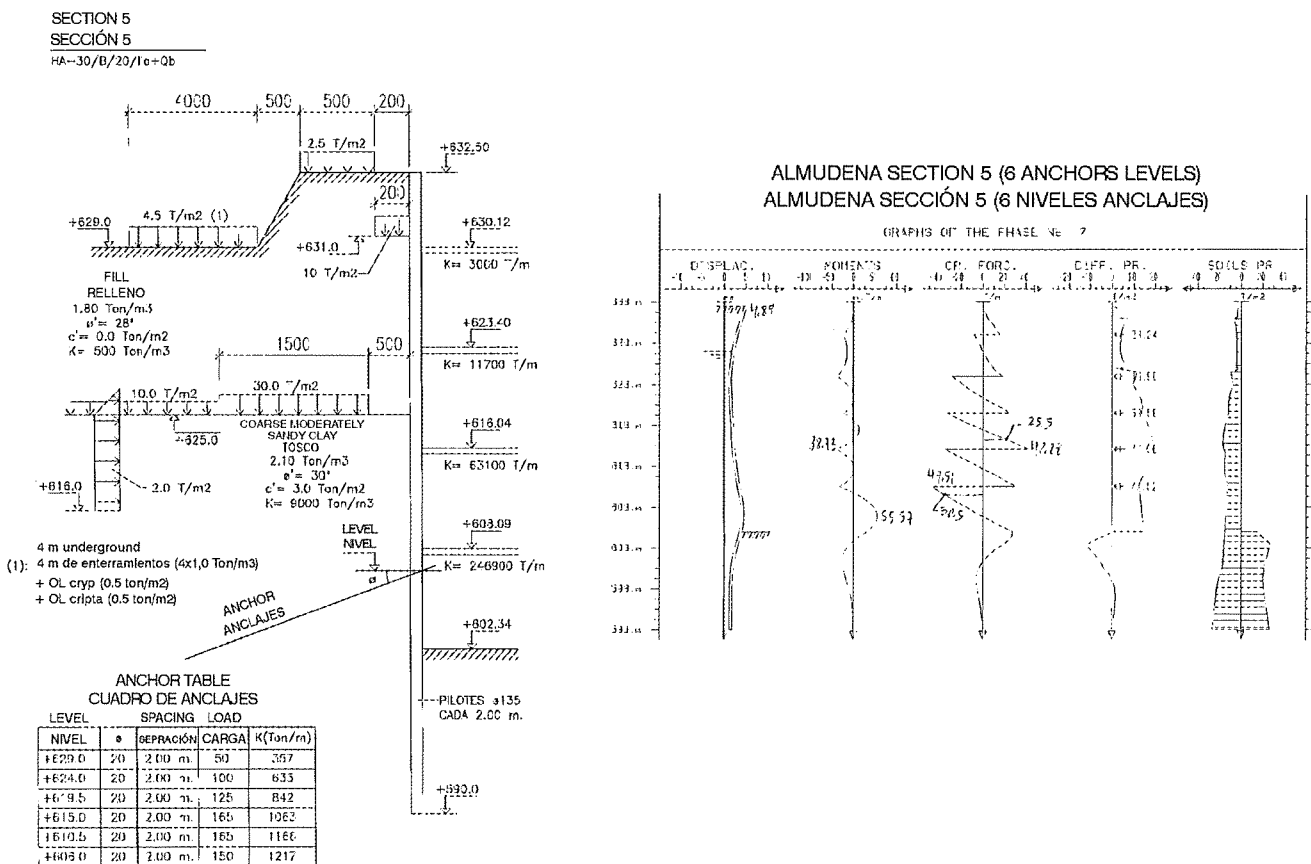


Figure 5. Section 5: design geometry (RIDO software). Earth Pressure, deflection and internal forces acting on the diaphragm wall with the excavation at its deepest. Source: FCC

Figura 5. Sección 5: Geometría de cálculo considerada en Proyecto (Programa Rido). Leyes de empujes y desplazamientos horizontales y esfuerzos en la pantalla, obtenidos en la fase de máxima excavación en cálculos de Proyecto, programa Rido. Fuente F.C.C.

These calculations were subsequently reviewed as part of the technical assistance and quality control activities conducted by INTEMAC, which performed additional computations for the most representative sections.

## 4.2. COMPROBACIONES DE CÁLCULO EFECTUADAS

Las comprobaciones se efectuaron por dos procedimientos. En primer lugar, para el diseño y dimensionamiento del sistema de contención, se utilizó un método de cálculo de equilibrio elastoplástico mediante un modelo de diferencias finitas que responde a una generalización de la hipótesis de Winkler. A grandes rasgos, este procedimiento se basa en la discretización de la pantalla mediante elementos tipo viga, en el que su intradós y trasdós, se apoya sobre resortes, cuyo comportamiento elastoplástico simula la acción del terreno. Estos resortes se caracterizan por un coeficiente de reacción lateral del terreno  $K_h$  (módulo de balasto horizontal). Para reproducir este procedimiento de cálculo se empleó el programa RIDO.

El diseño y dimensionamiento quedó condicionado por los desplazamientos horizontales máximos que se pudieran producir en las distintas secciones de muro comprobadas, verificando que se encontraban dentro de los límites establecidos, que en este caso se fijaron entre 10mm y 20mm para movimiento horizontal (en función de las condiciones particulares de cada zona). En este sentido, en las secciones tipo más críticas, que correspondían a las denominadas S-8 (Palacio Real), S-3 ("Apéndice" de ampliación de la Catedral) y S-5 y S-6 (Cuerpo de la Catedral), se limitaron dichos desplazamientos al valor de 10mm. Por ello, el dimensionamiento de las pantallas, realizado con base a las comprobaciones de cálculo efectuadas con dicho programa RIDO, condujo a la disposición del sistema de arriostramiento necesario en cada caso para cumplir dicha premisa.

En la Figura 5 se muestran la geometría de una de las secciones comprobadas y las leyes de empujes y desplazamientos horizontales y esfuerzos en la pantalla, obtenidos en la fase de máxima excavación.

Posteriormente, dentro de las actividades de asistencia técnica y control de calidad desarrolladas por INTEMAC, antes del comienzo de las obras, se revisaron los cálculos, efectuando comprobaciones adicionales de las secciones más representativas.

Para estas comprobaciones adicionales de movimientos y esfuerzos, se empleó un procedimiento basado en elementos finitos, que permite considerar la interacción suelo-estructura en conjunto y no concentrarla en resortes, bajo la hipótesis de deformación plana, utilizando el Programa PLAXIS.

Con este programa se pueden realizar los cálculos de acuerdo con varios modelos constitutivos: elástico, Mohr-Coulomb, y otros modelos elastoplásticos más avanzados, como modelos especiales para suelos "blandos" y suelos "duros". En este caso, se consideraron materiales a los que se aplicó un modelo elástico (por ejemplo los muros existentes en alguna de las secciones), y otros en los que se aplicó un modelo elastoplástico tipo "Hardening - Soil" (en rellenos antrópicos y terreno natural), que permite tener en cuenta la variación de la rigidez del terreno con los estados de esfuerzos, así como considerar rangos de deformabilidad diferentes para procesos de carga y de descarga/recarga.

En la Figura 6 se muestra la geometría y en la Figura 7 la malla deformada obtenida para la fase final de excavación, de la misma Sección 5 mostrada anteriormente.

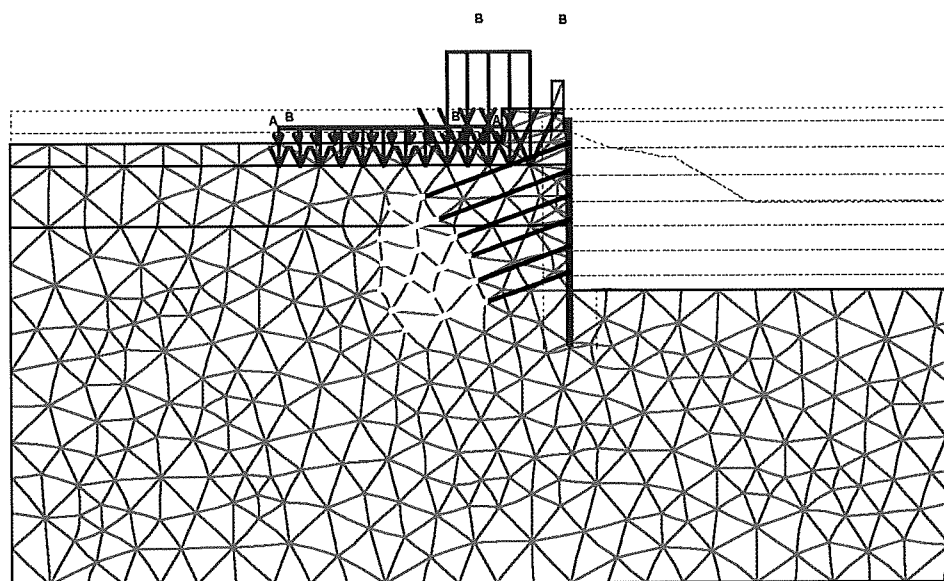
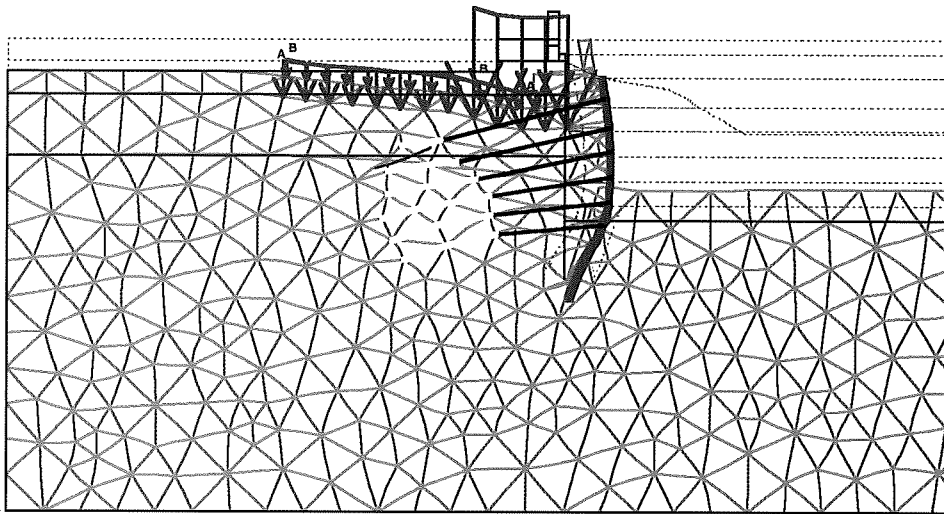


Figura 6. Geometría de la sección 5 de cálculo considerada en las comprobaciones adicionales (Programa Plaxis)  
Figure 6. Geometry of design section 5 used for the additional calculations (Plaxis software)

A finite element-based procedure was used for these additional movement and force calculations, in which the soil-structure interaction is not concentrated on springs but considered as a whole, under the flat deformation hypothesis using PLAXIS software.

This software can be used for calculations based on a number of different models: elastic, Mohr-Coulomb and other more advanced elastic-plastic models specifically developed for "soft" and "hard" soils. Here an elastic model was applied to some of the materials studied (such as the existing walls in some of the sections), while an elastic-plastic, hardening soil-type model was applied to others (anthropic fills and natural soil). This latter scheme accommodates the variation in soil stiffness depending on the forces involved and takes into consideration different ranges of deformability for loading and unloading/reloading processes.

Figure 6 shows the geometry and Figure 6 the deformed lattice obtained for the final stage of excavation in section 5, the same section as shown in Figure 5 above.



**Figure 7. Deformed lattice obtained with the excavation at its deepest (design section 5). Calculations performed with Plaxis software**

**Figura 7. Malla deformada obtenida en la fase de máxima excavación (Sección 5 de cálculo). Cálculos con programa Plaxis.**

As a rule, as shown in the results summarised in the Table below, the movements obtained with this calculation procedure were greater than obtained in the preliminary design stage. In some cases, differences of over one centimetre were detected.

The possible effect of the use of different procedures and calculation parameters in the two methods renders their comparison difficult. Moreover, whereas the output from both the finite element model and RIDO software includes wall movements and forces, only the former also provides information on soil movements as part of the overall model calculations. Subsequent analysis based on the relative movements (as regards differential settlement and horizontal elongation both) defined with this information showed that the sections checked were valid, despite the fact that the total horizontal movements in the wall widely exceeded the design maximum when computed with PLAXIS software. The criteria applied here were as established by MINTRA for enlargement of the Madrid underground system, specifically for monumental buildings: 1/2.000-1/3.000 for angular distortion and 0,05-0,10 % for unitary horizontal deformation.

## 5. CONSTRUCTION

Construction was performed using conventional methods, although the large scale of the wall and the nature of the environs entailed the specific measures discussed below. The order in which the wall components were erected was as follows:

- guide wall
- mortar piles
- structural piles
- tie beam



En líneas generales, tal como y queda reflejado en la tabla de resultados que se incluye más adelante, los desplazamientos que se obtenían por este procedimiento de cálculo, eran mayores a los que se obtenían en la fase preliminar de diseño. Estas diferencias, en algunas de las secciones eran superiores al centímetro.

Al margen de la influencia que en estas diferencias tiene el hecho de que tanto la metodología como los parámetros de cálculo que se emplean en los dos métodos aplicados son diferentes, lo que hace difícil su comparación, debe tenerse en cuenta que en los programas de elementos finitos, no solo se obtienen los desplazamientos y esfuerzos en la pantalla (tal como ocurre en el programa RIDO), sino que además, se obtienen los desplazamientos en el terreno, en el conjunto del modelo de cálculo. Ello ha permitido comprobar los valores de movimientos relativos (tanto asientos diferenciales como elongaciones horizontales), cuyo análisis, permitió juzgar las secciones comprobadas como válidas, a pesar de que los movimientos horizontales totales en la pantalla superaban en muchos casos con el programa PLAXIS el máximo establecido en la fase de diseño. En este sentido, se consideraron los criterios establecidos por MINTRA para las obras del Metro de Madrid que, para edificios monumentales, son de 1/2.000-1/3.000 para la distorsión angular y 0,05%-0,10% para la deformación horizontal unitaria.

## 5. CONSTRUCCIÓN

La construcción se realizó de manera tradicional, si bien la magnitud del muro y el entorno conllevaron aspectos específicos que se resaltarán a continuación. De manera general el orden constructivo de los elementos del muro fue el siguiente:

- Murete guía.
- Pilotes de mortero.
- Pilotes estructurales.
- Viga cadena
- Viga reparto anclajes.
- Anclajes/Codales
- Drenajes.
- Muro forro.
- Cimentación contrafuertes.
- Contrafuertes.

A continuación se exponen diferentes aspectos constructivos agrupados por los principales elementos estructurales.

