

MIGUEL ORTEGA
ENRIQUE BORDÓ
JAVIER PASCUAL
FRANCISCO MILLANES

ESTRUCTURA PENJADA SOBRE RASANT DE L'EDIFICI

1. PROCÉS CONSTRUCTIU DE L'ESTRUCTURA PENJADA SOBRE RASANT

El procés constructiu de les nou plantes penjades sobre rasant esdevé una decisió fonamental a l'hora de triar la tipologia estructural de cada element.

Alguns edificis penjats, com les Torres de Colón de Madrid (fig. 1) o la Torre del Centre d'Acollides i Congressos de la Fira de Bilbao (fig. 2), construïda fa poc, fan servir el sistema ascendent, descendent, tot executant els nuclis centrals de formigó fins a dalt, per executar posteriorment l'estructura superior de penjada.

Una vegada acabada aquesta estructura, es van penjant les plantes de dalt a baix, dels tirants, que en general solen ser sempre verticals i de formigó pretesat (fig. 1).

Aquest procés constructiu es dona en edificis penjats tipus torre, amb planta quadrada o rectangular i dimensions reduïdes per planta, de menys de 20 x 20 m, mai de les dimensions del nostre cas.

ESTRUCTURA COLGADA SOBRE RASANTE DEL EDIFICIO

1. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA ESTRUCTURA COLGADA SOBRE RASANTE

El proceso constructivo de las nueve plantas colgadas sobre rasante se convierte en una decisión fundamental a la hora de elegir la tipología estructural de cada elemento.

Algunos edificios colgados, como las Torres de Colón en Madrid (fig. 1) o la del Centro de Acogidas y Congresos de la Feria de Bilbao (fig. 2), recientemente construida, emplean el sistema ascendente, descendente, ejecutando los núcleos centrales de hormigón hasta arriba, para ejecutar posteriormente la estructura superior de cuelgue.

Una vez concluida esta, se van colgando las plantas desde arriba hacia abajo, de los tirantes, que en general suelen ser siempre verticales y de hormigón pretensado (fig. 1).

Este proceso constructivo se da en edificios colgados tipo torre, con planta cuadrada o rectangular y dimensiones reducidas por planta, menores de 20 x 20 m, nunca de las dimensiones de nuestro caso.

SUSPENDED STRUCTURE OF THE BUILDING ABOVE GROUND LEVEL

1. THE CONSTRUCTION PROCESS OF THE SUSPENDED STRUCTURE ABOVE GROUND LEVEL

The construction process of the nine suspended storeys above ground level proved to be a fundamental decision when it came to choosing the type of structure for each element.

Some suspended buildings, such as the Torres de Colón in Madrid (fig. 1) or the recently erected tower block of the Reception and Congress Centre at the Feria de Bilbao exhibition centre (fig. 2), employ a 'rising-descending' system, with the central concrete cores being built upwards so that the top suspended structure can then be constructed.

Once this is completed, the floors are suspended from the top down from braces that are generally all vertical and made of pre-stressed concrete (fig. 1).

This construction system is employed in tower block buildings with a square or rectangular floor plan with each floor being small in dimensions (less than 20 x 20 m and never the size of the building).



1. Procés constructiu ascendent descendent. Torres de Colón de Madrid.
2. Torre penjada del Centre d'Acollida i Congressos de Bilbao.

1. Proceso constructivo ascendente descendente. Torres de Colón. Madrid.
2. Torre colgada del Centro de Acogida y Congressos de Bilbao.

1. Rising-descending construction system. Torres de Colón. Madrid.
2. Suspended tower block of the Reception and Congress Centre in Bilbao.



3. Puntals HEB 300 cada 3,6 m sota els tirants interiors de sectors II i III.
4. Interior de sector I apuntalat.
5. Forjats apuntalats exteriorment cada 3,6 m durant les fases constructives.



3. Apeos HEB 300 cada 3,6 m bajo los tirantes interiores de sectores II y III.
4. Interior de sector I apeado.
5. Forjados apeados exteriormente cada 3,6 m durante las fases constructivas.



3. HEB 300 props each of which are 3.6 m below the internal braces of sectors II and III.
4. Interior of sector I propped.
5. Decks propped up every 3.6 m during the construction phase.

Tal com ja s'ha descrit, els nou forjats sobre la planta baixa del Parc de Recerca Biomèdica se suporten en els nuclis de pantalles centrals, els pilars interiors i exteriors, i se sustenten en els tirants interiors i exteriors. Per poder fer una construcció planta a planta segura i eficaç respecte dels terminis, es va decidir aprofitar l'alineació vertical dels tirants interiors dels sectors II i III, fent-los treballar a compressió durant les fases constructives apuntalant-los sota la planta 1. Els perfils emprats com a puntals són HEB 300 (fig. 3).

D'una manera similar, l'interior del sector I es construeix apuntalat, aprofitant els dos grans tirants centrals interiors, que es veuen en un segon pla a la fig. 4, tot apuntalant-los fins als fonaments sota la planta 1, amb perfils HEB 300.

