FACULTAD DE PSICOLOGÍA DE MÁLAGA. ESTRUCTURA MIXTA DE GRANDES LUCES

Faculty of Psycology, University of Málaga.
A large span composite steel and concrete structure

Alejandro Bernabeu Larena[a], Javier Gómez Mateo[b], Isabel Sáez Alonso[c]

[a] Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Bernabeu Ingenieros. abl@bernabeu.net

[b] Arquitecto. Ingeniero de edificación. Máster de estructuras. Bernabeu Ingenieros. jgm@bernabeu.net

[c] Arquitecta. Máster de estructuras. Bernabeu Ingenieros. isa@bernabeu.net

RESUMEN

El edificio de la Facultad de Psicología de Málaga está formado por un volumen masivo y compacto de 90x100 metros y tres alturas, destacando dos cuestiones que determinan la configuración estructural: los patios interiores, de 18x3 metros, que se disponen a tresbolillo favoreciendo la entrada de luz natural; y el vuelo del volumen sobre rasante, que genera un gran espacio diáfano y cubierto. La estructura se resuelve con pantallas de apoyo dispuestas a tresbolillo, siguiendo la configuración de los patios, y una estructura mixta de vigas metálicas, embrochaladas y excéntricas a los apoyos, y forjado de hormigón. Los grandes vuelos se resuelven mediante potentes celosías metálicas en fachada.

ABSTRACT

The Faculty of Psychology building in the University of Málaga is formed by a massive and compact three-heights volume of 90x100 m. Two issues that determine its structural configuration: the interior courtyards, that measure 18x3 m., and are disposed in staggered arrangement to allow the entrance of natural light; and the cantilever of the above-ground volume, that creates a large column-free covered space. The structure is solved with support walls, disposed in staggered arrangement accordingly to the courtyard's configuration, and a composite structure formed by steel beams eccentrically supported, and a concrete slab. The large cantilever is solved with large steel trusses in the façades.

PALABRAS CLAVE: Estructura mixta, edificación, grandes voladizos, celosías metálicas de fachada.

KEYWORDS: Composite steel and concrete structure, building, large cantilevers, steel façade trusses.

1. Descripción del proyecto

El edificio de la nueva Facultad de Psicología de Málaga es un proyecto de LLPS arquitectos, Eduardo Pérez Gómez y Miguel Ángel Sánchez García [1], resultado de un concurso internacional. El proyecto de estructuras ha sido desarrollado por Bernabeu Ingenieros, y la construcción, actualmente en proceso, ha sido adjudicada a la UTE formada por las constructoras Ferrovial Agroman y Lasor.

El nuevo edificio se sitúa en la ampliación del campus universitario de Teatinos, que prevé el traslado de las instalaciones del campus de El Ejido y otras zonas de la ciudad, y tiene prevista su apertura en el año 2020.

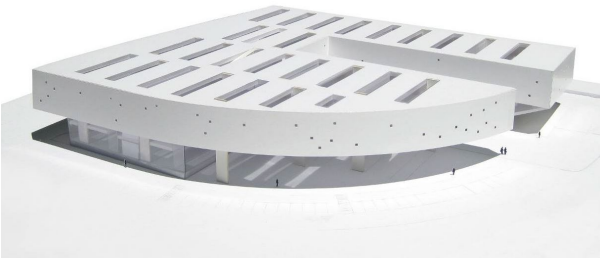

Figura 1. Maqueta. Vista general exterior. Patios interiores contrapeados y volumen principal en voladizo.

2. Planteamiento arquitectónico

El nuevo edificio se sitúa en una parcela cuya forma se ve determinada por el trazado viario. Bajo rasante la construcción se extiende en una superficie aproximada de 130 m x 100 m, llegando hasta el límite del lindero sur el nivel sótano del edificio.

El volumen sobre rasante ocupa una superficie en planta de aproximadamente 110 x 90 m, retranqueado de los límites de la parcela, con una gran abertura central marcando el acceso al edificio y un lateral curvo en voladizo generando una plaza exterior cubierta. Sobre la planta baja, situada ligeramente bajo la rasante de la acera orientada al sur, se sitúan dos niveles conformando un volumen masivo y compacto, con los cerramientos exteriores bastante cerrados con aberturas localizadas.

