

# Museo del papel en Carballino. Una estructura de edificación singular

## *Carballino Paper Museum* *An outstanding building structure*



**Javier Estévez Cimadevila**

Dr. Arquitecto

Catedrático de Universidad del Departamento de Tecnología de la Construcción  
Universidad de A Coruña



**Emilio Martín Gutiérrez**

Dr. Arquitecto

Profesor Titular de Universidad del Departamento de Tecnología de la Construcción  
Universidad de A Coruña

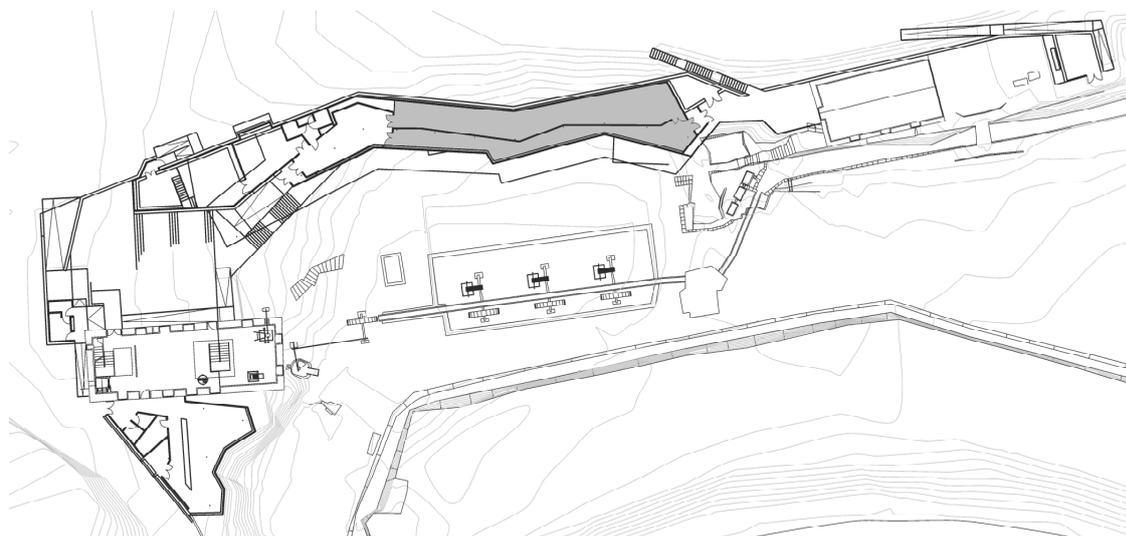


Figura 1. Vista en planta del conjunto.

### RESUMEN

El presente artículo recoge las principales características de la estructura correspondiente al Museo del Papel en el Ayuntamiento de Carballino (Orense). Se trata de una propuesta singular donde el elemento básico es un muro de hormigón armado cuyo trazado sirve de patrón en la generación de la geometría arquitectónica. Desde un punto de vista estructural, dicho muro actúa como estructura de contención frente a los empujes del terreno, al tiempo que soporta en voladizo el volumen de cristal en el que se ubica la sala de exposiciones del museo.

### SUMMARY

*This article shows the main features of the Paper Museum structure in Carballino Council, Orense (Spain). The main*

*element of this outstanding proposal is a reinforced concrete wall that generates the architectural geometry. From a structural point of view, this element works as a retaining wall and at the same time it allows the glass volume of the exhibition hall to cantilever.*

### 1. DESCRIPCIÓN DE CONJUNTO

El Ayuntamiento de Carballino promueve en el 2002 la construcción de un Museo del Papel que se ubica en la denominada finca Castelo. Se trata de un edificio de gran singularidad y enorme interés proyectado por el arquitecto José Manuel Gallego Jorreto. Si bien la intervención arquitectó-

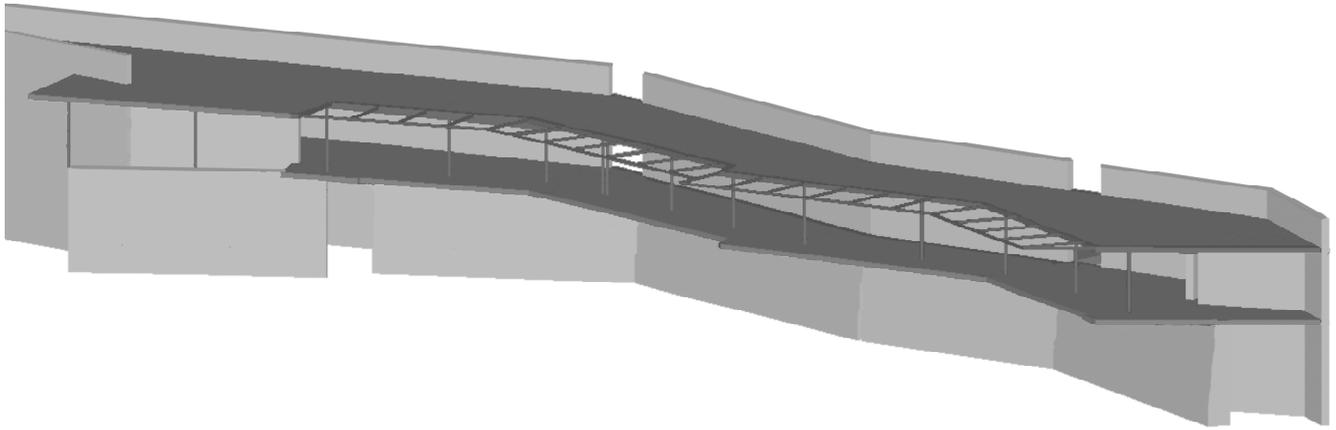


Figura 2. Axonometría de la propuesta estructural.

nica tiene un ámbito de actuación mayor, afectando incluso a la recuperación de edificaciones existentes, en una primera fase el proyecto contempla el diseño de la construcción principal. La propuesta de museo presenta un desarrollo claramente lineal, en el que la sugerente sucesión de espacios abiertos y cerrados se produce dentro de una geometría respetuosa con la topografía del emplazamiento (Figura 1). El edificio se adosa a la ladera existente, de acusada pendiente, conformando su elemento principal, la sala de exposiciones. Se trata de un volumen acristalado que, dispuesto en voladizo sobre el muro de contención, sobrevuela sobre el terreno, buscando la protección frente a las posibles crecidas previstas ocasionalmente en la zona con un muy amplio período de retorno.