### ***Muro Pantalla***

La construcción del muro pantalla comenzó con la del murete guía tras la correspondiente nivelación. Dada la proximidad de las construcciones y de algunas cimentaciones, especialmente las correspondientes al muro de contorno del patio de la catedral y la magnitud necesaria del murete a construir para la ejecución de los pilotes, junto con la dificultad de tener que ejecutar a lo largo de la alineación pilotes de diferente diámetro (estructurales y secantes), se optó por el empleo de una solución de murete guía consistente en la formación de un macizo de mortero ejecutado mediante la excavación y relleno inmediato por tramos de reducida longitud. De este modo sobre la cara superior del macizo se efectuaba el replanteo de los ejes de los pilotes pudiendo avanzar simultáneamente con la ejecución de los pilotes de mortero y estructurales. Este sistema tiene la ventaja adicional de servir como guía para el pilote tanto en el sentido longitudinal de la pantalla como en el transversal. La ejecución de un murete guía tradicional hubiera implicado la necesidad de la ejecución en dos fases, una primera para la dimensión de los pilotes de mortero y tras la ejecución de todos estos la segunda correspondiente a la de los pilotes estructurales, realizando esto por tramos concretos con el correspondiente condicionamiento de la necesidad de una programación lineal en función de los tramos. Adicionalmente hubiera conllevado el mantenimiento de una excavación abierta próxima a las edificaciones hasta la terminación de todos los pilotes de cada tramo.

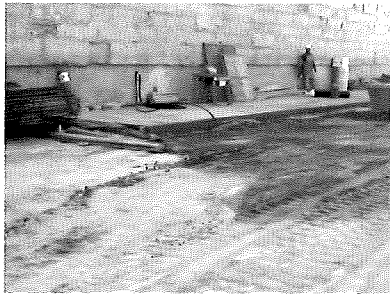
La siguiente fase corresponde con la ejecución de los pilotes de mortero y pilotes estructurales. Por cada pilote estructural es necesario que se hayan ejecutado previamente los dos pilotes laterales de mortero, ya que durante la perforación del pilote estructural se muerden los dos pilotes de mortero quedando finalmente hormigonado contra la superficie excavada consiguiendo así el contacto necesario para la estanqueidad requerida. La perforación se realizó con barrena discontinua, empleando encamisado recuperable hasta salvar la profundidad de rellenos existente en la parte superior. Durante las perforaciones fue necesario atravesar restos de construcciones existentes de diferente naturaleza (fábrica de ladrillo, piedra, etc) para lo que en estos casos se empleó como sistema de corte en la barrena el "carrotière". Por otro lado se realizó un control de verticalidad durante la ejecución, facilitado por el empleo de la entubación recuperable. El hormigonado se realizó empleando tubo tremie introducido hasta el fondo

- anchor load distribution beam
- anchors/angle braces
- drains
- lining wall
- buttress foundations
- buttresses

A series of constructional considerations are discussed below, grouped by the chief structural members.

### ***Pile wall***

Pile wall construction began with the erection of the guide wall, once the terrain had been levelled. The guide wall solution was adopted in light of the proximity of other buildings and foundations, in particular the wall around the cathedral courtyard, along with the large scale of the structure needed for the piles and the difficulty entailed in working with (structural and overlapping mortar) piles of varying diameter. This solution entailed building a block of mortar by short lengths as the excavation proceeded. The top of this block was then used to stake out the mortar and structural pile centrelines. This system afforded the additional advantage of serving as a guide for the piles both longitudinally and transversally (with respect to the wall). Building a conventional guide wall would have entailed the need for two-stage construction: the first for the mortar pile dimensions and, once all these piles were in place, the second for the structural piles, erected by specific sections. This second stage would have been conditioned, moreover, by the need for linear scheduling that would have varied depending on the section. It would also have involved keeping the excavation open alongside the adjacent buildings until all the piles in each section were built.

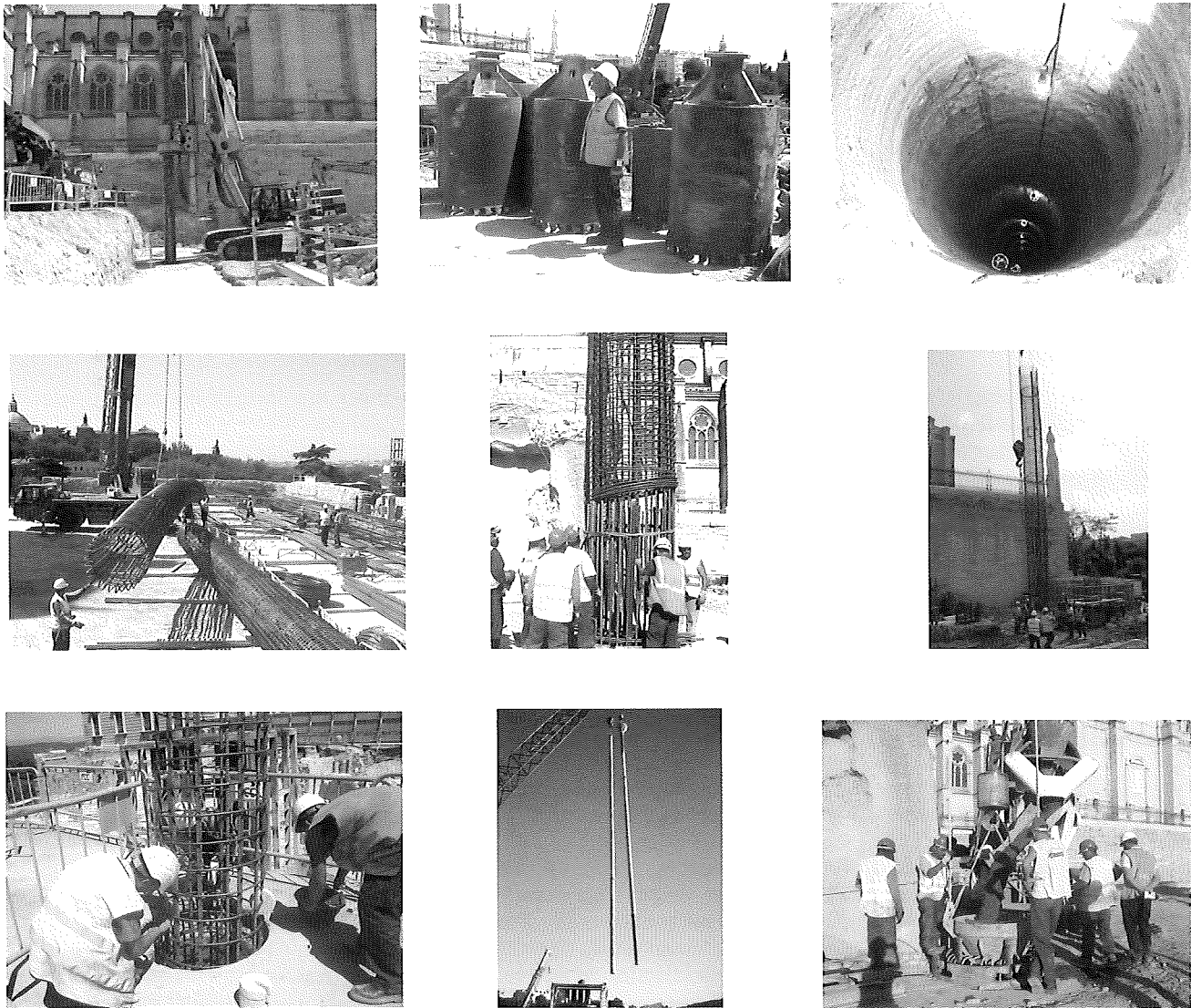


**Figure 8. Guide wall construction**  
**Figura 8. Ejecución de murete guía**

Guide wall construction was followed by the erection of the mortar and structural piles. The two adjacent mortar piles had to be built before casting the structural pile in between because the penetration for the latter cut grooves in these two mortar structures. The structural pile was cast against the excavated surface, forming the overlap needed to ensure watertightness. Penetrations were made with a discontinuous auger using reusable lining to the bottom of the anthropic fill. Where the drill had to bore through the remains of different types (brick masonry, stone and similar) of old buildings to complete these penetrations, a bucket auger was used. Verticality was monitored during construction, a task that was facilitated by the re-usable lining. The concrete was poured to the bottom of the excavation with tremie piping. In general, the pipe was raised two or three times only to ensure the total absence of discontinuities in the concrete.

Once the piles were in place, conventional methods were used to build the tie beam, which was cast against the piles themselves to ensure the greatest possible contact area. This operation was followed by excavation, level by level, to the depths where the anchors and angle braces were to be positioned.

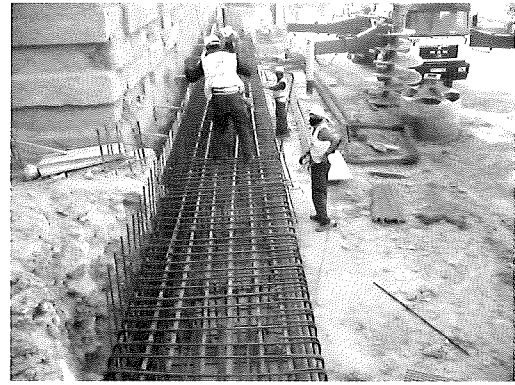
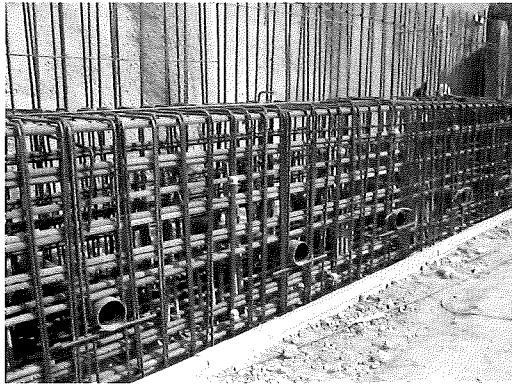
de la excavación efectuando de manera general tan sólo dos o tres retiradas de tramos de tubo existiendo de ese modo garantía total de ausencias de cortes del pilote en el hormigonado por ascensión excesiva del tubo.



**Figura 9. Ejecución de Pilotes**  
**Figure 9. Pile construction**

Terminada la ejecución de los correspondientes tramos de pilotes se procedió a la ejecución mediante sistemas tradicionales de la viga cadena, la cual se hormigonaba contra las medianerías de manera que existiera con las mismas el mayor contacto posible. Tras esta operación se comenzaba la excavación para acceder a los diferentes niveles de anclajes y codales a ejecutar.

Para la ejecución de las vigas de reparto de anclajes la primera operación a realizar era verificar el estado de superficies exteriores de los pilotes en ese nivel de manera que se realizara el encaje geométrico correspondiente de viga de reparto y que se mantuvieran los anchos mínimos especificados en proyecto en las zonas de generatriz exterior de los pilotes, siendo necesario en los casos de existencia de sobreexcavaciones realizar el perfilado de los pilotes. Posteriormente se realizaba la disposición de armaduras de conexión de las vigas de reparto a los pilotes mediante barras de acero corrugado ancladas mediante resina. La viga de reparto presentaba la singularidad de quedar posteriormente englobada dentro del muro forro a construir más adelante. Esto conllevaba la necesidad de dejar dispuesta durante la ejecución la correspondiente armadura vertical del muro con las esperas necesarias para



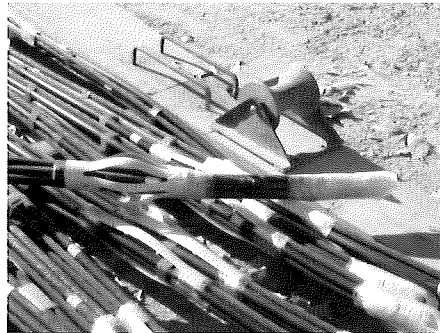
**Figure 10. Tie beam construction**  
**Figura 10. Ejecución de Viga Cadena**

The first step in anchor load distribution beam construction was to check the state of the outer pile surfaces at the respective depth and thereby ensure the beam would lock geometrically into the space provided, while maintaining the minimum design widths over the outermost arc on the piles. Over-excavation was rectified by filling out the piles. The corrugated steel reinforcement bars connecting the distribution beams to the piles were then secured to the piles with resin. These distribution beams would be subsequently embedded in the lining wall built at a later stage. As a result, provision had to be made for the respective vertical continuing steel for the joint between the two members. While the continuing steel at the top of the beam entailed no particular difficulties, the steel at the bottom posed a problem, for it had to project below the excavation dug to build the beam. The solution finally adopted was to house the continuing steel in a trench excavated for that purpose and filled with sand until the concrete could be cast. When the rebar was laid out, provision was made for the perforations that would later be required for the anchors. Upon completion of these operations, the formwork was set in place and conventional methods were deployed to cast and cure the concrete.

***Anchors and angle braces***

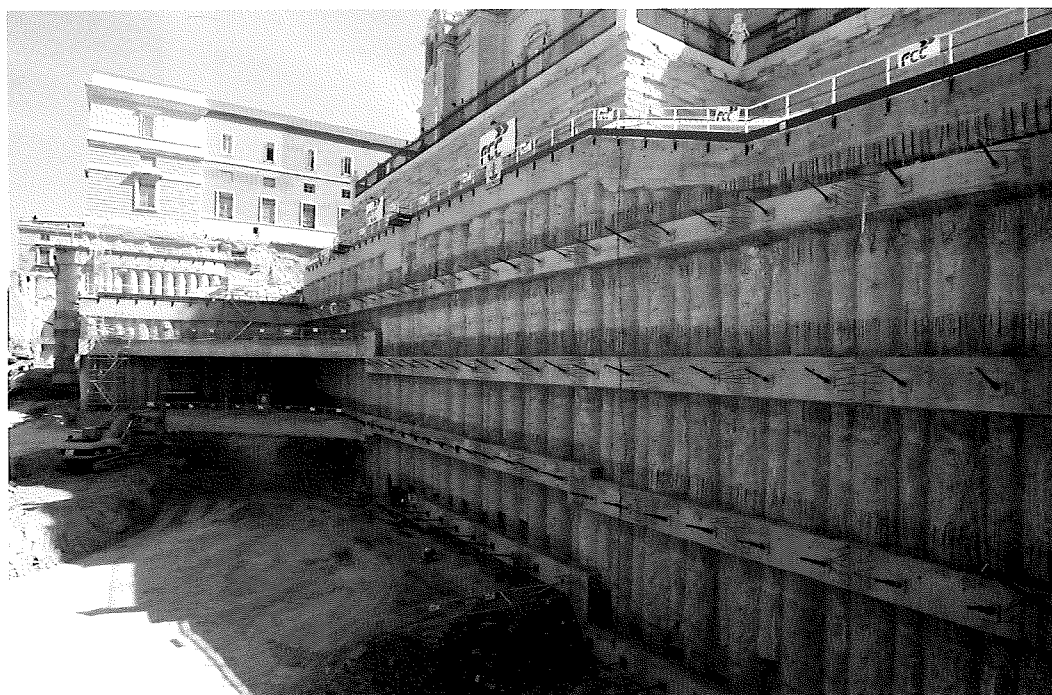
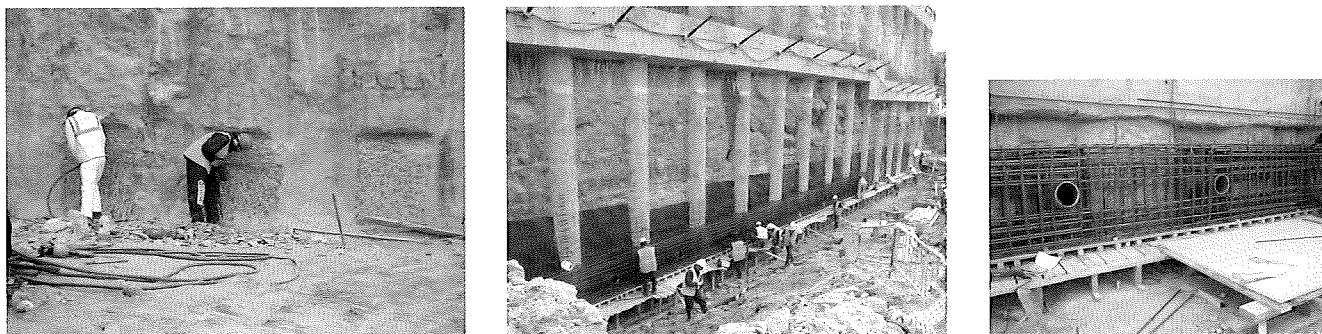
The anchors were prepared on site to adapt them more readily to construction requirements, reduce the need for post-manufacture handling and facilitate quality control.