Destacan en el planteamiento arquitectónico dos cuestiones, que determinan la configuración de la estructura (Figuras 1, 2). Por una parte, la disposición de los patios interiores acristalados que se disponen a tresbolillo en planta, favoreciendo la entrada de luz natural al interior. Por otra parte, el gran vuelo del volumen sobre rasante, que genera un amplio espacio diáfano cubierto en la zona de acceso.

3. Configuración y comportamiento general de la estructura.

3.1 Configuración general.

La disposición a tresbolillo de los patios, así como su forma alargada en planta de dimensiones 18 x 3 m, resulta determinante en la configuración estructural del proyecto. Los elementos de apoyo principales son pantallas de hormigón armado de 3 m de longitud, 40cm de espesor y 13m de altura sobre rasante.

Estas pantallas se disponen únicamente en uno de lados cortos de cada patio, quedando los otros tres lados libres sin apoyos verticales; su posición se va alternando a uno u otro extremo en cada patio. Esta configuración resulta en luces entre apoyos de 18 m en el sentido longitudinal de los patios, y 15 m en sentido transversal entre pantallas consecutivas de la misma alineación de apoyos.

A partir de esta disposición de apoyos verticales se evaluaron diversas soluciones estructurales posibles para el sistema horizontal, en particular la opción de forjados postesados mediante losas

Figura 2. Vista general exterior.

de hormigón armado o la opción de estructuras mixtas. Adoptando finalmente esta última opción por su mayor ligereza y por permitir adaptarse de manera más coherente a la configuración arquitectónica.

La estructura horizontal se define finalmente mediante un sistema mixto de vigas metálicas, vinculadas entre sí de manera embrochalada y con apoyo excéntrico en las pantallas, y un forjado de hormigón que salva luces máximas de 6 metros (ver figura 3).

Por otra parte, los grandes vuelos del volumen sobre rasante se resuelven con un sistema de grandes celosías metálicas de fachada, que apoyan de manera indirecta en las pantallas de los patios. Al ubicarse éstas en alineaciones retranqueadas respecto a la posición del cerramiento exterior, el apoyo de las celosías en las pantallas se realiza a través de las vigas metálicas del forjado.

3.2 Comportamiento frente acciones horizontales

La importancia de las acciones sísmicas derivadas de la localización del proyecto, con una aceleración sísmica básica de 0.11g (Málaga, NCSE-02) es otro de los factores más relevantes que definen el sistema estructural.

La estructura vertical, además de transmitir las cargas gravitatorias a cimentación, es la encargada de hacer frente a las acciones horizontales de origen sísmico. Para ello, el conjunto de pantallas de 300x40 cm, dispuestas en los patios con orientación en dirección Y, es complementado con cinco potentes muros de hormigón armado en dirección X, alineados a los lados largos de los patios y situados estratégicamente coincidiendo con núcleos de comunicación y escaleras. Estos muros, de 18m de longitud, 30cm de espesor y 13m de altura sobre rasante, dotan de rigidez horizontal al