Desde un punto de vista estructural el museo está constituido por una sucesión de muros que, al tiempo que conforman la geometría de los volúmenes arquitectónicos, sirven como elementos de contención de tierras y de soporte de los forjados (Figura 2). Estos se resuelven mediante losas macizas, en general de 22 cm de espesor constante. Dentro del conjunto, la zona más relevante se concentra en la sala de exposiciones (Figura 1, ámbito tramado). Estructuralmente, el problema reviste notable complejidad puesto que dicho muro debe contener una altura de tierras de 9,60 m y configurar la estructura soporte del volumen acristalado volado, en el que se desarrolla la citada sala de exposiciones. El forjado está proyectado en losa maciza de espesor variable, con un vuelo de hasta 5,60 m medido desde el trasdós del muro. La losa sirve asimismo de sustentación a unos soportes tubulares metálicos ( $\varnothing 133.8$ ) que, conjuntamente con el propio muro, constituyen la estructura portante de la losa de hormigón armado de la cubierta. En este caso, los brise-soleil anclados al borde exterior de la losa de cubierta llegan a separaciones de hasta 8,60 m del trasdós del muro (Figura 4). La unión de los soportes tubulares a las losas de hormigón se realiza mediante un sistema de crucetas metálicas conformadas por perfiles UPN 100, de acuerdo con lo indicado en la Figura 3. Se ha optado por dicho sistema frente a una solución más convencional a base de placas base y pernos de anclaje, con el fin de conseguir un encuentro más rotundo y nítido entre el pilar y la superficie plana de la losa de hormigón, aumentando la sensación de esbeltez y ligereza de los soportes. Este

sistema de crucetas constituye una solución eficaz para resolver el problema del punzonamiento, solicitación especialmente delicada en casos como el presente, donde confluyen un espesor reducido de losa con pilares de muy pequeño diámetro. El empleo de perfiles de la serie UPN conformando una sección en I frente a la alternativa de perfiles IPN o HEB, se basa en asegurar una sección de alma suficiente conseguida con una altura reducida de perfil para garantizar unos recubrimientos adecuados.

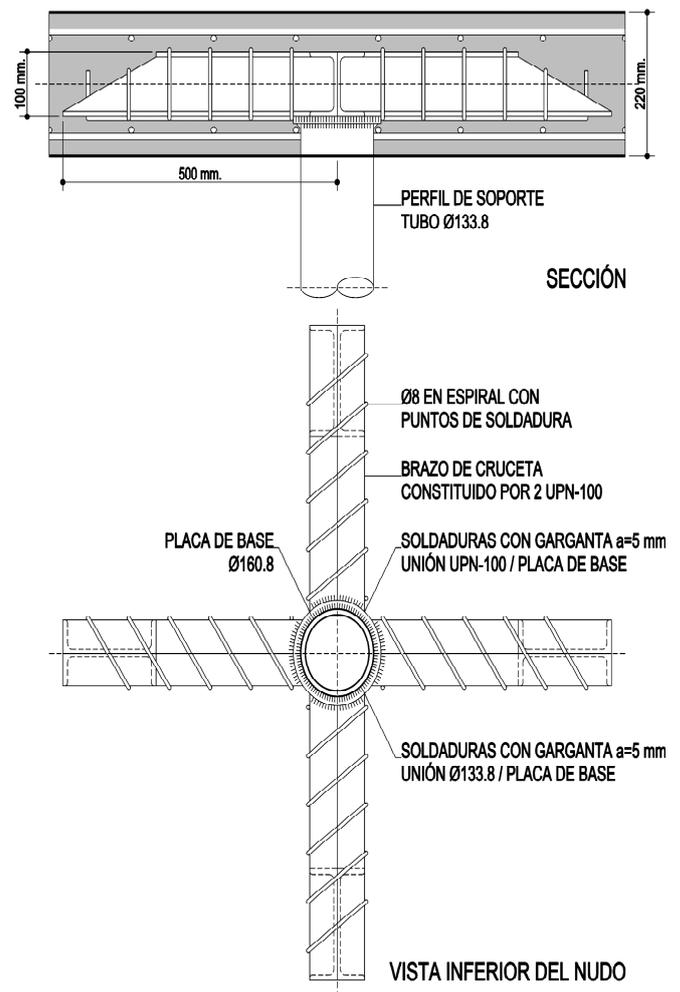


Figura 3. Detalle constructivo de cruceta.

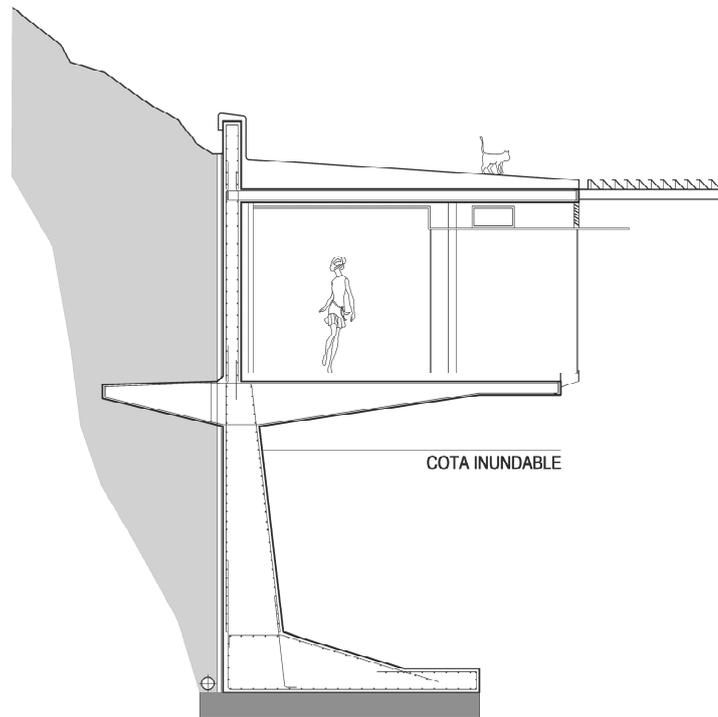


Figura 4. Sección transversal.