The anchors consisted of active steel cables sheathed in 50- to 90-mm polyethylene tubes, depending on the number of cables laid along the entire clear length. This sheath was sealed with textile products and rapid-setting mortar in the bulb area. Centring elements were spaced every 2 to 3 m lengthwise and spreaders every 2 to 3 m lengthwise in the bulb area. Grips were also positioned along the bulb and the cables were cinched together at the end with a steel clamp. Three 20-mm polyethylene injection tubes were installed, the first for primary and the other two for secondary injections. The two secondary tubes were lidded on both ends and fitted with bushings spaced at 1-m intervals. Welding was used to join the separate polyethylene elements. The anchors were stored on site unwound and hauled into position over rollers.



**Figure 11. Anchor composition and on-site transport**  
**Figura 11. Composición y transporte de anclajes**

solapar posteriormente. Las esperas superiores a la viga no planteaban inconvenientes reseñables pero sí la ejecución de las esperas inferiores, ya que quedaban por debajo del nivel de excavación realizado para ejecutar la viga. La solución establecida finalmente consistió en la excavación de una zanja en la que se disponían alojadas las esperas, que posteriormente se rellenaba de arena de manera previa al hormigonado. Durante la disposición de armaduras se dejaban dispuestos los pasatubos necesarios evitando efectuar perforaciones posteriormente durante la ejecución de los anclajes. Tras estas operaciones se terminaban las operaciones de encofrado, hormigonado y curado de manera tradicional.



**Figura 12. Ejecución y vista general de vigas de reparto**  
**Figure 12. Distribution beams: overview and construction**

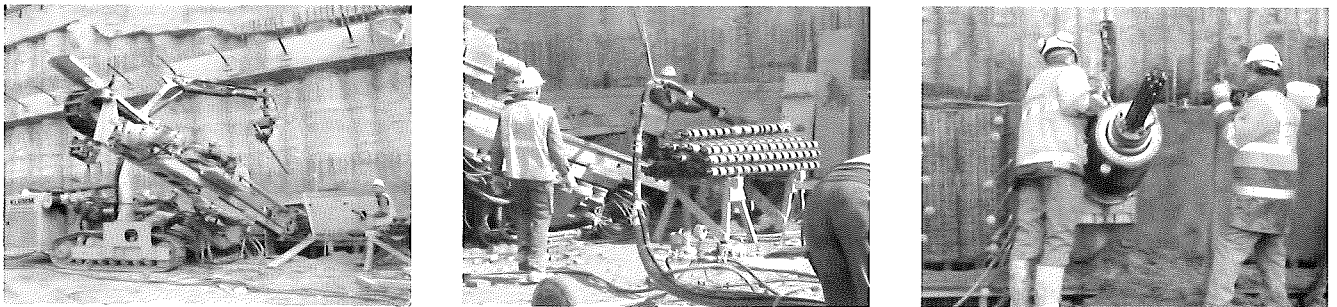
### **Anclajes y Codaes**

El primer aspecto a destacar referente a la ejecución de los anclajes sería el hecho de que los mismos se fabricaron en la propia obra, lo cual permitía una más fácil adaptación a los requerimientos durante la ejecución, una menor necesidad de manipulación una vez fabricados y una mayor facilidad de control.

La composición general de los anclajes se expone a continuación. Los cables de acero activo se recubrían con una vaina de polietileno de diámetro 50 a 90 mm según el número de cables en toda la longitud libre. Esta vaina se sellaba en la zona de separación con la longitud de bulbo mediante productos textiles y el empleo de un mortero de fraguado rápido. Se disponían centradores cada 2-3 metros de longitud y separadores cada 2-3 metros de longitud en la zona del bulbo. Asimismo a lo largo del bulbo se disponían diferentes abrazaderas y en el extremo se unificaba el

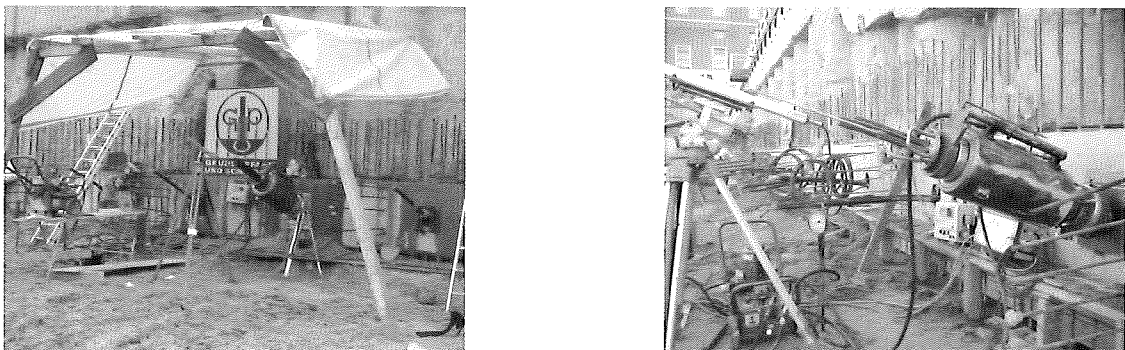
Construction of the anchors *per se* involved the steps set out below.

- Penetration: a crane and other ancillaries were used in conjunction with the penetration rig. In addition to traditional air- and water-drilling methods, a jack hammer was used, but only as warranted by particularly difficult conditions. The penetration diameter was 150 mm. Some of the penetrations were lined, depending on the area.
- Anchor installation and primary grout: in the air-only drilled penetrations, the anchor was installed dry and subsequently grouted from the bottom up. In the air- and water-drilled penetrations, or penetrations with no lining, the grout was injected first and the anchor was installed immediately thereafter. In lined penetrations, injection continued during lining withdrawal. The w/c ratio in the primary grout was 0,5.
- Primary injection fracturing and secondary injection: the first operation consisted of fracturing the primary grout by injecting water at 40 kp/cm<sup>2</sup>. Injection was then resumed with a secondary grouting tube at a pressure of at least 10 kp/cm<sup>2</sup>. If the minimum pressure could not be reached, the supplementary secondary grouting tube was used and the operation was repeated. This tube was then cleaned for possible subsequent use. The injection process was regarded to be complete when the grout could not be fractured at 40 kp/cm<sup>2</sup>. The w/c ratio in the secondary grout was 0,6.
- Tensioning and protection: once the grout reached the necessary strength it was tensioned with a multi-strand jack at least 4 days after the last secondary grouting.



**Figure 13. Anchor installation**  
**Figura 13. Ejecución de anclajes**

The anchors were subjected to suitability and acceptance tests. The suitability trials were conducted at the lowest anchor levels in the most critical sections, while acceptance tests were run on all the anchors not subjected to suitability trials. The acceptance test load was 125 % and the suitability trial load 140 % of the nominal anchor load. Regardless of the location, the anchors used for the suitability trials were built to strength characteristics similar to the value established for the highest strength anchors (180 t), deploying the same operations, materials, equipment and characteristics that would be used throughout to install all the anchors. An exploratory trial was likewise conducted, installing a 180-tonne anchor with a bulb approximately 20 % smaller than specified in the design. The trials were conducted as indicated in Spanish standards NLT-257 (primarily) and NLT-258. The minimum stabilisation time required for the heaviest load in the suitability trials was 120 minutes. The results of the various trials were acceptable in all cases.



**Figure 14. Anchor testing**  
**Figura 14. Pruebas en anclajes**

conjunto de cables mediante un dispositivo metálico. De cara a la inyección se disponían tres tubos de 20mm de polietileno, empleándose el primer tubo para la inyección primaria y los dos restantes para la inyección repetitiva. Los dos tubos de inyección repetitiva incorporaban manguitos a una distancia de un metro y las correspondientes tapas en los extremos. Los empalmes de los elementos de polietileno se realizaban mediante soldadura. El acopio de los anclajes se realizaba sin enrollar los mismos y el transporte interior se efectuaba con el empleo de accesorios de rodadura adaptados.

La ejecución propiamente dicha de los anclajes comportó las siguientes etapas:

- Perforación: Se empleó un equipo de perforación auxiliado por una grua, y diferentes accesorios. La perforación se realizó de manera general con métodos clásicos apoyados con aire y agua, empleándose de manera puntual una máquina de martillo en condiciones difíciles. El diámetro de la perforación fue de 150 mm. Dependiendo de las zonas se empleó tubería de revestimiento para la perforación.
- Instalación de anclajes e inyección primaria: En la perforación con sólo aire el anclaje se instalaba en condiciones secas realizando posteriormente la inyección de lechada de abajo a arriba. En la perforación con aire y agua o sin tubería de revestimiento se inyectaba primero la lechada e inmediatamente después se introducía el anclaje. En los casos de entubación durante la retirada de la tubería se continuaba con la inyección. La relación a/c de la inyección primaria era de 0,5.
- Fracturación de inyección primaria e inyección repetitiva: La primera operación consistía en la fracturación de la lechada de la inyección primaria mediante la inyección de agua a 40 kp/cm<sup>2</sup>. Posteriormente se realizaba la inyección con un tubo de inyección repetitiva a una presión mínima de 10 kp/cm<sup>2</sup>. En caso de no poder alcanzar la presión mínima se empleaba el segundo tubo de inyección repetitiva y se repetía la operación, efectuando la limpieza de este último tubo para una posible inyección posterior. Terminado el proceso la inyección se considera terminada cuando al inyectar con agua a 40 kp/cm<sup>2</sup> no era posible romper la lechada. La relación a/c de la reinyección era de 0,6.
- Tesado y protección: Adquirida la resistencia necesaria de la inyección se efectuaba el tesado mediante gato multifilar con un periodo mínimo de 4 días entre la última reinyección y el tesado.

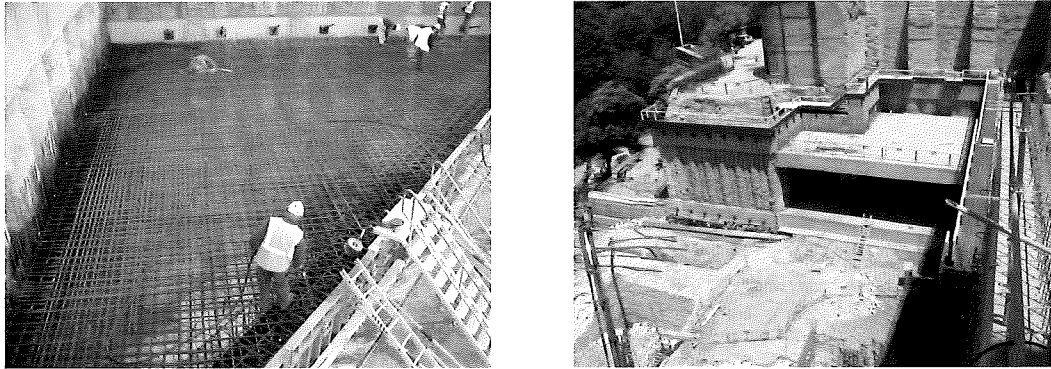
Para los anclajes fueron realizadas pruebas de idoneidad y de recepción. Los ensayos de idoneidad se realizaron en los primeros niveles de los anclajes de las secciones de mayor compromiso, realizándose pruebas de recepción en la totalidad de los anclajes en los que no se realizaban pruebas de idoneidad. La carga para las pruebas de recepción correspondía al 125% de la carga nominal del anclaje y para las pruebas de idoneidad la carga de prueba ascendía hasta el 140% de la carga nominal del anclaje. Para las pruebas de idoneidad, independientemente de la localización de la prueba se construyeron anclajes con características resistentes similares a las de los anclajes de mayor capacidad de la obra (180t) con las mismas operaciones, materiales, equipos y características que se emplearían a lo largo de las obras para la ejecución del resto de los anclajes. Asimismo se realizó una prueba de investigación ejecutando un anclaje de 180 toneladas de capacidad mecánica con un bulbo reducido un 20% aproximadamente con respecto a los especificados en proyecto. Las pruebas se realizaron siguiendo consideraciones de las normas NLT-257 y NLT-258, empleando de manera general la primera. El tiempo mínimo de estabilización requerido para el escalón de máxima carga en las pruebas de idoneidad fue de 120 minutos. Los resultados de las diferentes pruebas resultaron admisibles en todos los casos.

En el caso de los codales, su ejecución se efectuó al llegar el nivel de excavación a la correspondiente cota del codal, hormigonándose tras compactar el terreno y disponer una capa de hormigón de regularización y una capa de panel fenólico de 3 mm para evitar la adherencia y facilitar la excavación posterior. En el caso de las vigas de borde se dispusieron encofrados para conseguir la regularidad geométrica deseada. La conexión de los codales a los pilotes se realizó mediante barras corrugadas ancladas con resina.

Tras la ejecución del correspondiente nivel de anclajes o codales por zonas se continuaba con la excavación hasta el siguiente nivel. Cabe mencionar en este sentido la complicación que introdujo en la planificación de la obra y el control de los plazos el continuo hallazgo de restos de construcciones. Estas construcciones fueron en todos los casos excavadas, documentadas, inventariadas y desmontadas bajo la continua supervisión de un completo equipo encargado de la arqueología de las obras durante la construcción.

The angle braces were installed when the excavation reached the respective level. The concrete was cast after compacting the soil and laying concrete blinding as well as a 3-mm phenolic panel to prevent soil-concrete bonding and facilitate subsequent excavation. Formwork was used to build the edge beams to ensure the geometric regularity required. The angle braces were connected to the piles with resin-anchored corrugated rebar.

After the respective level of anchors or angle braces was completed, excavation proceeded to the next lower level. The continuous uncovering of remains of older construction rendered works planning and timing particularly complex. These constructions were consistently excavated, documented, inventoried and dismantled under the ongoing supervision of an archaeological team commissioned for the works.



**Figure 15. Angle braces construction and overview in north area**  
**Figura 15. Ejecución y vista de codales en zona norte**

### ***Drains***

As noted earlier, given area geomorphology and to ensure that any variations over time in the thickness of the perched water tables remained within the margins defined in the geotechnical surveys, California-type drains were built at the interface between the anthropic fill and the impermeable substrate to channel seepage.

### ***Lining wall and buttresses***

Buttress and lining wall erection constituted the final construction stage. The first step in this stage of the works was to lay the foundations, consisting of a concrete slab prepared with the respective continuing steel for connection to the future foundation slab for the rest of the structure.

Prior to casting, the reinforcement for the entire lining wall was assembled and attached to the piles with resin-secured corrugated rebar. The concrete for the lining wall was cast section-by-section between each two consecutive anchor load distribution beams. The continuing steel projecting out of the wall for connection to the buttresses pierced through the expanded metal steel formwork installed for the buttresses. These operations were performed at the same time as buttress reinforcement and formwork assembly and concrete casting.