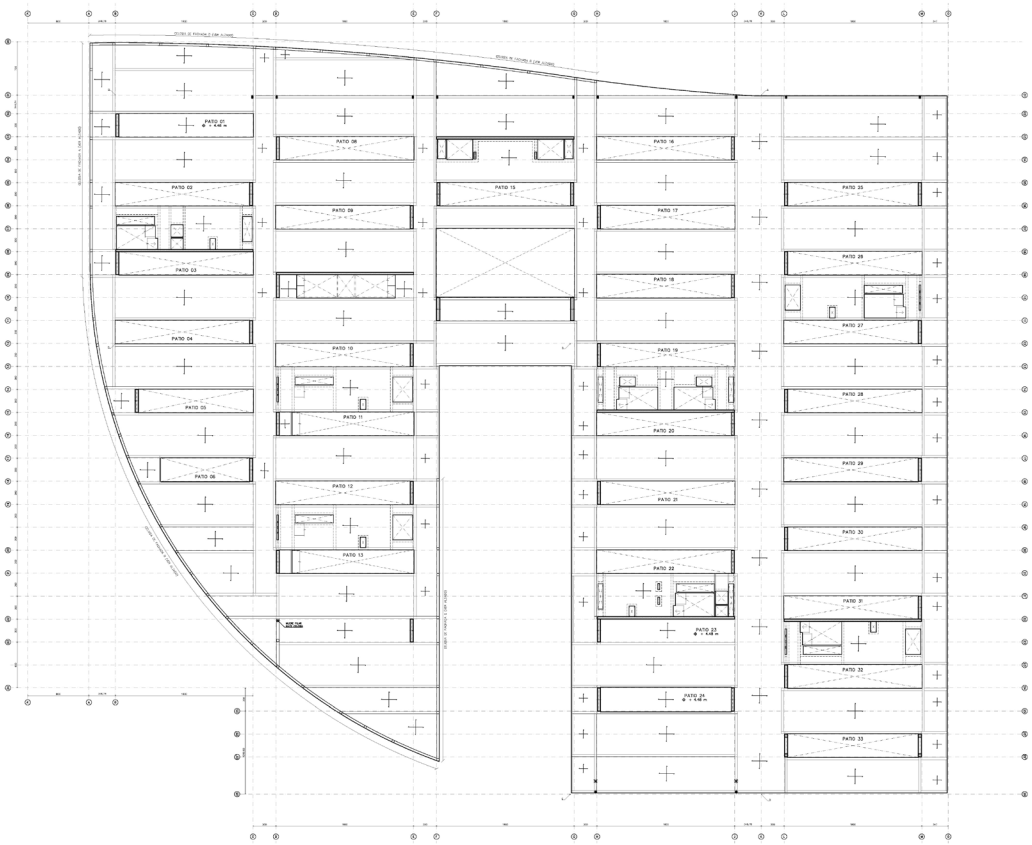

Figura 3. Configuración de la estructura. Pantallas de hormigón (X e Y), vigas metálicas y forjados de hormigón.

edificio en esta dirección (ver figura 2). De este modo, el conjunto de muros en X y pantallas en Y garantizan el adecuado comportamiento del edificio frente a las acciones horizontales de sismo, controlando así mismo su deformada horizontal.

El sistema estructural sismorresistente es irregular tanto en su configuración en planta como en la distribución de masas en sección, aspecto tenido en cuenta en la determinación del coeficiente de comportamiento adoptado en el análisis [2]. Se consideran como criterios de diseño los parámetros correspondientes a un sistema de muros desacoplados con una clase de ductilidad media, asignándose coeficientes modificadores por la irregularidad en planta y sección. Se considera además un coeficiente corrector de amortiguamiento viscoso de la estructura [3].

El volumen del edificio constituye por otra parte una única unidad estructural, sin juntas de dilatación [4]. Se estudia por lo tanto su comportamiento frente a deformaciones impuestas [5], acciones térmicas y reológicas, mediante procedimientos de control de la fisuración de las losas de forjado (en base a los criterios especificados en el Eurocódigo 2), analizándose los esfuerzos resultantes de aplicar un gradiente de temperatura, considerando juntas constructivas para controlar la retracción durante la ejecución, y disponiendo bandas de refuerzo de armado en los encuentros de forjados con muros y pantallas, puntos de mayor rigidez coincidentes con las zonas de concentración de esfuerzos sísmicos [6].

La masa sísmica es de unos 245000 kN. El modo de vibración principal en el eje X es de 0,18 s, con un 42,5% de masa movilizada, mientras que el modo de vibración principal en el eje Y es de 0,47 s, con un 45,1% de la masa movilizada. El cortante basal resultante es del orden de los 33000 kN en ambas direcciones, siendo los esfuerzos cortantes resultantes en las pantallas de hormigón en dirección Y del orden de los 2000 kN, con axiles de 5000 kN y flexiones de 7500 mkN. A nivel de desplazamientos sísmicos se obtienen desplazamientos de 13 y 12 mm en direcciones X e Y, en análisis modal espectral en régimen elástico, y que mayorados teniendo en cuenta el factor de reducción por ductilidad considerado R=2,04 quedan en desplazamientos de 27 y 25 mm respectivamente, valores inferiores al 0,015 veces la altura (12,46m).

3.3 Estructura mixta

El sistema estructural horizontal, que debe salvar luces de entre 15 y 18 m y voladizos de 3 m, es una estructura mixta formada por vigas metálicas de 85 cm de canto y una losa de hormigón armado de 15 a 22 cm. Este sistema es más ligero que el resto de soluciones consideradas, en particular de forjados postesados, lo que resulta en este caso especialmente favorable, al reducir la masa sísmica y, con ello, la magnitud de los esfuerzos horizontales de sismo.