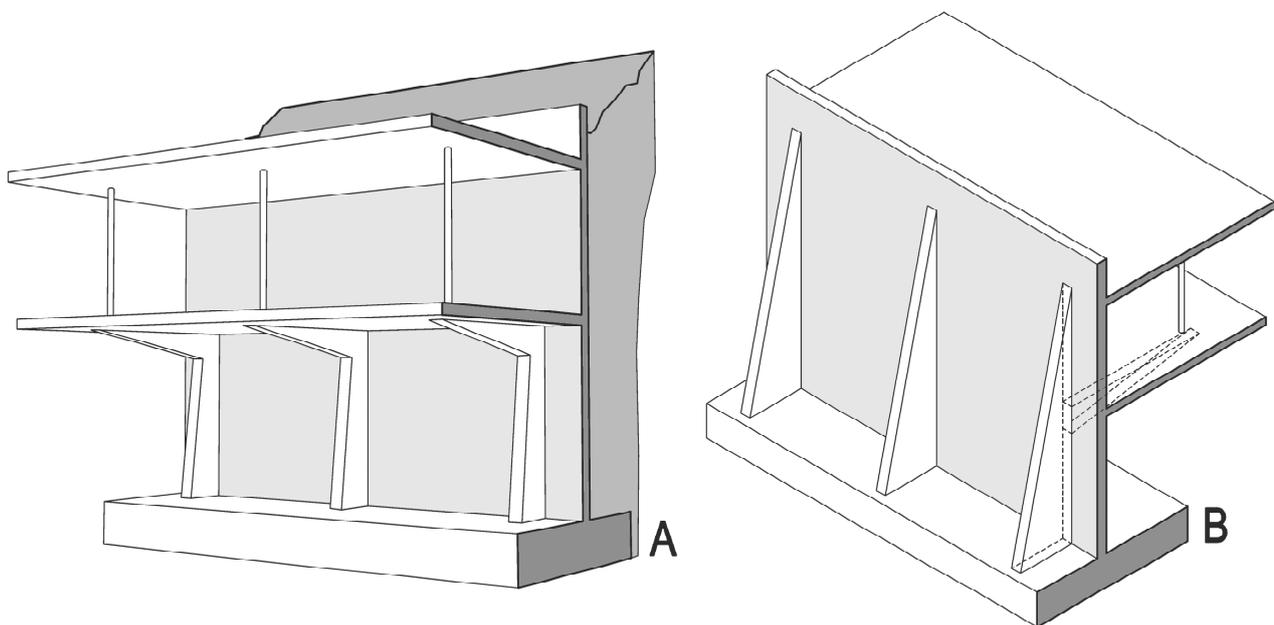


Figura 5. Propuestas con inclusión de contrafuertes.

## 2. PRIMERAS PROPUESTAS

El principal problema que se planteó desde el principio al proyectar esta estructura era no tanto la magnitud de los vuelos en sí, sino el comportamiento del conjunto desde el punto de vista de la estabilidad y de las deformaciones, como consecuencia de la desfavorable interacción entre las acciones gravitatorias y el empuje del terreno.

Las primeras propuestas, basadas en el anclaje del muro a la ladera posterior, fueron desechadas desde un punto de vista conceptual, en la idea de configurar un sistema de carácter

autoportante. Posteriormente, se tantearon nuevas alternativas contemplando la inclusión de contrafuertes dispuestos en continuidad con vigas de canto variable, resaltadas respecto a la losa de piso, que servían de apoyo a los pilares metálicos de cubierta. La primera opción (Figura 5-A), con contrafuertes dispuestos al intradós, se desechó por cuanto desde un punto de vista arquitectónico se pretendía una imagen en continuidad del muro. La segunda opción (Figura 5-B), con contrafuertes por el trasdós, asimismo fue desechada, puesto que si bien los contrafuertes quedaban ocultos, las vigas de apeo de los pilares seguían teniendo un acusado protagonismo formal no deseado.

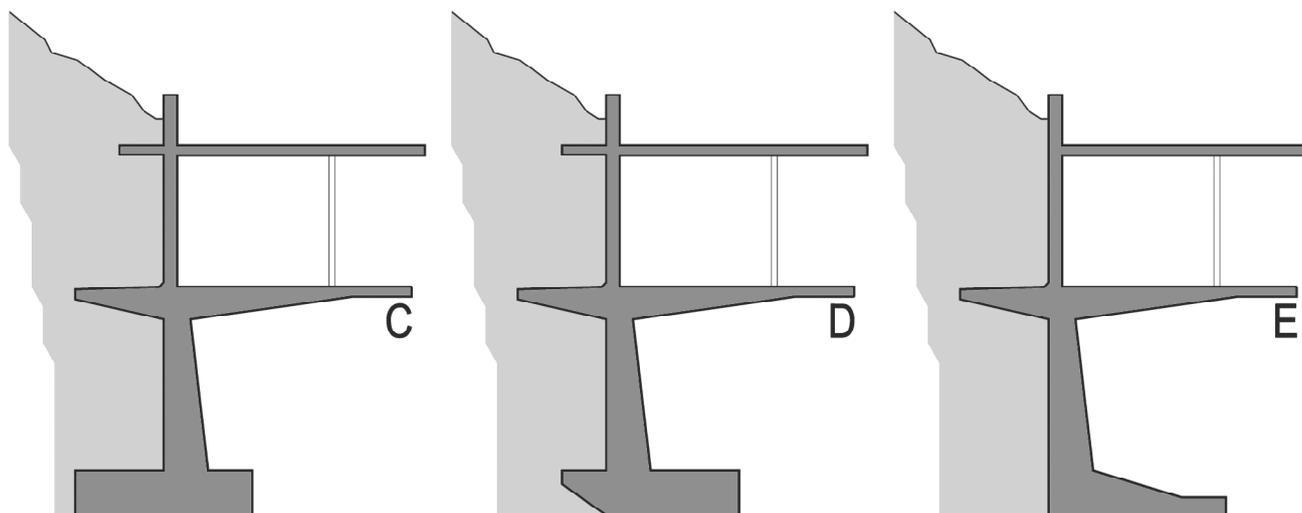


Figura 6. Propuestas con inclusión de bandejas.