With the exception of the bottom few metres, where conventional forms were used, the rest of the buttresses were cast with slipforms. Troughs were placed at the abutment between the lining wall and the anchor load distribution beams to pour and compact the concrete as required. This entailed thickening the wall from the initial 350-mm minimum to the 470 mm finally regarded to be needed for construction. That notwithstanding, given the limited access and space available around the wall, a very high flowability concrete was used, which was poured with tremie pipes to accommodate the 12-m heights covered by the slipforms.

After the concrete was cast, sacrificial circular steel formwork was fitted around each anchor to provide for subsequent access to these elements.





**Figura 16. Vista general de codales**  
**Figure 16. Overview of angle braces**

### ***Drenajes***

Como se ha indicado anteriormente, ante la geomorfología de la zona y con objeto de controlar que las hipótesis de potencia de espesores de los niveles de agua se mantuvieran dentro de los márgenes previstos en caso de evolución en el tiempo respecto a lo obtenido en los diferentes estudios geotécnicos, al alcanzar la zona de contacto entre los rellenos y el sustrato impermeable se ejecutaron drenes californianos. Con canalizaciones adosadas al emboquille para la recogida de las aguas de filtración.

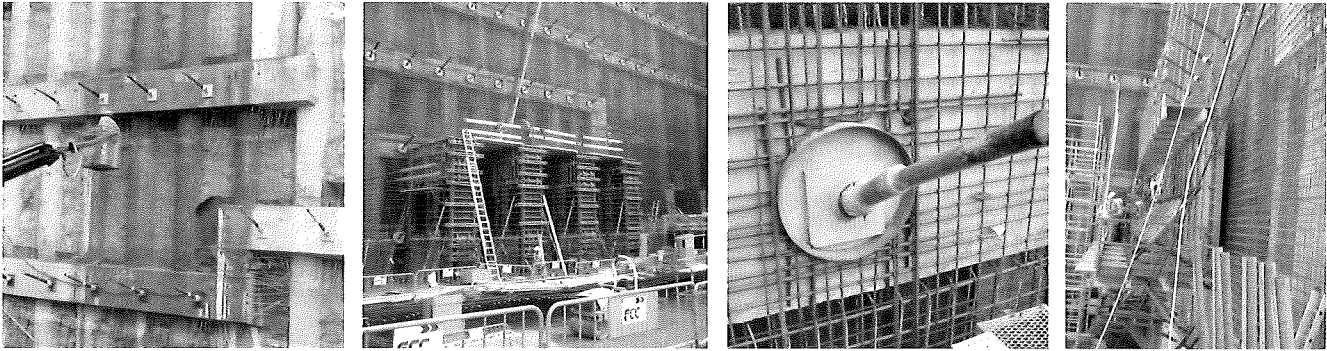
### ***Muro forro y contrafuertes***

Terminada la excavación, la última etapa constructiva consistió en la ejecución de los contrafuertes y el muro forro, la cual comenzó con la ejecución de la cimentación de los mismos mediante una losa de hormigón en la que se dejaron las correspondientes esperas para la conexión con la futura losa de cimentación del resto de la estructura.

La construcción de estos elementos se realizó avanzando en primer lugar el ferrallado de la totalidad del muro forro ejecutando la conexión con los pilotes mediante barras corrugadas ancladas con resina. Posteriormente se avanzaba el hormigonado de dicho muro forro por tramos situados entre las diferentes vigas de reparto de los anclajes. Durante la ejecución del muro forro se dejaban las esperas de conexión con los contrafuertes encofrando el ámbito del contrafuerte mediante metal desplegado atravesado por las esperas. Tras estas operaciones se continuaba con el avance del ferrallado, encofrado y hormigonado de los contrafuertes.

Para los encofrados, salvados los primeros metros mediante encofrado tradicional, la ascensión se realizó mediante trepado. Cabe destacar la incidencia de la ejecución del hormigonado del muro forro en su encuentro con las vigas de reparto de los anclajes para lo que se dispusieron bebederos que facilitarían un adecuado vertido y compactado, aumentando el espesor del muro desde los 350mm mínimos considerados en el dimensionamiento hasta los 470mm que finalmente se consideraron necesarios por ejecución. No obstante lo anterior, ante lo reducido de los accesos y espesores en la zona del muro para el hormigón, se empleó una consistencia fluida. En lo referente al hormigonado de contrafuertes, puesto que los trepados se realizaban con órdenes de magnitud de 12 metros, los hormigonados se efectuaban mediante el empleo de tubos tremie.

Durante la construcción, para permitir la continuidad de acceso a los anclajes, tras el hormigonado se dispusieron encofrados metálicos circulares perdidos alrededor de cada anclaje.



**Figure 17. Lining wall and buttress overview and construction**  
**Figura 17. Ejecución y vista general del muro forro y contrafuertes**

## 6. INSTRUMENTATION, LOGGING, MONITORING AND CONTROL

A dual approach was adopted to monitor and control wall behaviour throughout the works. On the one hand, the wall itself was instrumentally monitored, tracking deformation over time. And on the other, the damage observed in the adjacent buildings in the preliminary inspection conducted at the beginning of the works, as well as the deformations and sloping at certain points on those buildings, were instrumented, monitored and continuously inspected to detect possible defects. These activities are discussed below.

### 6.1. INSTRUMENTAL MONITORING

Pile wall instrumental monitoring was designed around the following systems:

- Cross-Hole sonic logging
- inclinometer logging
- load cell instrumenting
- topographic control.

#### *Cross-Hole sonic logging*

Sonic logging of the members forming the wall provides information on possible voids or honeycombing arising during concrete casting. This is of particular importance in large-scale, deeply buried concrete members. While special and technically suitable casting procedures were established, verification was deemed advisable to ensure that the casting pace and tremie positioning were satisfactory and the resulting system reliable.

Instrumental monitoring was therefore divided into two stages. In the first, members were sampled until the casting procedure was regarded to have been sufficiently refined, and in the second a smaller sample was taken for suitable

## 6. INSTRUMENTACIÓN, AUSCULTACIÓN, SEGUIMIENTO Y CONTROL

El planteamiento del seguimiento y control de la evolución del comportamiento del muro a lo largo de la construcción se realizó en una doble vertiente. Por un lado, la auscultación e instrumentación del propio muro verificando la evolución de las deformaciones en el tiempo, y por otro la monitorización y auscultación de los daños observados en la inspección previa al comienzo de las obras en las edificaciones anexas y el seguimiento de deformaciones e inclinaciones en determinados puntos de dichas edificaciones, junto con la inspección continua para verificar la posible aparición de defectos. A continuación se exponen las actividades realizadas en ambos aspectos.

### 6.1. AUSCULTACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DEL MURO

El planteamiento de la auscultación e instrumentación del muro pantalla se diseñó contemplando los siguientes sistemas:

- Auscultación sónica mediante Cross-Hole.
- Auscultación mediante inclinómetros.
- Instrumentación mediante células de carga.
- Control topográfico.

#### *Auscultación mediante Cross-Hole.*

La auscultación mediante ensayos sónicos de los elementos que forman el muro permite obtener información de posibles defectos de compacidad o coqueas resultantes durante el proceso de hormigonado. Esto resulta de especial interés en el caso de hormigonados de elementos de gran magnitud y profundidades importantes. Si bien se establecieron procedimientos de hormigonado especiales y técnicamente adecuados, se consideró conveniente contrastarlos, verificando que con los ritmos de hormigonado y los puntos de colocación de los tubos tremie, el resultado obtenido aportaba suficiente fiabilidad al sistema.

De este modo, el planteamiento de la auscultación se estableció en dos etapas. Una primera de mayor muestreo de elementos, hasta que se consideró a punto el procedimiento de hormigonado, y una segunda con un muestreo más reducido que sirvió de control del adecuado mantenimiento del sistema en el tiempo y a lo largo del desarrollo con las variaciones geotécnicas existentes según las zonas. En la primera etapa el muestreo fue del 100% y en la segunda del 66% aproximadamente.

A continuación se describe brevemente el fundamento y aplicación del sistema aplicado.

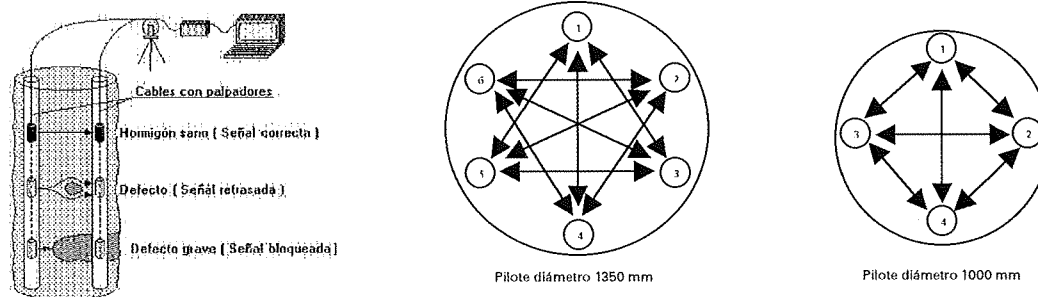


Figura 18. Cross-Hole. Disposición de Tubos de Auscultación

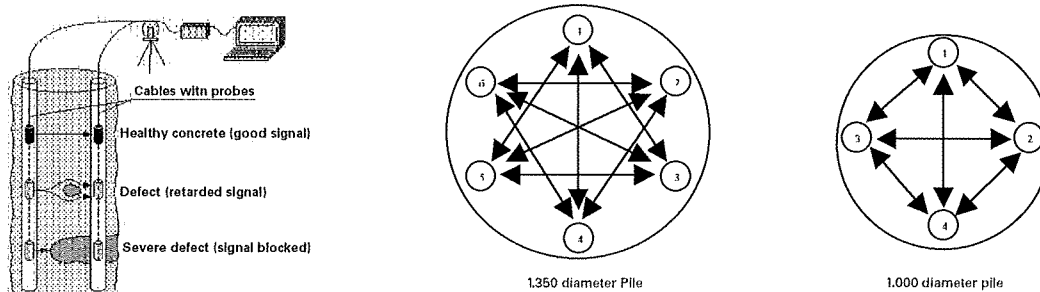
Durante la ejecución de los pilotes que serían posteriormente ensayados, se colocaron una serie de tubos de acero convenientemente arriostrados a las armaduras. Se dispusieron seis tubos en el caso de los pilotes de 1350 mm y cuatro para los de 1000 mm. De este modo se realizaron nueve diagragías en el primer caso y seis en el segundo. En la Figura 18 se muestran las disposiciones comentadas.

Antes de realizar el hormigonado de los batches se rellenaron los tubos de agua y se taparon para evitar fugas. El agua cumple una doble función: por una parte ayuda a mantener una temperatura uniforme en el tubo reduciendo eventuales fenómenos de desadherencia entre el tubo y el hormigón circundante y adicionalmente durante el ensayo sirve de acoplante a los palpadores del tubo.

A una edad de los pilotes comprendida entre los 3 y los 20 días se realizaron los ensayos, que consisten en introducir un emisor y un receptor de impulsos ultrasónicos de 35 KHz cada uno en un tubo. Los transductores se llevan hasta el fondo de los tubos y a partir de allí comienza el ensayo.

control of the system over time in keeping with zone-by-zone geotechnical variations. In the first stage, 100 % of the members were sampled, and in the second approximately 66 %.

The grounds for and application of the system implemented are described briefly below.



**Figure 18. Cross-Hole. Monitoring tube arrangement**

A series of tubes were tied to the reinforcement bars during construction of the piles that would later be tested. Six such tubes were placed on the 1350-mm and four on the 1000-mm piles. A total of nine diagraphs were conducted on the former and six on the latter. The positions of the tubes are shown in Figure 18.

Before concrete was cast in the excavation pits, the tubes were filled with water and lidded to prevent leaks. The water met a dual purpose: on the one hand it contributed to maintaining a constant temperature in the tube, reducing possible de-bonding between the tube and the surrounding concrete, and on the other it served as the transmission medium during the tests.

The tests conducted on 3- to 20-day piles consisted of placing a 35-kHz ultrasound emitter and receiver in a tube. Testing began when the transducers were set in the bottom of the tubes.

As the transducers moved upward, the system was automatically activated every 6 cm, at which points the ultrasound wave was emitted, received and recorded.

The graphs obtained when the transducers reached the surface reflected the wave energy and the ultrasound pulse count time between tubes. Each wave log could therefore be studied and all the information was saved in a file for subsequent processing. Several samples of ultrasound logs are shown in Figure 19.

### ***Deformation logging with inclinometers***

The instruments presently in use that best log pile wall deformation are inclinometers. This system provides information on wall deformation from the outset and for as long as desired, regardless of the action that must be taken at the wall intrados. In the scheme used, the points on the wall for measuring deformation were chosen because they were deemed to be representative, as a result of changes in geotechnical conditions or in view of system length in large sections. Fifteen inclinometer control points were established around the perimeter of the wall.

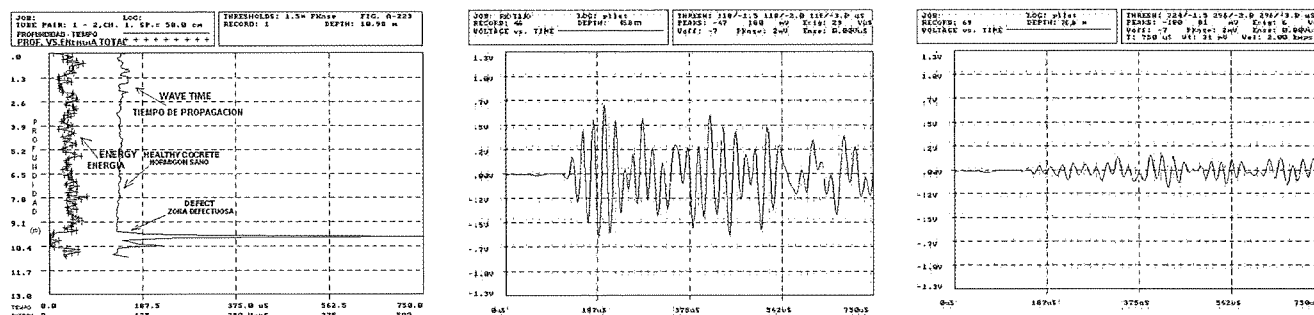
This entailed installing inclinometer tubes, as briefly described below.

Aluminium inclinometer tubes were installed inside steel pipes which were positioned alongside the pile reinforcing steel prior to concrete casting. The characteristics are listed below.

- The piles instrumented with inclinometers were of the same dimensions (length, thickness and depth) as the adjacent piles, to ensure that the readings were representative.
- The protective steel pipes housing the inclinometers were of the same length as the piles and projected from 10 to 20 cm above the top of the tie beam.
- The inclinometer tube used had a maximum outer diameter of 63 mm. Consequently, the protective steel pipe embedded in the wall had to measure 100 cm in diameter for satisfactory installation.

Al desplazar los transductores desde el fondo de los tubos se activa automáticamente cada cierta distancia prefijada (en nuestro caso 6 cm) el equipo, produciéndose automáticamente la emisión, recepción y registro de la onda ultrasónica.

Una vez que los transductores llegan a la superficie pueden observarse los gráficos obtenidos que reflejan la energía de la onda y el tiempo de paso entre tubos del impulso ultrasónico. Es posible observar cada uno de los registros de la onda realizados. Toda la información queda grabada en archivo para poder ser posteriormente procesada. A modo de ejemplo en la figura 19 se muestran registros obtenidos en un ejemplo de auscultación de esta técnica.