El forjado mixto está formado por 4 familias de vigas metálicas armadas (S355): vigas de patio, dispuestas longitudinalmente a ambos lados de cada patio, salvando una luz de 18 m con un canto de 850 mm; vigas principales transversales, que salvan una luz de 15 m entre pantallas de patios con un canto de 850 mm, y recogen el apoyo de las vigas de patio en el extremo sin pantalla de hormigón; vigas en ménsula y vigas entre vigas transversales, que salvan un vuelo o una luz de 3.00 – 3.50 m con un canto de 400 mm; y por último, vigas perimetrales, dispuestas en el perímetro, que recogen cargas de fachada y la transmiten a las vigas ménsula (ver figura 3).

La disposición de las vigas metálicas de patio y transversales, que se alinean con la dimensión de los patios, hace que se generen apoyos embrochalados entre vigas y determina por otro lado el apoyo tangente de las vigas metálicas en las pantallas de hormigón, que se resuelve mediante insertos metálicos embebidos en las pantallas como se detalle más adelante.

El conjunto de conexiones se realiza en obra mediante uniones atornilladas, tanto en los encuentros entre vigas y apoyos embrochalados, como en los apoyos de las vigas en las pantallas a través de insertos metálicos embebidos en el hormigón (ver figura 4).

Por otra parte, se disponen en taller pernos conectores soldados en el ala superior de las vigas de acero para su conexión con la losa de hormigón. El dimensionado de las losas permite salvar luces de 6 m entre vigas de patio, evitando la disposición de vigas secundarias o correas. Las losas tienen un canto de 22 cm en el caso de losas de hasta 6 m de luz y de 15 cm en el caso de losas de 3 m de luz. Estos espesores permiten cumplir así mismo la función de diafragma, transmitiendo los esfuerzos horizontales de sismo al sistema de muros y pantallas.

La coordinación de la estructura con los pasos de instalaciones se resuelve dejando previstas perforaciones en las vigas metálicas de 850 mm, para permitir el paso de conductos a través de las vigas, mientras que en el caso de las vigas de menor canto (400 mm) los conductos pasan por debajo de las mismas (Figura 4).

Figura 4. Ejecución de estructura mixta de forjados con uniones embrochaladas atornilladas.

4. Elementos singulares.

4.1 Apoyo en pantallas de hormigón mediante insertos metálicos

El replanteo de las vigas principales, de patio y transversales, entorno a los patios sin invadir su dimensión libre de 18 m x 3 m, implica una excentricidad en los apoyos de las mismas en las pantallas de hormigón. Se dimensionan unas conexiones de acero, de canto mitad que las

Figura 5. Ejecución de apoyos de vigas en pantallas y vigas transversales en vigas de patio.