Desechada la opción de contrafuertes, el estudio se centró en la disposición de un sistema de bandejas en el trasdós del muro (Figura 6). Se trata de una solución que, aunque no es de uso habitual, está ampliamente documentada en la bibliografía técnica. Sin embargo, el empleo de bandejas está vinculado de forma casi exclusiva a su utilización en muros de contención. En el caso presente, la singularidad de la solución estriba en que su consideración surge tanto de aminorar el efecto del empuje del terreno sobre la estructura, como de utilizarlo como contrapeso que contrarreste las acusadas deformaciones del espacio volado, al tiempo que colabora eficazmente en la estabilidad del conjunto. En consecuencia, la solución proyectada da una respuesta acertada al problema estructural consiguiendo la imagen arquitectónica de continuidad formal que constituía una de las premisas irrenunciables del diseño.

Dentro de las alternativas posibles con bandejas, la solución C es de gran eficacia pero presenta el inconveniente de un significativo incremento de excavación derivado del talón de la zapata. La solución D es la consecuencia lógica a la crítica anterior. No obstante, finalmente se ha recurrido a la alternativa E pues, a pesar de que la eliminación de la segunda bandeja resta algo de eficacia, la diferencia se compensa con la mayor simplicidad de ejecución, pues reduce de forma sustancial la intervención en el talud natural existente.

Al objeto de mostrar de forma cualitativa las ventajas que reporta en el comportamiento del conjunto la disposición de una bandeja posterior, la Figura 7 nos muestra los resultados obtenidos con ayuda de una modelización plana de elementos barra, que se ha calculado con un programa matricial desarrollado por los autores. Si bien se trata de una notable simplificación con respecto a la realidad, presenta la significativa ventaja de una cómoda visualización del comportamiento, lo que facilita la adopción de decisiones de diseño.

Los gráficos muestran claramente que son las acciones de tipo gravitatorio actuantes sobre los cuerpos volados las más significativas desde el punto de vista del comportamiento del conjunto. En este sentido, podemos observar que la flecha

máxima en punta de vuelo bajo acción gravitatoria es aproximadamente tres veces superior a la correspondiente a la actuación aislada del empuje del terreno. Asimismo, el desplazamiento en la coronación del muro resulta del orden de un 40% superior.

La consideración del efecto de contrapeso originado por el terreno situado sobre la bandeja posterior permite compensar en gran medida la deformación debida a la actuación de las restantes cargas. Esta cuestión se ha traducido en que, bajo la hipótesis de actuación simultánea de todas ellas, se alcanza una reducción del 43,70% en la flecha máxima asociada al extremo del vuelo, con relación a la opción de la estructura sin bandeja. Asimismo, el movimiento horizontal disminuye en un 51,74%. Por otra parte, las ventajas a nivel de esfuerzos son también enormemente significativas, dado que el momento flector máximo, correspondiente al enlace del muro con la zapata, pasa a ser el 48,26% del que obtendríamos si eliminásemos la referida bandeja.

La definición geométrica de la solución y, en particular, el vuelo final de la bandeja, se ha concretado en base a las consideraciones anteriores y al análisis de costes en términos de excavación y dimensionado resistente. Este planteamiento nos ha inducido a no contrarrestar la totalidad de la deformación del cuerpo volado del museo exclusivamente con el efecto de la bandeja. Como consecuencia de lo anterior, hemos optado por aplicar una ligera contraflecha cuya magnitud se ha determinado a partir del mapa de isovalores correspondiente al análisis tridimensional de la estructura.

En conclusión, la opción finalmente adoptada presenta las siguientes ventajas:

- Por una parte, nos permite prescindir del talón en la zapata. Ello es así dado que el efecto favorable frente al vuelco y deslizamiento que proporciona el talón se consigue de idéntica manera con la bandeja ejecutada a una cota superior. Sin embargo, esta disposición presenta una significativa ventaja al reducir de forma drástica las necesidades de excavación.