**Figura 19. Gráficos resultados en ensayos Cross-Hole:  
Ejemplo de Diagrama. Espectro de Onda Sana. Espectro de Onda defectuosa**  
**Figure 19. Cross-hole test graphs: sample diagram; healthy wave spectrum; defective wave spectrum**

### **Auscultación de deformaciones mediante inclinómetros**

El sistema actual que posiblemente mejor registra el comportamiento y la deformación de un muro pantalla es la auscultación de deformaciones mediante inclinómetros. Mediante este sistema es posible conocer la deformación del muro desde el comienzo, prolongándose el mismo hasta el momento deseado, independientemente de las actuaciones que sea necesario efectuar por el intradós del muro. El planteamiento del sistema puede establecerse fijando los puntos principales del muro de los que conocer la deformación, bien por la representatividad de los mismos, bien por el cambio de condiciones geotécnicas, o bien por la extensión del sistema longitudinalmente ante grandes tramos. En el caso del muro en cuestión se establecieron quince puntos de control mediante inclinómetros distribuidos a lo largo del perímetro.

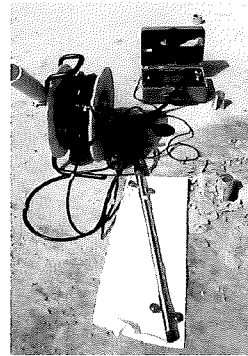
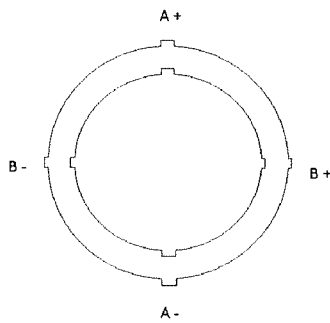
Para este sistema se instalan tuberías inclinométricas, describiéndose brevemente el mismo a continuación.

Las tuberías inclinométricas de aluminio se instalaron en el interior de tuberías de acero, que quedaron dispuestas adosadas a la armadura de los pilotes, previamente a su hormigonado. Para ello se tuvieron en consideración los siguientes aspectos:

- Los pilotes con tubería inclinométrica tenían iguales dimensiones (longitud, espesor y profundidad) al del resto de los pilotes adyacentes, para que las medidas registradas fueran representativas.
- Los tubos de protección para los inclinómetros eran de la misma longitud que los pilotes, sobrepasando la cota superior de la viga cadena, entre 10 cm y 20 cm.
- El tubo inclinométrico empleado, presentaba un diámetro máximo exterior de 63 mm., por lo que para realizar con garantías la instalación, la tubería de protección a introducir en la pantalla fue de un diámetro 100 mm.
- La tubería de protección se ancló a la armadura del pilote y fue provista de tapón de fondo y superior con el fin de garantizar la estanqueidad de la tubería durante el proceso de hormigonado. Antes del hormigonado, al igual que en el caso de los ensayos Cross-Hole, se llenaron completamente de agua y se mantuvieron llenas hasta el final del fraguado del hormigón. Para asegurar la completa estanqueidad de la tubería en todo el proceso, los tapones eran roscados, y resistentes ante la presión hidrostática del hormigón y posibles golpes.
- Las lecturas iniciales de los inclinómetros se efectuaron antes de los trabajos de excavación para el vaciado del recinto.

- The steel pipe was anchored to the pile reinforcement and capped at the bottom to ensure watertightness during concrete casting operations. Prior to concrete casting, as in the Cross-Hole tests, the pipe was filled with water and kept full until the concrete had set completely. The caps were threaded and able to resist the hydrostatic pressure from the concrete as well as possible impact, for full watertightness throughout the process.
- The initial inclinometer readings were taken prior to the earthworks.

The inclinometer tube was sealed on the outside with cement grout and had four grooves: one pair forming axis A and an orthogonal pair forming axis B, as depicted in Figure 20.



**Figure 20. Standard pipe cross-section and measuring apparatus**  
**Figura 20. Sección tipo de tubería y equipo de medida**

Direction A+ was used as the control axis or direction. The tube was installed in a way such that axis A+ concurred with the expected orientation and direction: namely, perpendicular to the walls and inward into the excavation or the wall intrados.

The 80-cm long and 25-cm diameter cylindrical inclinometer probe was fitted with a system of outer wheels that travelled along the grooves to centre, adjust the position of and move the probe along the tube.

A biaxial probe was used. Such probes have two accelerometers that measure the deviation from the vertical in the measuring axis. Accelerometer "A" was aligned to be able to measure the slope along the plane of the wheels, which, as noted, is generally taken to be the reference axis. Accelerometer "B" took measurements in the perpendicular direction.

The readings were taken at 50-cm intervals from the bottom of the pipe upward.

Using this technique, deviation from the vertical can be measured in both planes, A and B. The readout value was proportional to the sine of the angle of deviation from the vertical.

Two measurements were taken per tube. In the second, the probe was turned 180° with respect to the first reading to reduce the impact of small measurement errors. The result was taken to be the semi-sum of the two readings  $((A+)-(A-))/2$  and  $((B+)-(B-))/2$ .

The system used had a measuring range of 30° from the vertical per reading, a resolution of 0,1 mm and a precision of  $\pm 2,5$  mm per 25 m.

#### ***Anchor instrumenting with load cells***

Load cell furnish information on the stress on the instrumented anchor over time. This is useful because, if analysed together with the information on the existence of strain on the anchors, it determines whether, at any given time, the strain entails an increase in the anchor load or whether the bulb is creeping and cracking or otherwise moving.

In this system load cells placed at the top of the anchor are used to take periodic measurements.

This apparatus must be fitted with a sufficiently accurate system for monitoring and recording the temperature when the measurements are taken, for this parameter has a substantial impact on the results, as shown in Figure 21.

La tubería inclinométrica quedó sellada a la exterior mediante una lechada de cemento, y presenta interiormente cuatro acanaladuras ortogonales. Dos de ellas diametralmente opuestas, conforman el eje de medida denominado A, y las otras dos conforman el eje denominado B, tal como se refleja en la Figura 20.

La dirección A+, se usó como eje o dirección de referencia, instalando la tubería de forma que coincidiera el eje A+ con la dirección y sentido del movimiento esperado, en nuestro caso, perpendicular a los muros y hacia el recinto interior de excavación o intradós de pantallas.

La sonda inclinométrica es un instrumento de forma cilíndrica de 80 cm de longitud y 25 mm de diámetro, con un sistema de ruedas exteriores que se introducen en las acanaladuras y permite centrar, acoplar y desplazar la sonda a lo largo de la tubería inclinométrica.

La sonda utilizada fue de tipo biaxial. Este tipo de sondas llevan incorporados dos acelerómetros que miden la inclinación del eje de medida con la vertical. El acelerómetro "A" tiene una alineación que permite medir las inclinaciones en el plano de las ruedas que, como se ha indicado anteriormente, se suele adoptar como eje de referencia. El acelerómetro "B" realiza medidas en el eje ortogonal.

Los registros se llevaron a cabo introduciendo la sonda hasta el fondo de la tubería, realizando lecturas en intervalos de 50 cm en sentido ascendente.

Con esta técnica en cada lectura se registran simultáneamente las inclinaciones respecto a la vertical de los dos planos de medida, A y B. El valor registrado en la unidad de lectura es proporcional al seno del ángulo de inclinación respecto a la vertical.

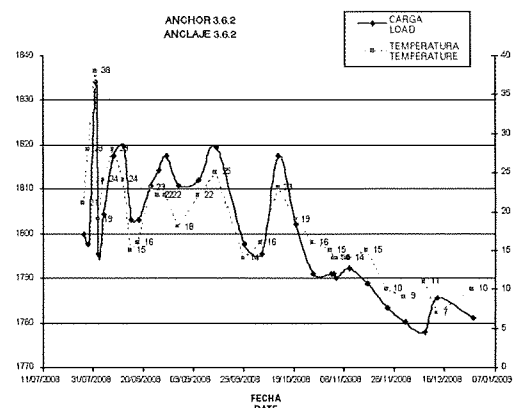
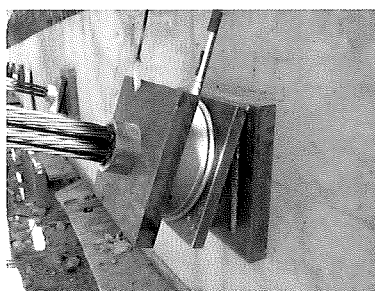
Para cada tubería inclinométrica se realizan dos medidas. En la segunda se introduce la sonda girada 180° respecto a la posición de la primera medida, con la finalidad de disminuir la influencia de pequeños errores de medida. Se toma como resultado de cada medida la semisuma de las dos lecturas  $((A+)-(A-))/2$  y  $((B+)-(B-))/2$ .

El equipo que se empleó dispone de un rango de medida de 30° respecto a la vertical para cada lectura, con una resolución de 0,1 mm y precisión de  $\pm 2,5$  mm por cada 25 m de longitud de medida.

#### **Instrumentación de anclajes mediante células de carga**

La disposición de células de carga es un sistema que permite conocer la tensión que presenta el anclaje instrumentado a lo largo del tiempo. Este aspecto, es interesante puesto que combinado con el conocimiento de la existencia de deformaciones en el nivel del anclaje, puede discernir en un momento dado si las deformaciones están conllevando un incremento de la carga de los anclajes o bien se están produciendo por la fluencia y fisuración o desplazamiento del bulbo.

El sistema consiste en la disposición de las células de carga en la cabeza de anclaje realizando mediciones posteriores periódicas de las mismas.



**Figura 21. Células de Carga. Gráfico de medidas y relación con temperatura. Disposición de células**  
**Figure 21. Load cells. Variations in readings and temperature over a two-month period. Cell positions**

### Topographic control.

Three methods were used to monitor pile wall geometry during construction:

- three-dimensional for the top of the pile wall and points on the façades
- planimetric for points on the vertical sections of the outer wall using polar electromagnetic distance measurement
- altimetric in cathedral areas, with precision geometric levelling.

The reference system used was a local system specifically established for geometric monitoring with axes running parallel and perpendicular to the main longitudinal direction of the wall. The check points are marked in Figure 22.

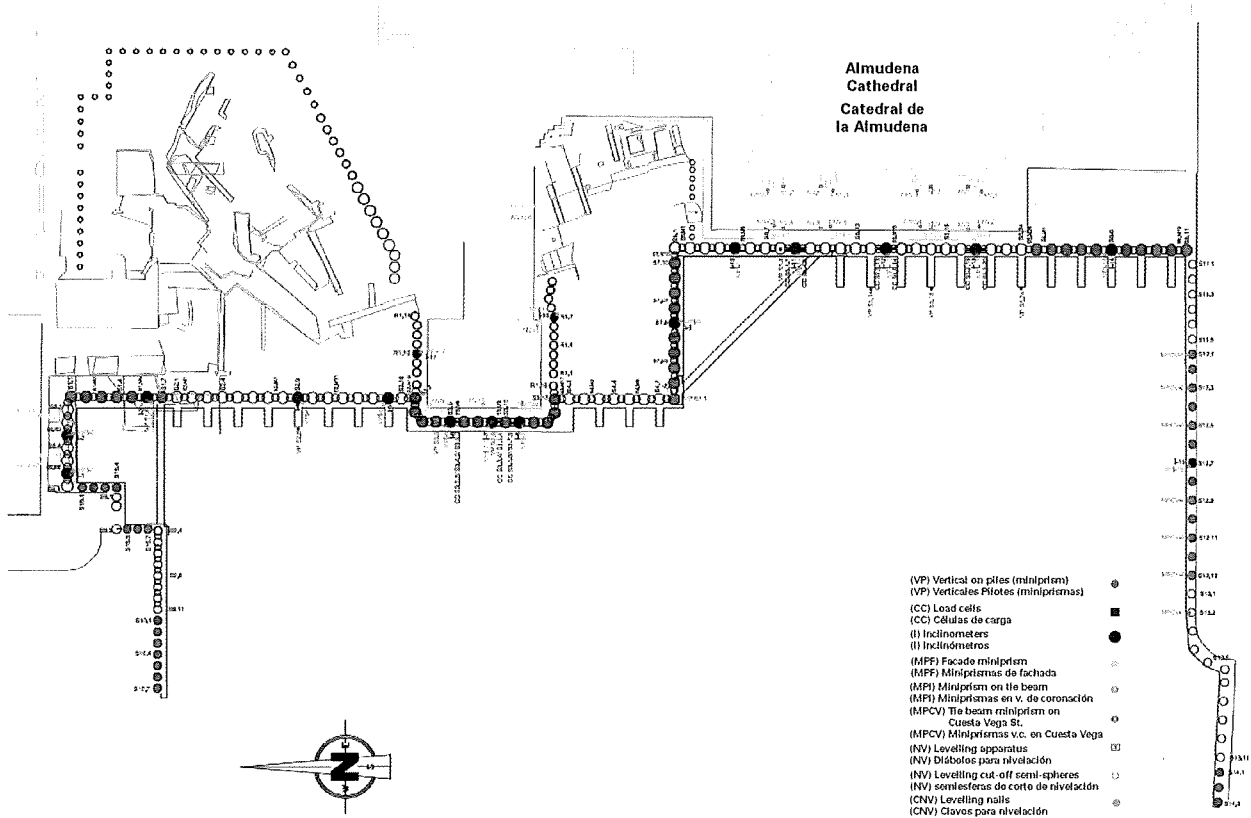


Figure 22. Map of instrumental monitoring check points  
Figura 22. Plano de puntos de control e instrumentación

The three-dimensional and planimetric measurements were taken at stations defined to sub-millimetre precision with highly accurate instruments (primarily with total station) using nominal angular and distance measurement precision values of  $\pm 1''$  and  $\pm (1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm})$ . Fixed or adjustable miniprisms were used in the measurement check points, depending on the point. The precision used for the altimetric readings was sub-millimetre, i.e.,  $\pm 0,4 \text{ mm}$  or smaller.

### 6.2. MONITORING AND INSTRUMENTING ADJACENT BUILDINGS

Before wall construction was undertaken, the adjacent buildings were inspected to detect and record any existing damage to prevent its erroneous attribution to wall behaviour or misinterpretation of that behaviour in future.

After that inspection, the following measures were adopted for building monitoring:

- installation of clinometers to monitor possible deviations from the vertical
- use of strain and crack gauges to monitor cracking
- inspections to detect subsequent damage
- topographic control.



Asociado a este sistema es necesario disponer de un sistema de control de temperaturas que aporte la información con precisión suficiente en el momento de realizar las comprobaciones, ya que este es un parámetro con influencia notable como se puede observar en la representación de la Figura 21.

### **Control Topográfico**

El control geométrico del muro pantalla durante la construcción se realizó mediante una triple comprobación con el siguiente compendio:

- Tridimensional de coronación del muro pantalla y de puntos de fachadas.
- Planimétrico de puntos de secciones verticales del exterior del muro mediante radiación polar electrodistanciométrica.
- Altimétrico, en zonas de la Catedral, realizado mediante nivelación geométrica de precisión.

Como sistema de referencia se empleó un sistema local establecido de manera particular para el control geométrico orientando sus ejes según la dirección longitudinal principal del muro y su perpendicular. En la Figura 22 es posible observar el sistema general de puntos de comprobación.