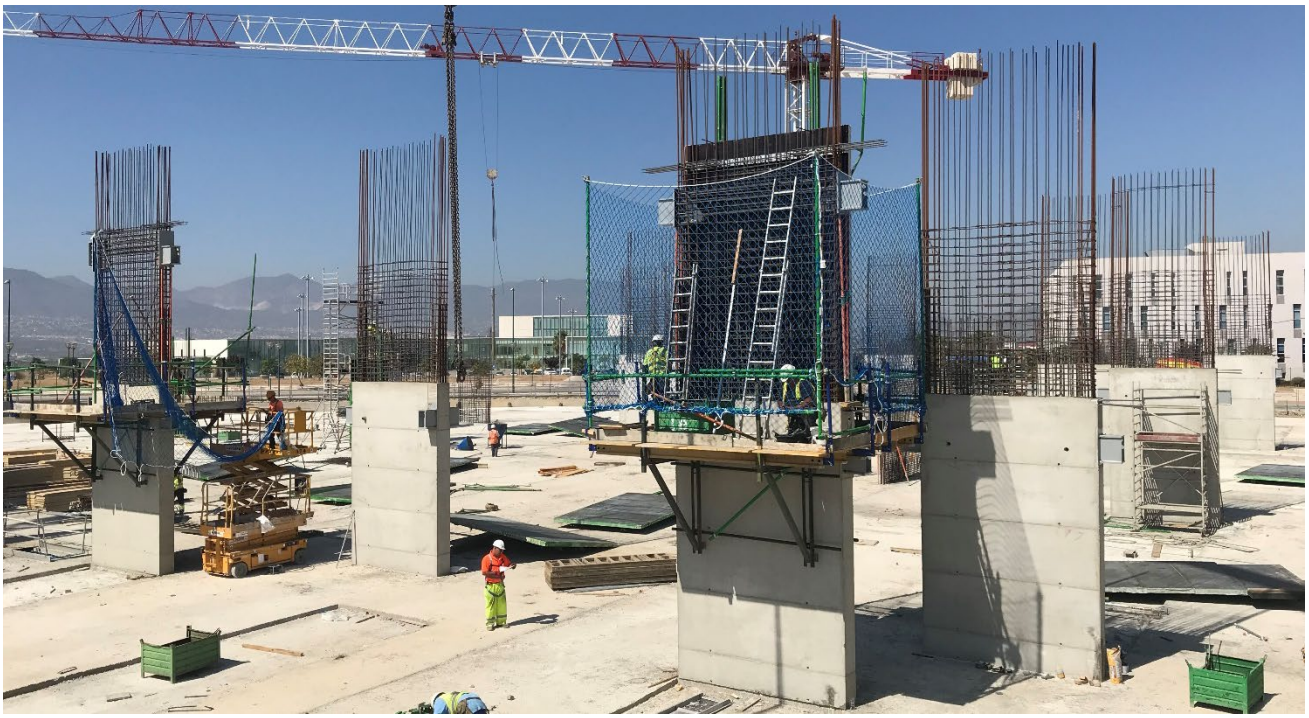

Figura 6. Ejecución de pantallas verticales con insertos embebidos y encofrado trepante.

vigas que apoyarán en ellas, y se ejecutan embebidas en la ejecución de las pantallas, siendo necesario un control topográfico estricto de su nivelación y replanteo (Figura 5).

Los insertos metálicos reciben así el apoyo de las vigas metálicas, que acometen a las pantallas lateral o frontalmente, y lo transmiten a las pantallas de hormigón. Estos insertos en ménsula están sometidos por lo tanto a esfuerzos de cortante y de flexión, por el apoyo excéntrico de las vigas. Los esfuerzos de cortante son recogidos por la ménsula metálica, que se prolonga en el interior de la pantalla de hormigón, transmitiéndole directamente los esfuerzos, mientras que la flexión es recogida mediante barras horizontales de anclaje de las ménsulas, a tracción [7]. Estas barras de anclaje se prolongaron hasta conectar con la ménsula del otro extremo de la pantalla, facilitando su disposición y compensando los esfuerzos.

Finalmente, por motivos de producción en obra, se ejecutaron las pantallas verticales de hormigón en toda su altura (13m), mediante encofrado trepante, previéndose la disposición de los insertos planta a planta (Figura 6).

Figura 7. Ejecución de pilar especial en cruz y triangulación superior.

4.2 Celosías metálicas trianguladas de fachada

El volumen sobre rasante presenta voladizos en sus fachadas norte y sur que se resuelven aprovechando el canto disponible en el perímetro del edificio, de dos plantas de altura, mediante la disposición de una celosía metálica que, apoyada en una serie de vigas principales, recoge las cargas de los forjados en esas zonas.

En la fachada sur, la zona curva del cerramiento es un gran voladizo desde los últimos apoyos planteados, una pantalla tipo de hormigón y un pilar especial, realizado con acero S 460 M y con forma de cruz diagonal en planta. Este elemento singular, de mínima presencia en la planta baja, forma parte de una estructura triangulada en las plantas superiores (Figura 7) que recoge la carga gravitatoria de dichos niveles y la distribuye hacia dicho pilar especial y la pantalla de H.A. más cercana, pudiendo materializar el voladizo planteado.

Figura 8. Ejecución de celosía de fachada con castilletes de apeo y gatos hidráulicos de desapeo.

La fabricación de la celosía de fachada se realizó por partes montadas en taller, transportándose piezas de más de una planta de ancho, a modo de peine, y atornillándose a las demás en obra. Su proceso de ejecución contaba con un sistema de apuntalado y apeo provisional, con castilletes formados por puntales tipo S-40 de gran capacidad de carga (326kN), en los apoyos principales de la celosía.

Figura 9. Celosía metálica de fachada en las zonas de grandes vuelos.

Su desapeo fue efectuado de manera controlada con fases escalonadas de carga y posterior descarga mediante 8 gatos hidráulicos de 260 toneladas y presión máxima de 695 bares, 45mm de carrera con cabezal basculante de 5° y central hidráulica para accionamiento simultáneo de los 8 gatos (Figuras 8 y 9).