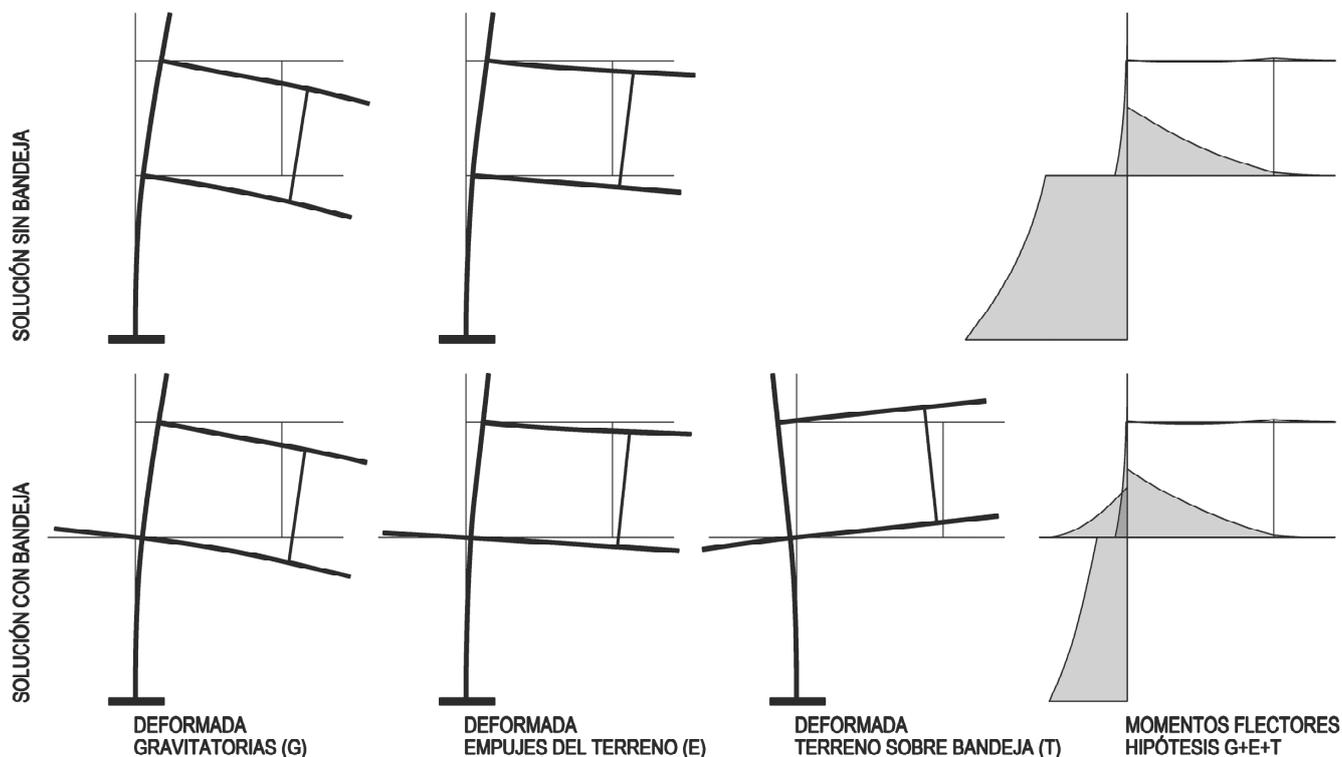


Figura 7. Resultados de la modelización plana.

- La bandeja reduce los empujes sobre el alzado del trasdós del muro; al mismo tiempo, el peso del terreno situado sobre ella permite compensar, en la medida que deseemos, los esfuerzos generados tanto por el propio empuje de tierras como los debidos a los considerables voladizos en que se desarrolla el museo.
- Finalmente, las dimensiones y ubicación de la bandeja han permitido reducir las deformaciones del conjunto de forma que se satisfacen con holgura las condiciones de uso requeridas.

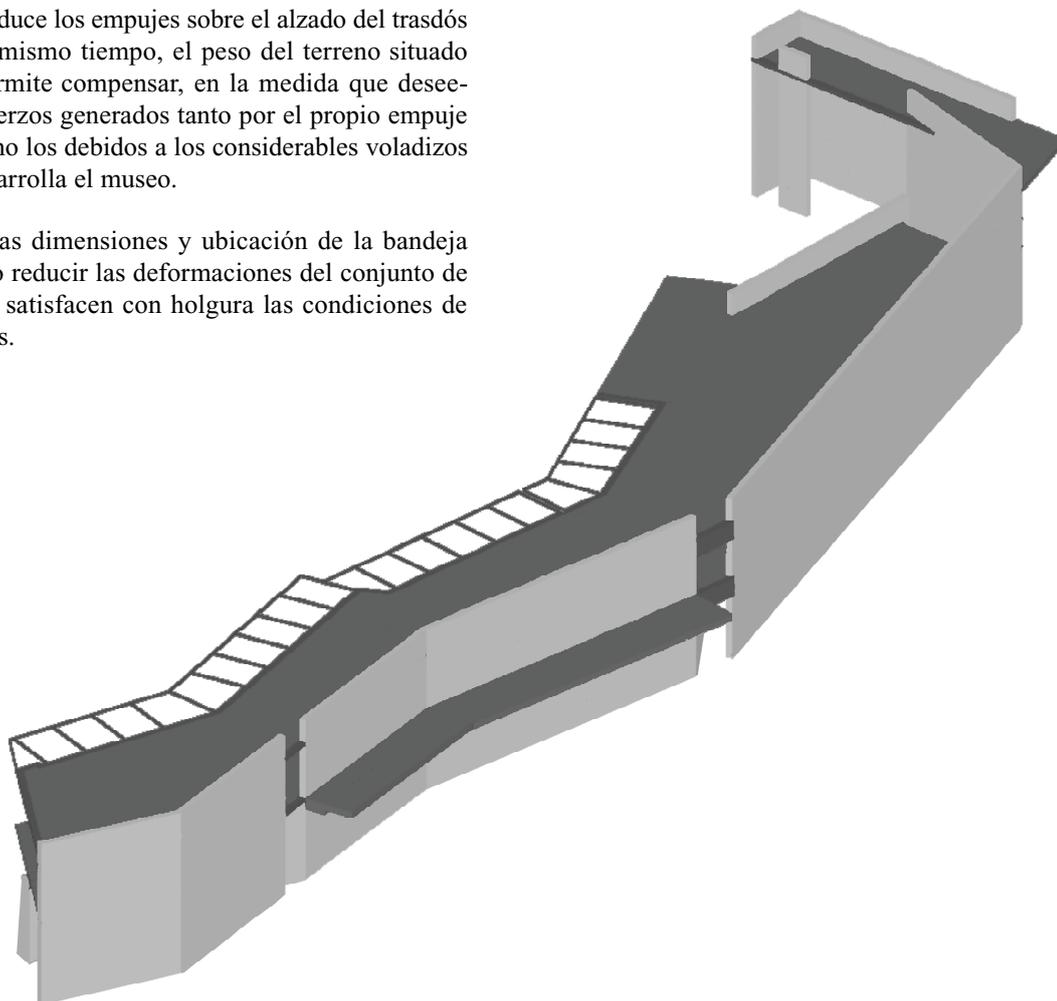


Figura 8.