Las mediciones para los controles tridimensionales y planimétricos se realizaron con estacionamientos efectuados submilimétricamente y equipos (principalmente estación total) de alta precisión con precisiones angulares y distanciométricas nominales de  $\pm 1''$  y  $\pm(1\text{mm} + 1\text{ ppm})$ . En los puntos de control para las mediciones se empleaban mini-prismas, bien fijos o estacionables orientables según los puntos. Para las comprobaciones altimétricas se empleó un nivel de precisión con observación de referencia submilimétrica igual o mejor que  $\pm 0,4\text{mm}$ .

## **6.2. MONITORIZACIÓN Y AUSCULTACIÓN DE EDIFICACIONES ANEXAS**

La monitorización y auscultación de edificaciones anexas comenzó con la realización de una inspección a las mismas previa al comienzo de los trabajos de construcción del muro, con objeto de detectar y levantar los daños que ya presentaran y evitar que en un futuro éstas pudieran ser achacadas erróneamente al comportamiento del muro y esto conllevara malinterpretaciones de dicho comportamiento real.

Realizada dicha inspección la monitorización y auscultación de las edificaciones se planteó mediante los siguientes aspectos:

- Control de inclinaciones mediante clinómetros.
- Control de fisuras por extensometría y reglas fisurométricas.
- Inspección para la detección de nuevos daños.
- Control topográfico

### **Control de inclinaciones mediante clinómetros**

Se dispusieron bases para la realización de lecturas mediante clinómetros en los muros medianeros de las edificaciones de manera que las posibles inclinaciones de los mismos aportaran información de posibles distorsiones angulares y asientos en las proximidades. Para la realización de estas medidas se ha empleado un clinómetro Anglestar de Schaevitz, de  $0,01^\circ$  de apreciación y  $20^\circ$  de rango máximo. En la Figura 23 se muestran gráficos con la disposición en planta de las bases clinométricas y realización de una medición.

### **Control de fisuras por extensometría y reglas fisurométricas.**

Dependiendo de la tipología de fisuras, la precisión de medida y la accesibilidad al público con las consecuentes posibles manipulaciones de la instrumentación por el mismo, se estableció el control de las fisuras detectadas mediante extensometría y reglas fisurométricas.

La extensometría se ha empleado principalmente en las fisuras de fachada y muros principales de la Catedral junto con paramentos horizontales, utilizando un extensómetro Huggenberger de  $0,001\text{ mm}$  de apreciación, con  $400\text{ mm}$  de base de medida en las mediciones. Por su parte las reglas fisurométricas se han empleado en fisuras en el interior de las edificaciones y en elementos secundarios. A continuación se muestran ambos sistemas.

### **Installation of clinometers to monitor possible deviations from the vertical**

Schaevitz Anglestar clinometers with an accuracy of 0,01° and a maximum range of 20° were installed on building party walls to take readings from which information on possible angular distortion and settlement in the area could be deduced. Figure 23 [25] contains a plan view of the clinometer layout and photographs of the measuring procedure.

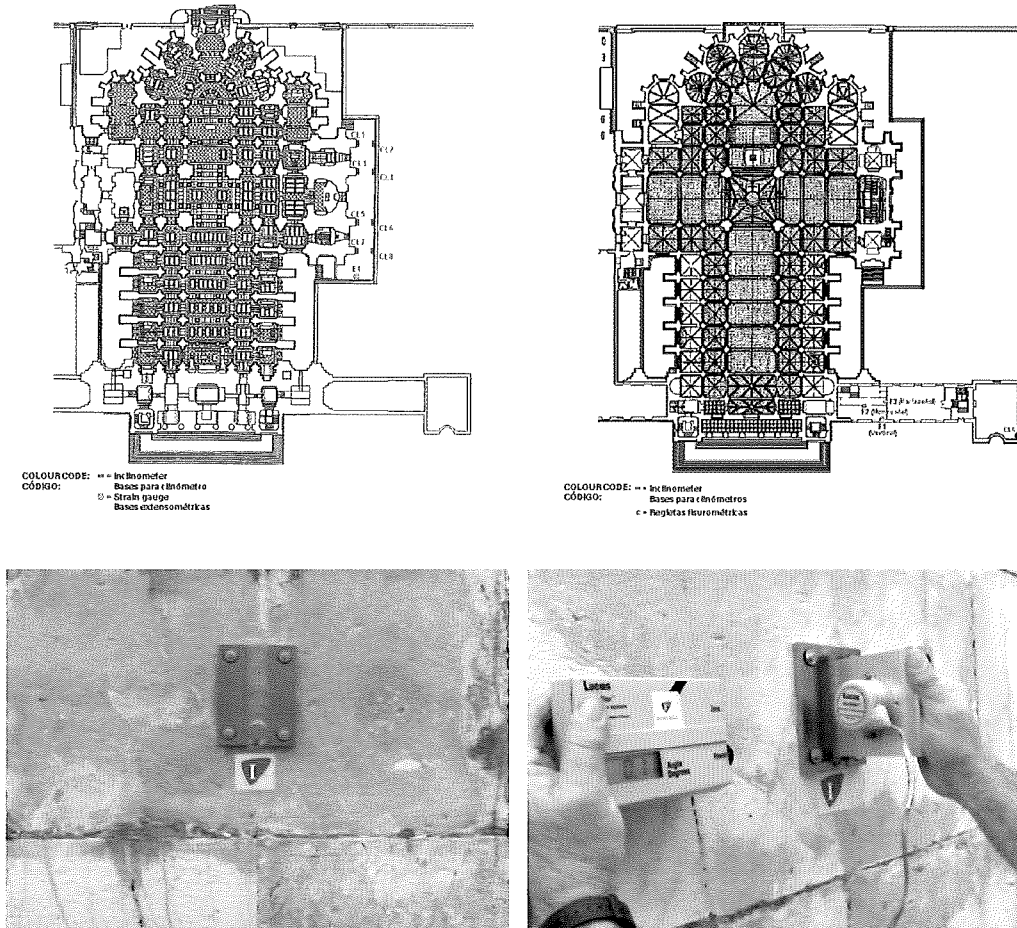


Figure 23. Clinometer layout and measurement  
Figura 23. Disposición y medición de clinómetros

### **Use of strain and crack gauges to monitor cracking**

In light of crack typology, the reading precision required and ready accessibility of the instruments, with the concomitant likelihood of their manipulation by the public at large, cracks were monitored with strain and crack gauges.

Strain gauges were used primarily in façade cracks and main walls and horizontal surfaces in the cathedral. Huggenberger gauges with an accuracy of 0,001 mm and a 400-mm measuring base were used for this purpose. Crack gauges were used for cracks found indoors and on secondary elements. The two systems are illustrated in Figure 24.

### **Inspections to detect subsequent damage**

Inspections were continuously conducted during the works to obtain information on damage subsequent to initiation of the works and its possible attribution to wall behaviour, with a view to decision-making in the event of anomalous situations. These inspections had to be continuous to be able to identify the exact stage of wall construction when the possible damage appeared, as well as the seasonal component associated with variations in the extent of the damage.

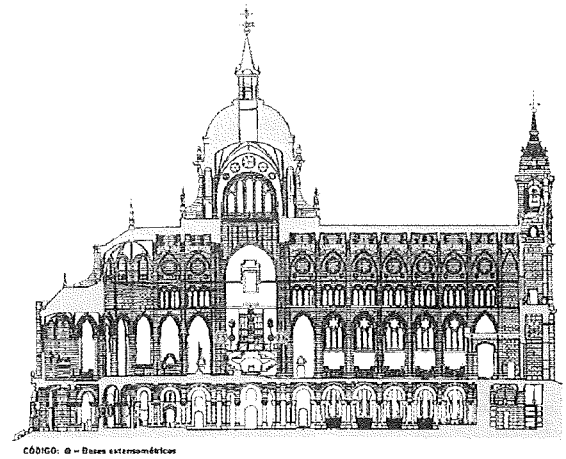
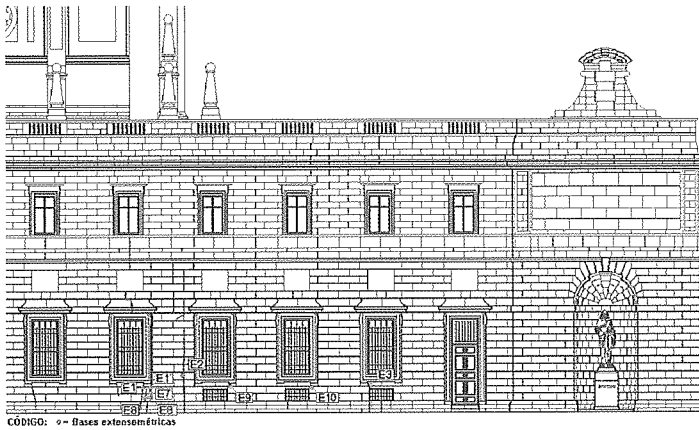
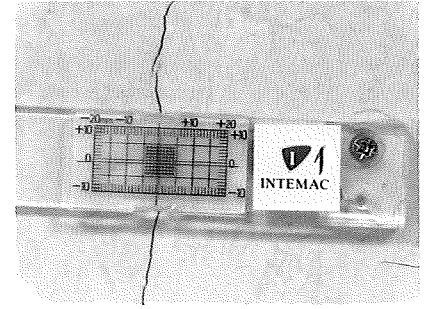
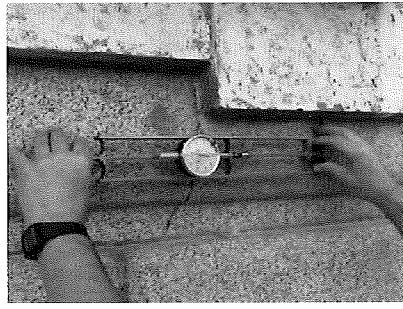
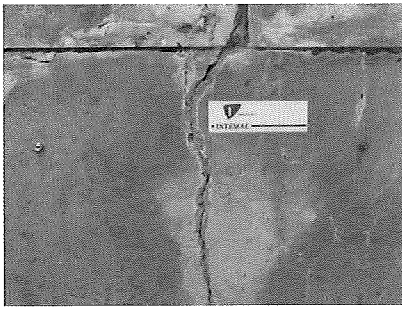


Figure 24. Crack monitoring with strain and crack gauges  
Figura 24. Control y Seguimiento de Fisuras por extensometría y reglas fisurométricas

### **Inspección para la detección de nuevos daños.**

La inspección para la posible detección de nuevos daños se realizó de manera continuada durante las obras, con objeto de disponer de información sobre los daños y su posible origen en el comportamiento del muro de cara a la toma de decisiones en caso de situaciones anómalas. Esta inspección era necesario que se efectuara de manera continuada, puesto que se debía poder contrastar el momento preciso de la aparición del posible daño con la fase evolutiva de construcción del muro, así como la componente estacional asociada a las variaciones en la magnitud del daño.

### **Control Topográfico**

Se realizó un seguimiento de movimientos en las medianerías de las edificaciones mediante medidas continuas de bases localizadas en puntos representativos. Este sistema de seguimiento resultaba de utilidad para el contraste de movimientos detectados mediante técnicas alternativas y la observación de tendencias, siendo especialmente útil en el seguimiento de puntos de difícil accesibilidad en las fachadas.

### **6.3. RESULTADOS OBTENIDOS Y COMPARACIÓN CON LOS MODELOS**

En la Tabla 6, se exponen los resultados obtenidos en las comprobaciones de cálculo realizadas con los programas PLAXIS y RIDO relativos a los desplazamientos horizontales en coronación de la pantalla y los movimientos horizontales máximos, que se producen a una determinada cota, correspondientes a la fase de cálculo en la que se realiza la excavación máxima. Los resultados reflejados corresponden a las secciones más representativas de la obra.

En esta Tabla se indican asimismo los valores de los movimientos horizontales registrados en la instrumentación topográfica e inclinométrica efectuada hasta abril de 2009, transcurridos del orden de ocho meses desde que se había alcanzado la máxima excavación, momento en el que prácticamente ya se había construido íntegramente la losa de cimentación del edificio.

### Topographic control

Movements in the party walls were tracked by continuously by taking readings in stations located at representative points. This tracking system was used to compare the movements detected with other techniques and to identify trends, and was particularly useful for monitoring scanty accessible points on the façades.

### 6.3. INSTRUMENTAL FINDINGS AND COMPARISON WITH MODEL RESULTS

Table 6 gives the PLAXIS and RIDO software results on the deflection at the top of the wall and the maximum deflection at any given elevation when the excavation was at its deepest. Findings are shown for the most representative sections of the wall.

This Table also gives the deflection recorded by the topographic and inclinometric instruments through April 2009, eight months after the excavation had reached its deepest level, when the building foundation slab had been built nearly in its entirety.

The graph in Figure 25 plots the deflection found with the inclinometer in one of the pipes installed in section 5, adjacent to Almudena Cathedral.

Figure 26 shows the horizontal deflection in (and perpendicular to) the capping beam in section 5 found with topographic measurements.

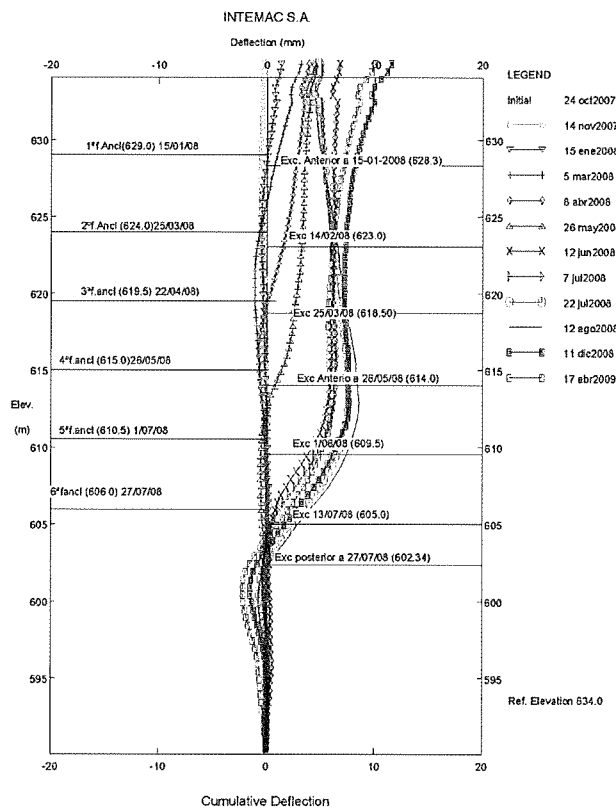
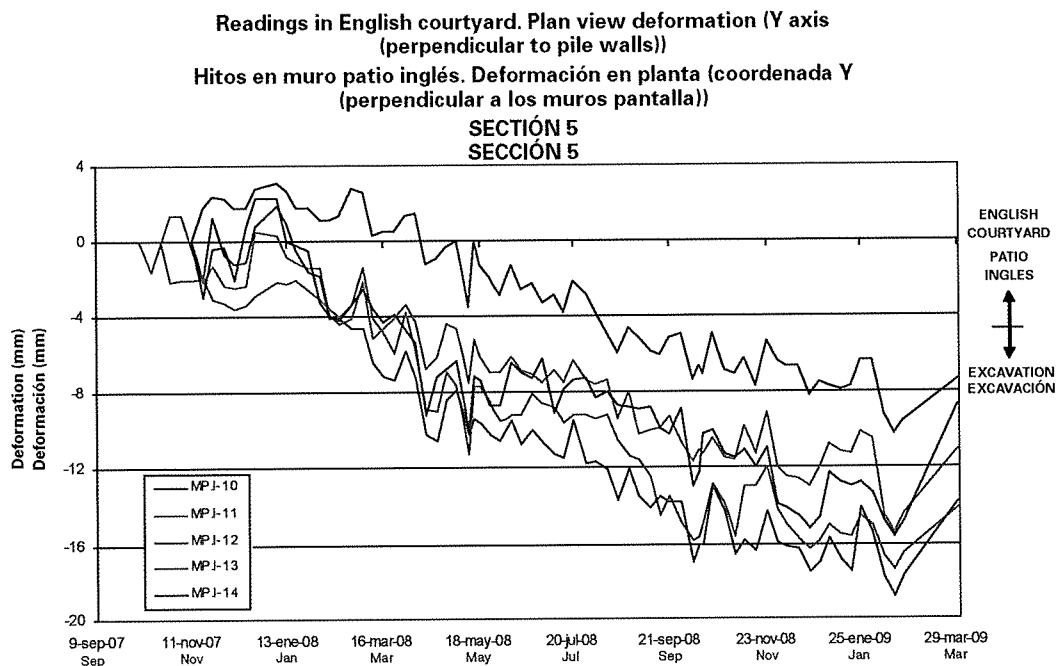


Figure 25. Inclinometer readings in section 5  
Figura 25. Inclinómetro en sección 5

En la Figura 25 se muestra la representación gráfica de la evolución de la ley de desplazamientos horizontales obtenida con la instrumentación inclinométrica, correspondiente a una de las tuberías instaladas en la sección 5 adyacente a la Catedral de la Almudena.