El proceso de desapeo de las fachadas estructurales, y por lo tanto el proceso de carga de la estructura vertical vinculada a las mismas, se analiza mediante un análisis no lineal con distintas fases de descarga considerando el descenso de cada punto de control en función de la rigidez de éste y por lo tanto de su capacidad de carga y su límite de movimiento en vertical. El desapeo se inicia con una puesta en carga de los gatos considerando una elevación del sistema de unos 2mm, se retiran los apeos provisionales y se procede al descenso de los gatos.

4.3 Escaleras metálicas colgadas

Se destacan finalmente las escaleras metálicas de entrada al edificio desde la plaza de acceso, que cuelgan de las vigas metálicas de los niveles superiores mediante un conjunto de tirantes metálicos en tres alturas y dispuestos a ambos lados del peldañeado siguiendo la modulación de los mismos cada 30cm. Están formadas por pletinas metálicas que forman el peldañeado, huella y contrahuella y tirantes de 12mm; se rigidizan en los tramos de meseta mediante conexiones a los diafragmas de cada planta (Figura 10).

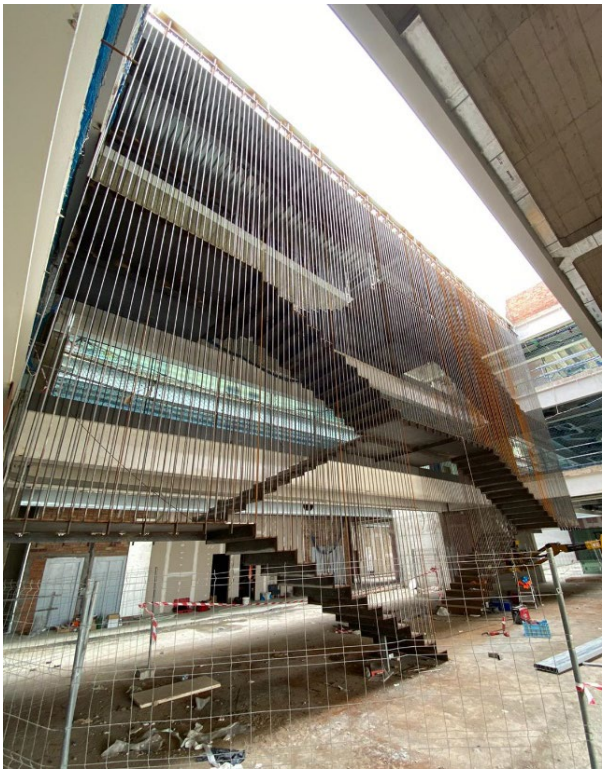

Figura 10. Ejecución de escalera colgada

5. Conclusiones

El edificio de la nueva Facultad de Psicología ofrece un ejemplo interesante de relación entre estructura y arquitectura, a partir de una configuración singular de estructura mixta, que responde de manera atractiva y coherente con el planteamiento arquitectónico.

Se emplean métodos de análisis no convencionales dada la confluencia de procedimientos de ejecución singular mediante apoyos en gatos hidráulicos; deformaciones impuestas debido a la ausencia de juntas de dilatación; grandes luces con estructuras mixtas; apoyos indirectos, así como acciones horizontales de origen sísmico.

Referencias

[1] llps arquitectos. Eduardo Pérez Gómez y Miguel Ángel Sánchez García. www.llps-arquitectos.com

[2] Vielma, J. C., Oller, S., & Barbat, B. (2007). Comparación de los factores de reducción de respuesta de la norma NCSE-02 y del Eurocódigo 8. Hormigón y acero, 58(246).

[3] Romo Martín, J. (2005). Tendencias en la normativa sismorresistente. Hormigón y Acero, 56(238).

[4] Rüsch H., Jungwirth, D., Hilsdorf, H. Creep and Shrinkage. Their effect on the behavior of concrete structures. Springer Verlage. Nueva York 1983.

[5] Pérez Caldentey, A. (2013). AA. V. Proyecto de estructuras de hormigón frente a los efectos de las deformaciones impuestas. ACHE, Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural.

[6] Peiretti, H. C., Martín-Caro, J. A., Petschke, T., Padilla, V. M., & Narváez, J. T. (2004). Estudio analítico y experimental de los efectos de las deformaciones impuestas en las estructuras integrales. Hormigón y acero, (232), 63-81.

[7] Martínez Calzón, J. (1966). Estructuras mixtas: teoría y práctica.