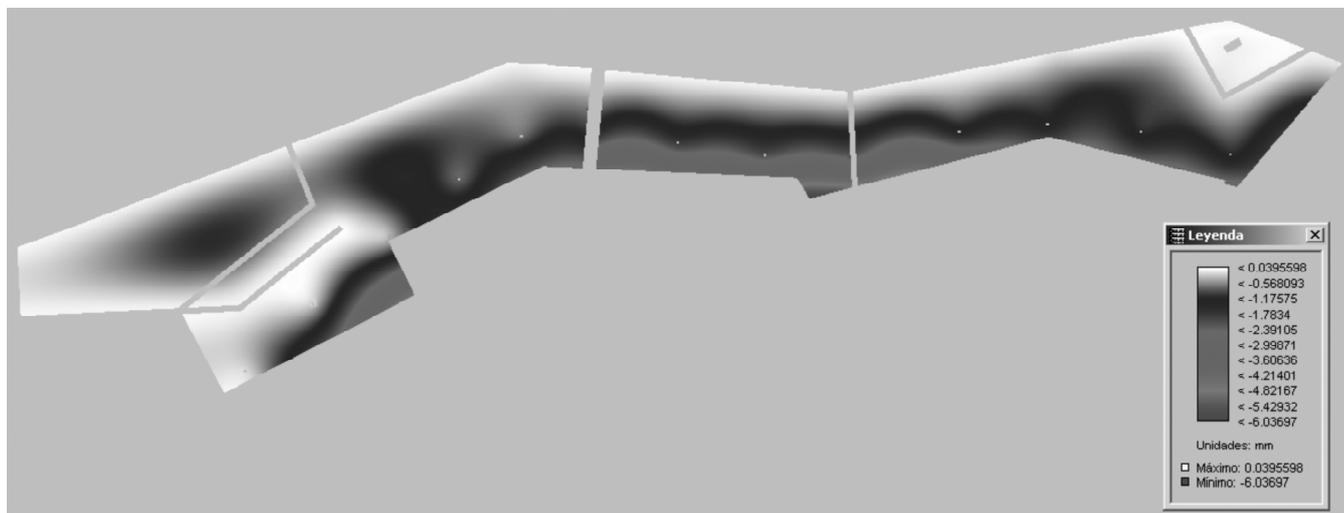


Figura 9. Desplazamientos verticales de la losa de cubierta.

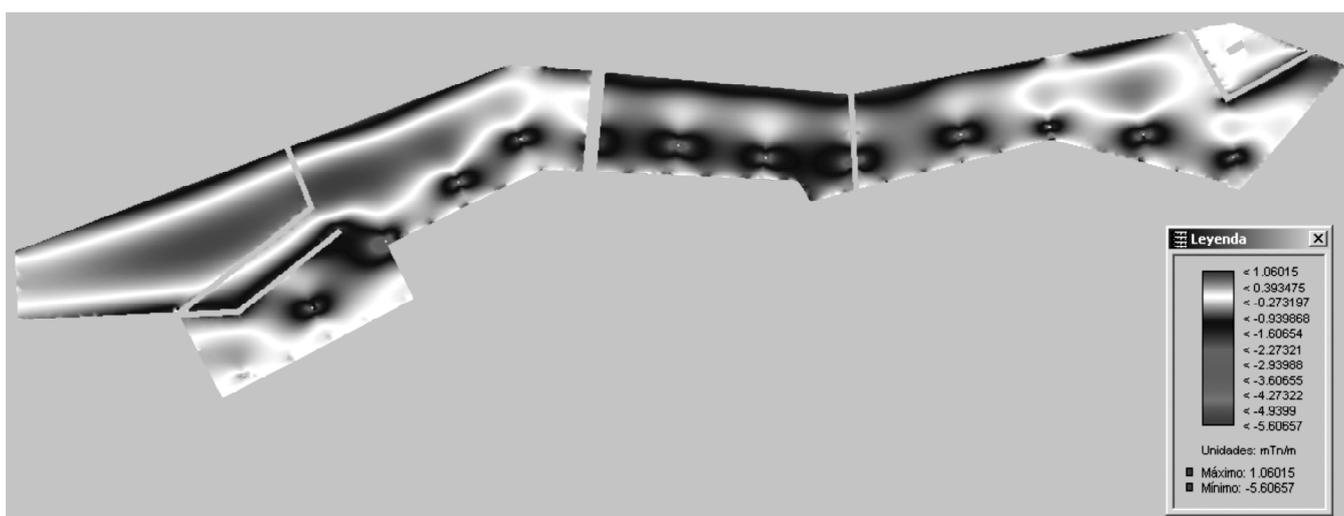


Figura 10. Momentos flectores en la losa de cubierta.

### 3. MODELIZACIONES EMPLEADAS EN EL ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Una primera cuestión que se suscitó al plantear las modelizaciones que luego se detallan, se refiere a la incidencia que podría tener el comportamiento de la zapata en la estabilidad del conjunto. Sin embargo, el plano de asiento de la cimentación coincide con la cota de rechazo obtenida en los ensayos de penetración y en las calicatas realizadas. El estudio geotécnico elaborado pone de manifiesto la existencia de un sustrato rocoso de naturaleza gnéssica con un grado II de meteorización, según clasificación ISRM, lo que es equivalente a un nivel de débil meteorización. Se trata, por tanto, de un terreno muy poco compresible, con un módulo de Balasto  $K_{30}$  situado claramente por encima de  $3 \text{ N/mm}^3$ . En consecuencia, puede aceptarse con total fiabilidad la inexistencia de giro en la zapata y modelizar como empotramiento el enlace del muro con la cimentación. En todo caso, las dimensiones y forma adoptados para el cimiento en la hipótesis pésima es tal que la resultante de las acciones en valores de cálculo pasa sensiblemente por el centro de gravedad del plano de asiento de la zapata, lo que optimiza la respuesta tensional del terreno.

Partiendo de las premisas anteriores, el análisis estructural se ha afrontado utilizando dos técnicas de cálculo numérico: cálculo matricial a partir de elementos lineales, y modelización mediante elementos finitos.

En primer lugar, tal y como hemos señalado en el apartado anterior, se ha analizado el comportamiento de secciones transversales del edificio por medio de cálculo matricial, empleando para ello una modelización plana con elementos de tipo barra. Esta opción se ha utilizado como una herramienta simple y eficaz en la toma de decisiones de diseño.