**Figura 26. Desplazamientos en sección 5. Medición topográfica viga de coronación**  
**Figure 26. Deflection in section 5. Topographic measurements for capping beam**

En la Figura 26 se representa la evolución de los desplazamientos horizontales de la viga de coronación de la misma sección 5 (perpendiculares a dicha viga), obtenidos mediante mediciones topográficas.

| STANDARD SECTION | RIDO SOFTWARE                     |            |                     |            | PLAXIS SOFTWARE    |            |                     |            | INCLINOMETER READING<br>(date 17 to 20-04-09) |            |                     |                | TOPOGRAPHIC READING<br>(29-03-09) |                |
|------------------|-----------------------------------|------------|---------------------|------------|--------------------|------------|---------------------|------------|---|------------|---------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|
|                  | Maximum deflection                |            | Deflection at crown |            | Maximum deflection |            | Deflection at crown |            | Maximum deflection                            |            | Deflection at crown |                | Deflection at crown               |                |
|                  | Elev.                             | Defl. (mm) | Elev.               | Defl. (mm) | Elev.              | Defl. (mm) | Elev.               | Defl. (mm) | Elev.   | Defl. (mm) | Elev.               | Defl. (mm)     | Elev.                             | Defl. (mm)     |
| SECTION 1        | 627.00                            | 11,45      | 627.00              | 11,45      | 608.00             | 10,95      | 627.00              | 6,83       | 627.00  | 10,00      | 627.00              | 10,00          | 627.00                            | 11,23          |
| SECTION 2        | 605.00                            | 7,42       | 628.50              | -2,50      | 608.59             | 12,51      | 628.50              | 4,40       | 628.50  | 19,20      | 628.50              | 19,20 to 18,35 | 628.50                            | 20,14 to 27,58 |
| SECTION 3A       | 635.00                            | 14,45      |                     |            | 623.40             | 24,83      |                     |            |   |            | 635.00              | 9,38 to 11,50  |                                   | 9,20 to 9,70   |
|                  | 622.00<br>Annex pile found. elev. | 10,75      | 635.00              | 14,45      | 622.00             | 24,64      | 635.00              | 7,67       | 612,20  | 12,70      | 622,00              | 7,5 to 7,1     | 635,00                            |                |
| SECTION 5        | 632.50                            | 4,89       | 632.50              | 4,89       | 612.25             | 19,75      | 632.50              | 13,47      | 632.50  | 11,25      | 632.50              | 11,25          | 632.50                            | 7,41 to 13,86  |
| SECTION 8C       | 608.50                            | 10,00      | 628.50              | 2,00       | -                  | -          | -                   | -          | 608.50  | 8,10-8,25  | 627.00              | 2,00 to -3,65  | 627.00                            | -1,58 to -2,89 |
| SECTION 12C      | 611.75                            | 11,69      | 622.70              | 2,50       | 619.75             | 19,00      | 622.50              | 18,00      | 620.70  | 29,70      | 622.70              | 29,60          | 622.70                            | 31,62          |

Table 6. Comparison of deformation values

| SECCIÓN TIPO | PROGRAMA RIDO                          |               |  |               | PROGRAMA PLAXIS                      |               |  |               | INSTRUMENTACIÓN MEDIANTE INCLINOMETROS (fecha 17 a 20-04-09) |               |  |               | INSTRUMENTACIÓN MEDIANTE TOPOGRAFÍA (29-03-09) |               |
|--------------|--|---------------|--|---------------|--------------------------------------|---------------|--|---------------|--|---------------|--|---------------|--|---------------|
|              | Desplazamientos Horizontales Máximos   |               | Desplazamientos Horizontales en coronación |               | Desplazamientos Horizontales Máximos |               | Desplazamientos Horizontales en coronación |               | Desplazamientos Horizontales Máximos                         |               | Desplazamientos Horizontales en coronación |               | Cota   | Desplaz. (mm) |
|              | Cota                                   | Desplaz. (mm) | Cota                                       | Desplaz. (mm) | Cota                                 | Desplaz. (mm) | Cota                                       | Desplaz. (mm) | Cota   | Desplaz. (mm) | Cota                                       | Desplaz. (mm) |  |               |
| SECCIÓN 1    | 627.00                                 | 11,45         | 627.00                                     | 11,45         | 608.00                               | 10,95         | 627.00                                     | 6,83          | 627.00   | 10,00         | 627.00                                     | 10,00         | 627.00   | 11,23         |
| SECCIÓN 2    | 605.00                                 | 7,42          | 628.50                                     | -2,50         | 608.59                               | 12,51         | 628.50                                     | 4,40          | 628.50   | 19,20         | 628.50                                     | 19,20         | 628.50   | 20,14 a 27,58 |
| SECCIÓN 3A   | 635.00                                 | 14,45         |  |               | 623.40                               | 24,83         |  |               |  |               | 635.00                                     | 9,38 a 11,50  |  | 9,20 a 9,70   |
|              | 622.00 (Cota Ciment. pilotes apéndice) | 10,75         | 635.00                                     | 14,45         | 622.00                               | 24,64         | 635.00                                     | 7,67          | 612,20   | 12,70         | 622,00                                     | 7,5 a 7,1     | 635,00   |               |
| SECCIÓN 5    | 632.50                                 | 4,89          | 632.50                                     | 4,89          | 612.25                               | 19,75         | 632.50                                     | 13,47         | 632.50   | 11,25         | 632.50                                     | 11,25         | 632.50   | 7,41 a 13,86  |
| SECCIÓN 8C   | 608.50                                 | 10,00         | 628.50                                     | 2,00          | -                                    | -             | -  | -             | 608.50   | 8,10-8,25     | 627.00                                     | 2,00 a -3,65  | 627.00   | -1,58 a -2,89 |
| SECCIÓN 12C  | 611.75                                 | 11,69         | 622.70                                     | 2,50          | 619.75                               | 19,00         | 622.50                                     | 18,00         | 620.70   | 29,70         | 622.70                                     | 29,60         | 622.70   | 31,62         |

Tabla 6. Comparativa de deformaciones

The instrumental findings led to the conclusion that the deflection in the most critical section was on the order of the maximum value specified in the design. Further to the inclinometer readings for section 8, for instance, the deflection at the crown was nearly negligible, while the maximum value was detected at depths of 8,20 to 18,5 m below the crown. In section 3a, maximum deflection was on the order of 12 mm and in section 5 of 11 mm. Movements of 19, 25 and 30 mm were recorded in sections 2, 9 and 12, respectively, although these sectors are not as critical from the standpoint of the proximity of singular buildings.

As noted, the values shown are for April 2009, after the excavation had been dug to its deepest. At this writing, with most of the structure now up, the maximum deflection in some of the sections, such as section 5, for instance, reached on the order of 17 mm according to the inclinometers and from 9 to 20 mm (depending on the section) according to the topographic instruments.

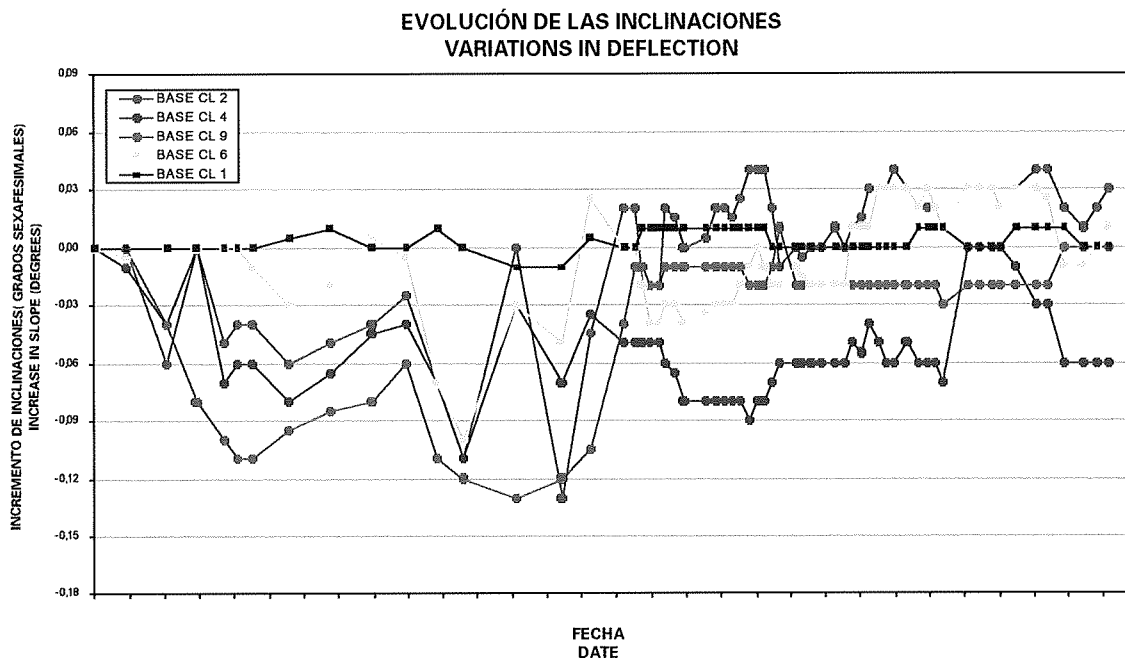
The load cells installed on the anchors recorded no significant changes in the stress on these elements. The only variations found were small, generally periodic and associated with fluctuations in outdoor temperature.

#### 6.4. RESULTS OF MONITORING ADJACENT BUILDINGS

Clinometer and strain gauge crack measurements taken in the adjacent buildings are discussed below.

##### *Clinometers*

During retaining wall construction and excavation in different stages, the variations in deflection on the walls instrumented fell within the margin of safety in all cases. Throughout the various stages of construction, instrument sensitivity sufficed to observe the effect of excavation and anchor tensioning, as well as the variations associated with wall deformations. When the maximum excavation depth was reached, these variations stabilised and stationary geometric variation could be observed.



**Figure 27. Clinometric readings. Slope on instrumented walls**  
**Figura 27. Clinómetros. Medición de inclinaciones en muros instrumentados**



---

Los resultados de esta instrumentación permiten concluir que en las secciones más críticas los desplazamientos horizontales producidos se han situado en el orden de magnitud que se estableció como máximo admisible en diseño. De esta forma, de acuerdo con los inclinómetros, en la sección 8, los desplazamientos horizontales en coronación resultaron casi despreciables, obteniéndose un valor máximo del orden de 8,20 mm a 18,5 m de profundidad respecto la coronación del muro pantalla. En la sección 3a, el desplazamiento máximo resultó del orden de 12 mm y en la sección 5 del orden de 11 mm. Existen otras zonas, como las secciones 2, 9 y 12 en las que se han registrado movimientos de 19 mm, 25 mm, 30 mm respectivamente, si bien estos sectores no resultan tan críticos desde el punto de vista de la proximidad de edificaciones singulares en el trasdós.

Como se ha indicado anteriormente, los resultados obtenidos corresponden al mes de abril de 2009, después de haberse alcanzado la fase de máxima excavación. En la fecha de redacción del presente documento, se encuentra ejecutada una parte importante de la estructura, habiéndose alcanzado por ejemplo en la Sección 5 movimientos horizontales máximos en el muro pantalla del orden de 17mm en los inclinómetros, y entre 9 mm y 20 mm en la instrumentación topográfica en función del punto de medición.

Con relación a los resultados obtenidos en las células de carga instaladas en anclajes, no se han registrado modificaciones relevantes en la tensión de anclajes. Únicamente se han comprobado pequeñas variaciones, generalmente de carácter periódico, asociadas a las fluctuaciones de la temperatura ambiente.

#### **6.4. RESULTADO SEGUIMIENTO DE EDIFICACIONES ANEXAS**

Dentro del seguimiento de las edificaciones anexas a continuación se exponen las evoluciones registradas dentro de las mediciones mediante clinómetros y extensometría en fisuras.

##### ***Clinómetros***

Durante la evolución de la ejecución del muro de contención y vaciado en sus diferentes fases, se observó que las inclinaciones de los muros instrumentados presentaban variaciones dentro de los márgenes de seguridad en todos los casos con ausencia de valores relevantes. A lo largo de las distintas fases, con la sensibilidad de medida, se pueden observar no obstante la influencia de los momentos de excavación y ejecución y tesado de anclajes, junto con las variaciones asociadas a la deformación del muro. Una vez alcanzada la cota máxima de excavación las variaciones se estabilizaron pudiendo observarse los fenómenos estacionales de variación geométrica.

## Strain gauges

The cracks existing in the adjacent buildings prior to the works were tracked with strain gauges throughout the monitoring period. The findings showed that other than local events associated with the constructional characteristics of these buildings, the primary variations in the cracks were seasonal.