El siguiente nivel de aproximación se ha realizado estudiando el conjunto mediante el programa Cypecad versión 2003.2a, de Cype Ingenieros, que combina en su discretización elementos finitos tipo lámina gruesa tridimensional de forma triangular, con seis nodos en los vértices y en los puntos medios de los lados, para los muros, y mallas de elementos finitos tipo barra de tamaño máximo 25 cm., para los paños de losa maciza. La Figura 8 nos muestra una vista tridimensional del modelo generado. Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto un alto grado de aproximación entre

los resultados del análisis de conjunto y los obtenidos con los modelos planos, lo que valida las decisiones de diseño adoptadas. En las Figuras 9 y 10 se recogen en forma de isovalores los desplazamientos y momentos flectores transversales correspondientes al nivel de la losa de cubierta.

Finalmente, los resultados se contrastaron asimismo con una modelización resuelta mediante elementos finitos isoparamétricos de tipo volumétrico de 20 nodos, en combinación con elementos laminares isoparamétricos de 8 nodos. En esta fase se recurrió a la aplicación Ansys, de Swanson Analysis Systems, Inc.

La definición geométrica se ha elaborado bajo un entorno de diseño asistido por ordenador. Esta técnica se desarrolla en nuestro grupo de investigación fundamentalmente como respuesta a la dificultad de descripción topológica de una estructura compleja (como es el caso de determinadas construcciones históricas), recurriendo exclusivamente al denominado preprocesador de la aplicación de cálculo. A esta situación se une el hecho de que los levantamientos, así como los documentos de proyecto, se suelen confeccionar recurriendo a entornos cad. Atendiendo a estas cuestiones, se plantea la posible conexión entre tales programas y Ansys, sirviéndonos de la codificación tradicional de archivos de intercambio. De este modo, la configuración geométrica del modelo se elabora en el formato de dibujo, básicamente mediante una estructura alámbrica preliminar que se complementa con superficies multifaceta a efectos de definir los puntos clave, líneas, arcos, áreas y volúmenes implicados en el sistema. Todas estas categorías son reordenadas internamente por el sistema de conversión implementado, facilitando con ello la lectura e interpretación del modelo geométrico. Asimismo, en el fichero de comandos subsiguiente, se procede a incluir las oportunas

condiciones de enlace, así como las diversas hipótesis combinatorias de carga y/o empuje que se pretenden valorar. Cabe reseñar que los archivos de entrada así obtenidos, antes de su procesamiento bajo Ansys, son fácilmente parametrizados con el objeto de manejar y comparar el rendimiento de diversas alternativas. En el caso concreto que aquí se describe se tantean fundamentalmente diversos vuelos de bandeja y diferentes configuraciones de zapata. Los estudios desarrollados permiten optimizar el esquema básico de diseño, en términos de contrarrestar las deformaciones derivadas de las acciones gravitatorias aplicadas en las estancias del museo y de los posibles empujes del terreno sobre el trasdós, en los términos previamente descritos.

Asimismo, se ha incluido en el modelo una porción significativa del terreno ubicado bajo el cimiento, contemplando las propiedades mecánicas deducidas en el estudio geotérmico ya aludido y comentado. La muy reducida compresibilidad del sustrato, y el centrado de la respuesta resistente en la hipótesis pésima, se traducen en diferencias totalmente despreciables a todos los niveles. Esta conclusión permite operar sobre el modelo más simple de las figuras 11 y posteriores que, por otra parte, se comporta con un sensible acuerdo respecto de la idealización previa de elementos barra, vinculada a través de un empotramiento en su base.

Los resultados obtenidos en el análisis, para cada una de las modernizaciones descritas, han puesto de manifiesto, tanto a nivel de deformaciones como de esfuerzos, una alta concordancia de resultados. Esta conclusión avala el procedimiento que se ha seguido en la elaboración del proyecto de la estructura, donde las modernizaciones planas, gracias a su sencillez, han constituido herramientas de gran utilidad en las fases iniciales de toma de decisiones de diseño estructural.

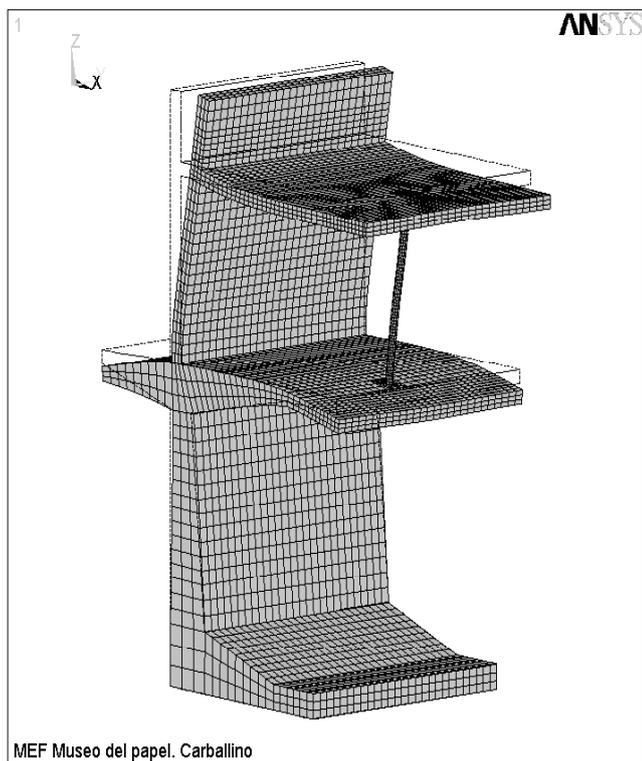


Figura 11. Deformada bajo hipótesis de carga total.

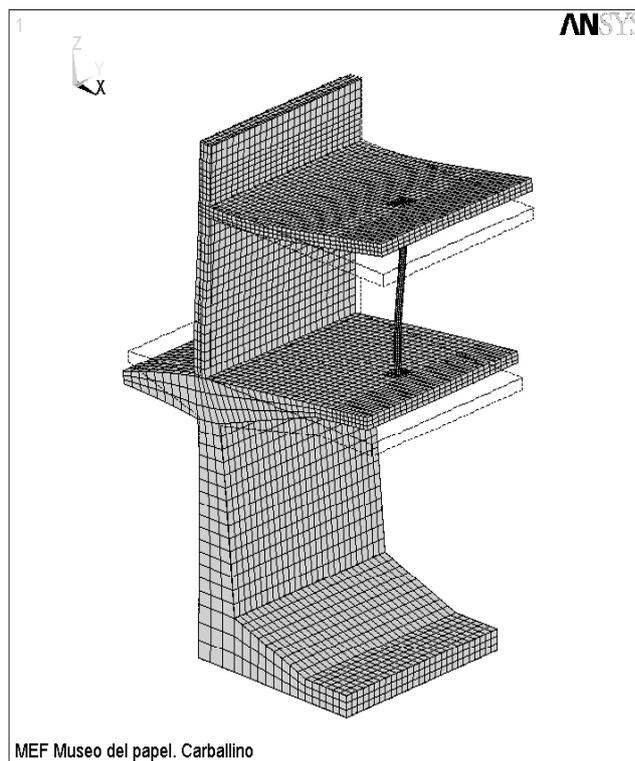


Figura 12. Deformada ante la acción del terreno.

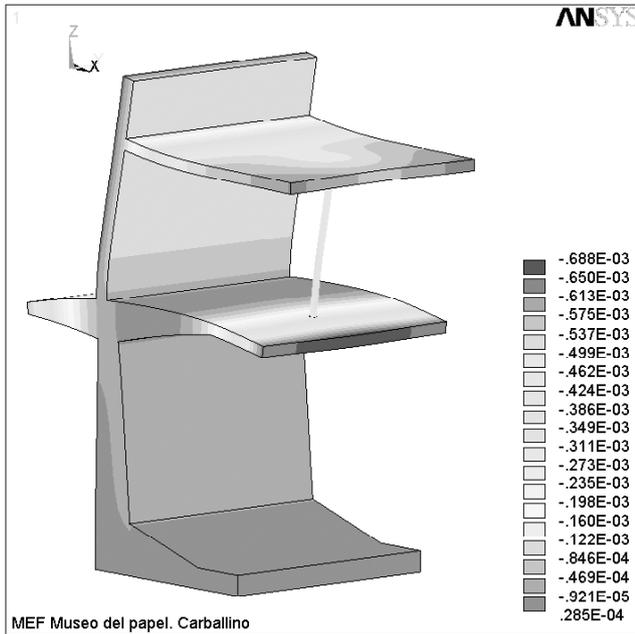


Figura 13. Desplazamiento de  $U_z$ . Carga total.

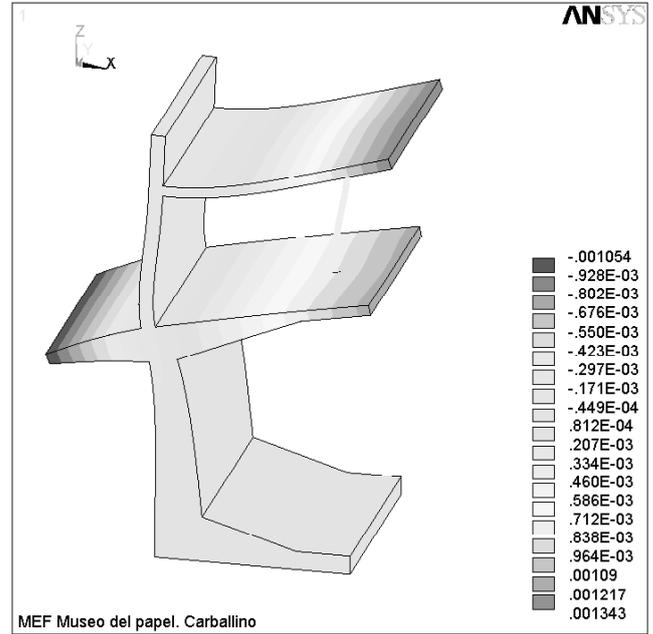


Figura 14. Desplazamiento de  $U_z$ . Acción del terreno.

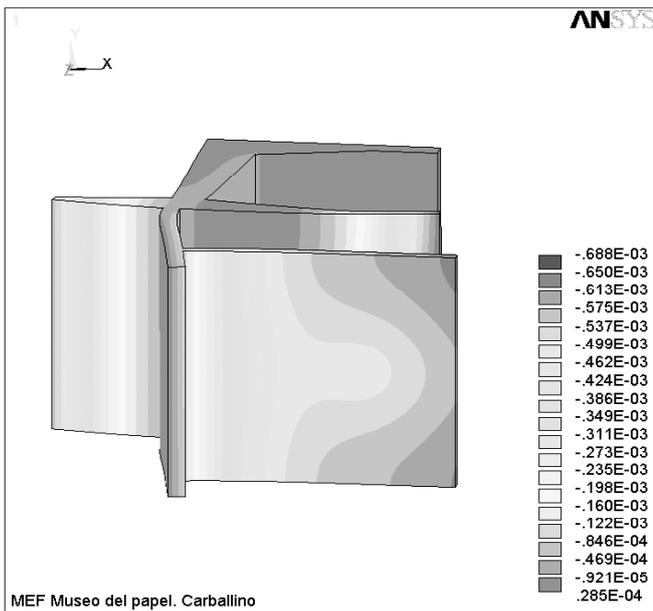


Figura 15. Desplazamiento de  $U_z$ . Losa de cubierta. Carga total.

#### 4. CONCLUSIONES

La solución planteada constituye una interesante muestra de cómo el diseño estructural, más allá de resolver los problemas resistentes, se erige en un elemento básico en la definición de la propuesta arquitectónica

Por otro lado, la solución planteada pone de manifiesto que la utilización de un sistema de bandejas dispuestas en el trasdós del muro constituye un sistema estructural sumamente eficiente. En el presente caso, su justificación obedece, no sólo al deseo de aminorar los efectos del empuje del terreno, sino también a contrarrestar el importante voladizo en que se desarrolla el edificio.

Finalmente, la utilización de modelos simples de cálculo, adecuadamente escogidos, se convierte en un eficaz instrumento para orientar y validar el diseño estructural, pues aún a un sencillo manejo en la introducción de datos e interpretación de resultados, con un razonable nivel de precisión.