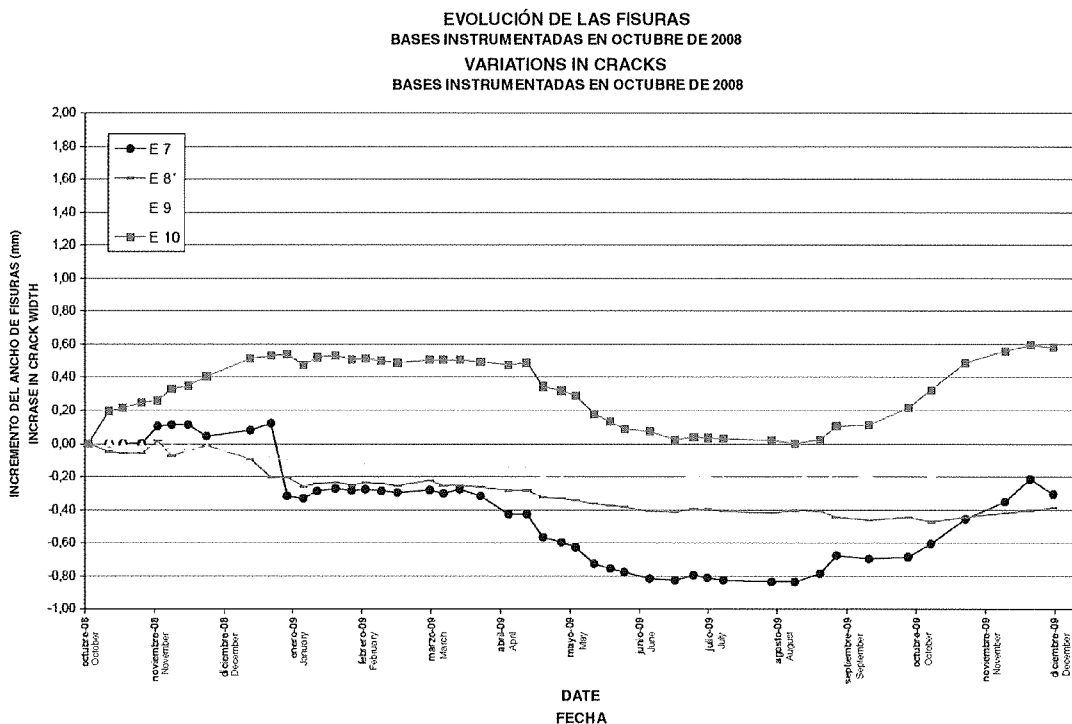
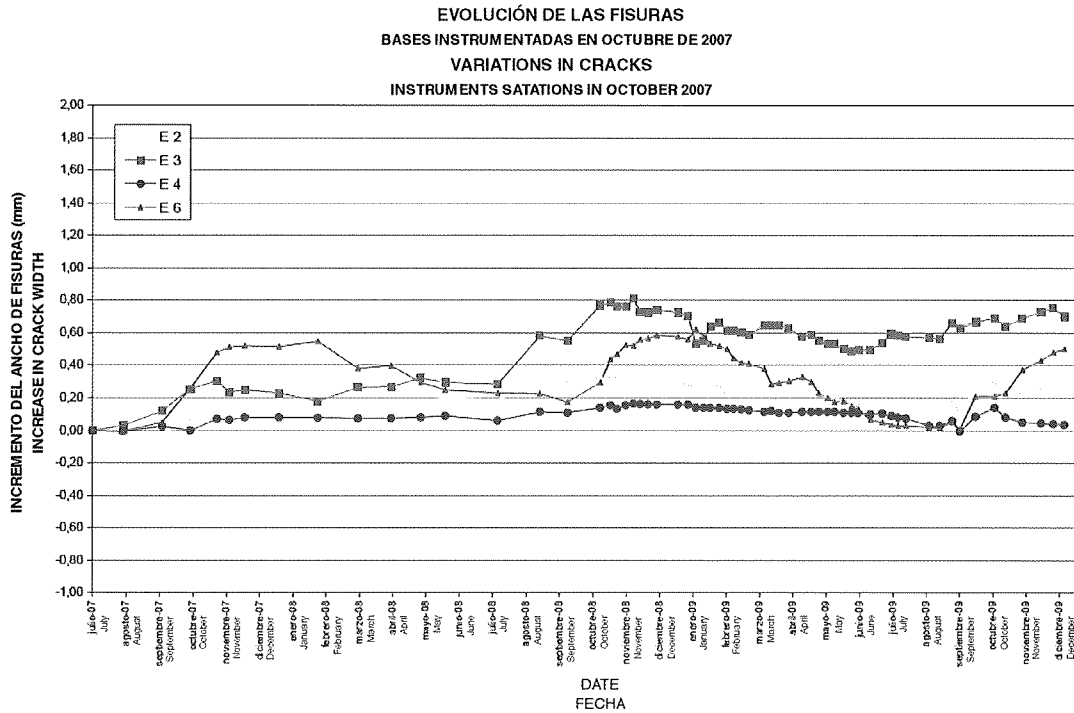


Figure 28. Strain gauge crack measurements  
 Figura 28. Medición de Fisuras por extensometría.

## Extensometría

Dentro del seguimiento de las fisuras existentes en las edificaciones anexas mediante extensometría cabe destacar, aislando fenómenos locales asociados a las características constructivas de dichas edificaciones, que a lo largo del periodo de seguimiento de la instrumentación, principalmente se verificó la evolución estacional de las fisuras.

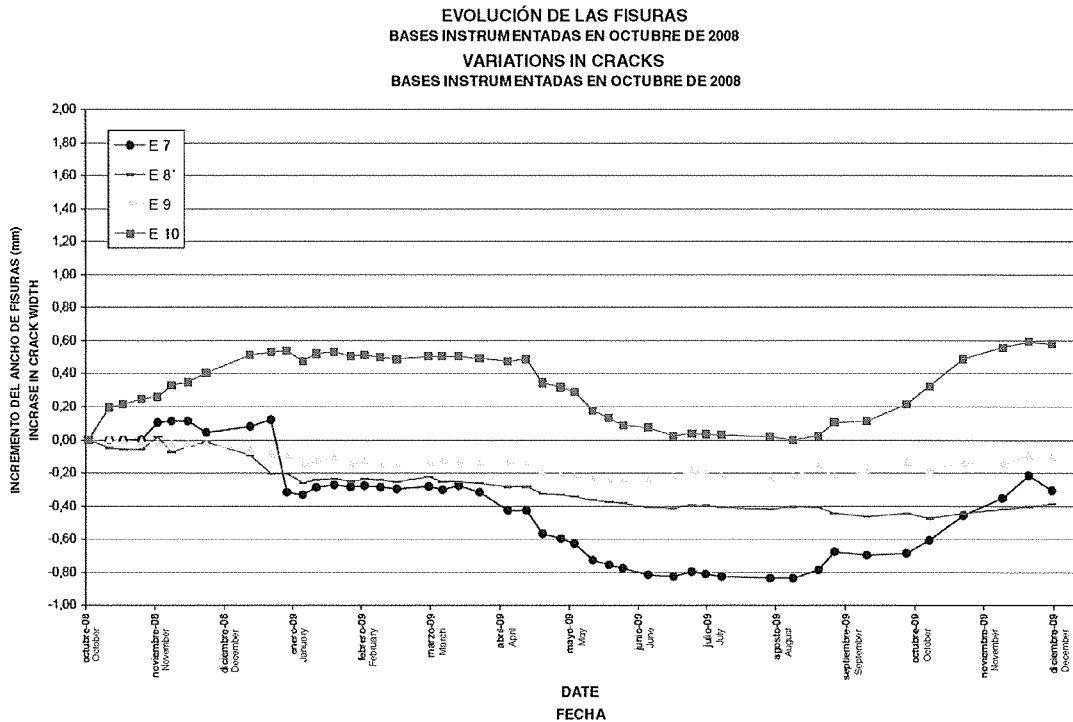
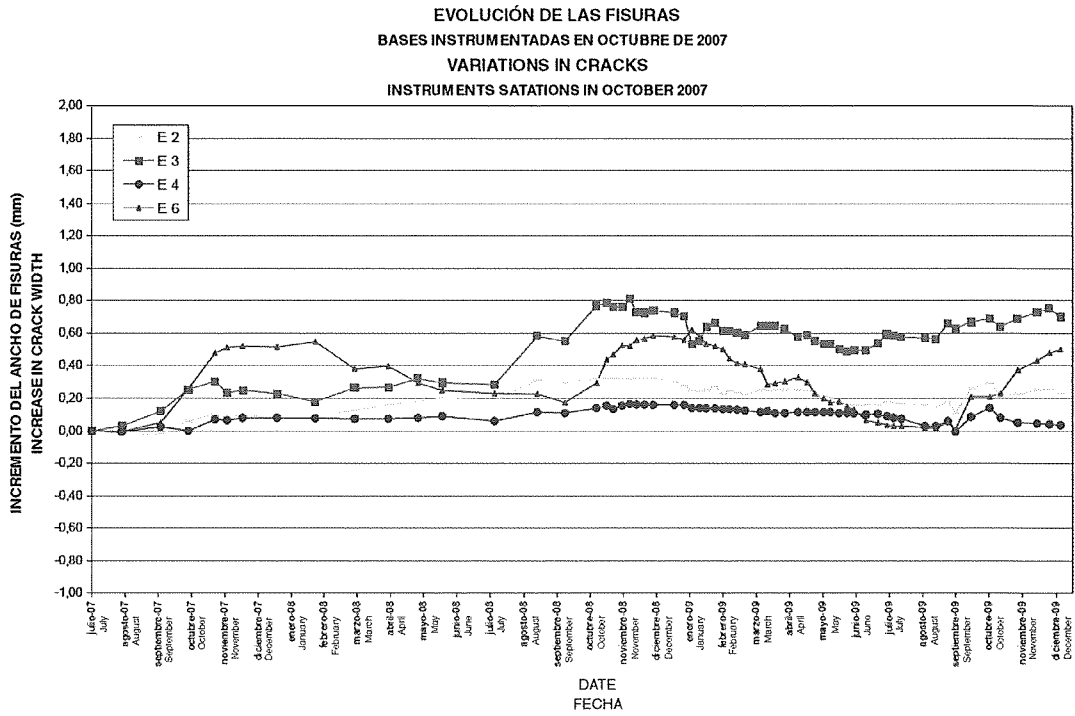


Figura 28. Medición de Fisuras por extensometría  
 Figure 28. Strain gauge crack measurements

## 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<sup>a</sup>  
Nieto Esteban, Eva  
Sánchez Arroyo, Jesús M<sup>a</sup>  
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<sup>a</sup>  
Jiménez Ortiz, Gonzalo  
León Bello, Raúl  
\* Ley Urzaiz, Jorge  
López Dormal, Mariano  
Menéndez Martínez, Laura  
Misol Moyano, Carolina  
Pérez García, Noemí  
\* Rodríguez Escribano, Raúl Rubén  
\* Rodríguez Romero, Jesús M<sup>a</sup>  
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<sup>a</sup> Consuelo

**Licenciada en Psicología**

Catalá Pellón, Diana

**Master of Science in Civil Engineering**

Hoogendoorn, Peter Paul

**Arquitectos Técnicos**

Carrato Moñino, Rosa M<sup>a</sup>

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**

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

**Ingenieros Técnicos Topógrafos**

Amador Orenga, Germán

Barragán Bermejo, M<sup>a</sup> 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<sup>a</sup>

**Técnicos en Administración de Empresas**

Cebrián Sobrino, M<sup>a</sup> 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 Nº 76

"Tubería de acero para abastecimiento de agua a presión revestida con dado de hormigón armado".  
Autores: RUBÉN BRANDÁN GORDILLO, DANIEL GÁLVEZ CRUZ.

### Cuaderno Nº 77

"El muro de contención para el nuevo Museo de Colecciones Reales".  
Autores: ALBERTO BLANCO ZORROZA, ROBERTO BARRIOS CORPA Y JOSÉ ÁNGEL CORBACHO.

## CUADERNOS DE PRÓXIMA APARICIÓN

### Cuaderno Nº 78

"Metodología e interpretación de los ensayos de integridad de pilotes (Cross-Hole). Defectos más comunes detectados en pilotes reales".  
Autor: JORGE LEY URZAIZ

### Cuaderno Nº 79

"Estanque de tormentas de Arroyofresno. Control de hormigones y de equipos".  
Autores: FEDERICO VALENCIANO CARLES, LUIS GONZÁLEZ NUÑO Y FERNANDO LÓPEZ ORTÚN

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 Nº 5

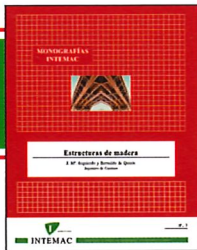
"Mantenimiento y reparación de paramentos de hormigón".  
Autores: R. Barrios Corpa, C. Beteta Cejudo, E. Díaz Heredia, Prof. J. Fernández Gómez, J. M<sup>a</sup>. Rodríguez Romero.  
Precio de la Monografía 38 €

### MONOGRAFÍA INTEMAC Nº 6

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

### MONOGRAFÍA INTEMAC Nº 7

"Estructuras de madera".  
Autores: J. M<sup>a</sup>. 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<sup>a</sup>. 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.

Nº 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.

Nº 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.

Nº 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.

Nº 2002 (1-3)

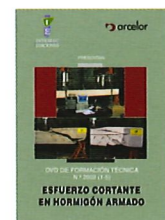
Incluye el ensayo a rotura de cinco vigas a escala real, con diferentes cuantías y diferentes desarrollos de adherencia conectando todo ello con las fórmulas de cálculo.  
35 minutos - 25 €



### Esfuerzo cortante en hormigón armado.

Nº 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.

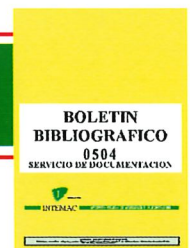
EL BOLETIN BIBLIOGRAFICO incluye:

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.

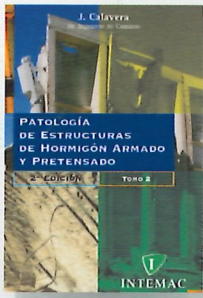
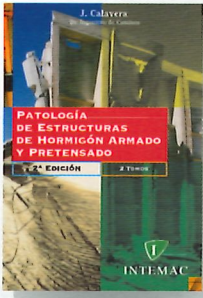


Tarifa de suscripción anual (6 números) 200 €

Consulte otras publicaciones

[www.intemac.es](http://www.intemac.es)

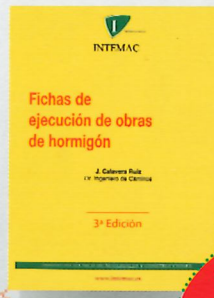
# PUBLICACIONES



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

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 135 €

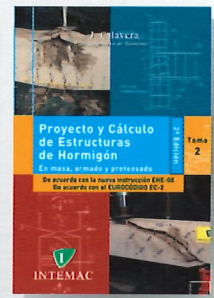


## Fichas de ejecución de obras de hormigón 3ª edición

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Precio: 68 €

**Nueva publicación**

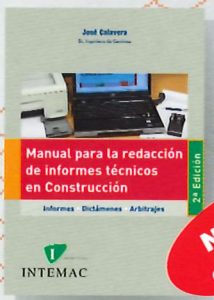


## Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón 2ª edición (2 tomos)

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

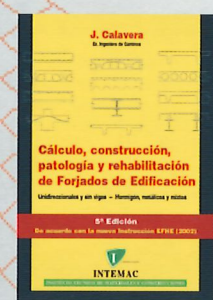
Precio: 45 €



## 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. M<sup>a</sup> Izquierdo, J. Ley Urzaiz

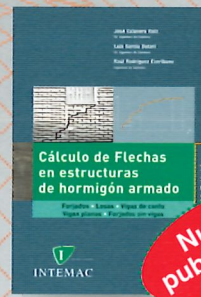
Precio: 64 €



## 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**



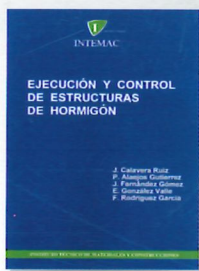
## Manual de detalles constructivos en obras de hormigón armado

J. Calavera (Dr. Ingeniero de Caminos)

Libro: 123 € CD-ROM: 198 €

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

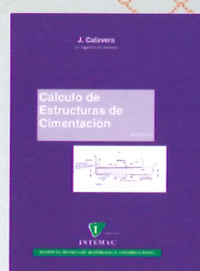
Software asociado en ficheros de AutoCAD



## 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 €