L'extrem dels voladissos de les plantes P-1, 3, 5 i 8 es construeixen sobre 5 puntals HEB 300 riestats entre ells, per evitar problemes de vinculament, a causa de la seva altura important, 8 m entre les plantes 1 i 3, 3 i 5, i 12 m entre la planta 5 i la planta 8 (fig. 4).

Amb una geometria exterior de l'edifici el·líptic en què es redueixen els voladissos planta a planta, no és possible utilitzar els tirants definitius inclinats com a elements treballant a compressió, per la qual cosa es fa necessari fer l'apuntalament exterior dels forjats per mitjà de 69 puntals per planta, enfrontats als futurs tirants exteriors (fig. 5).

En disposar els puntals exteriors en alineacions verticals, els voladissos exteriors dels forjats durant les fases constructives són variables en cada planta, a causa de la geometria de forjats el·líptics concèntrics reduint-se en altura.

Tal y como ya se ha descrito, los nueve forjados sobre la planta baja del Parque de Investigación Biomédica se apoyan en los núcleos de pantallas centrales, los pilares interiores y exteriores, y se sustentan en los tirantes interiores y exteriores. Para poder realizar una construcción planta a planta segura y eficaz en cuanto a plazos, se decidió aprovechar la alineación vertical de los tirantes interiores de los sectores II y III, haciéndolos trabajar a compresión durante las fases constructivas apeándolos bajo la planta 1. Los perfiles empleados como apeos son HEB 300 (fig. 3).

De una forma similar, el interior del sector I se construye apeado, aprovechando los dos grandes tirantes centrales interiores, que se ven en un segundo plano en la fig. 4, apeándolos hasta la cimentación bajo la P-1, con perfiles HEB 300.

El extremo de los voladizos de las plantas P-1, 3, 5 y 8 se construyen apoyados en 5 apeos HEB 300 arriestrados entre sí, para evitar problemas de pandeo, debido a su importante altura, 8 m entre P-1 y 3, 3 y 5, y 12 m entre P-5 y P-8. (fig. 4).

Con una geometría exterior del edificio elíptica reduciéndose los voladizos planta a planta, no es posible emplear los tirantes definitivos inclinados como elementos trabajando a compresión, por lo que se hace necesario realizar el apeo exterior de los forjados mediante 69 apeos por planta, enfrentados a los futuros tirantes exteriores (fig. 5).

Al disponer los apeos exteriores en alineaciones verticales, los voladizos exteriores de los forjados durante las fases constructivas son variables en cada planta, debido a la geometría

As has already been described, the nine decks above ground level of the Barcelona Biomedical Research Park are supported by the central screen cores and the internal and external columns and are held up by the internal and external braces. In order to complete the construction floor by floor in a safe and efficient manner in terms of deadlines, the decision was made to exploit the vertical alignment of the internal braces in sectors II and III by making them work by compression during the construction phase by propping them up underneath the first floor. The girders used as props are HEB 300 (fig. 3).

Similarly, the interior of sector I was constructed propped up by using the two large central internal braces, shown in the background in fig. 4, by propping them up to the foundations below the first floor with HEB 300 girders.

The end of the cantilevers on the first, third, fifth and eighth floors were built resting on five HEB 300 props shored up together to prevent warping due to their considerable height of 8 m between the first and third floors and the third and fifth floors and 12 m between the fifth and eighth floors (fig. 4).

The exterior of the building is elliptical in shape with smaller cantilevers on each floor as the building rises. This means it is impossible to have the final braces as sloping elements working by compression and hence the external propping of the decks had to be done using 69 props per floor opposite the future external braces (fig. 5).

As the exterior props were arranged in vertical alignments, the exterior cantilevers of the decks varied on each floor during the construction

El màxim voladís resultant és de 3,5 m a la primera planta.

Els puntals exteriors utilitzats són perfils HEB 200 des de la planta 1 cap amunt, i HEB 300 cap avall. La càrrega màxima que ha de resistir cada puntal exterior durant les fases de muntatge és de 1.400 kN en estat límit últim (ELU).

El dimensionament d'aquests puntals està molt condicionat per qüestions de rigidesa axial, ja que davant d'alineacions de pantalles molt rígides i de pilars també rígids, els puntals exteriors no poden ser excessivament flexibles. D'aquesta manera, es minimitzen les deformacions diferencials entre uns suports i uns altres dins del mateix forjat.

En anar aguantant cada planta sobre els elements de formigó definitius, pantalles i pilars, sobre els tirants interiors, apuntalats fins als

de forjados elípticos concéntricos reduciéndose en altura. El máximo voladizo resultante es de 3,5 m en la planta 1.

Los apeos exteriores empleados son perfiles HEB 200 desde la planta 1 hacia arriba, y HEB 300 hacia abajo. La carga máxima que debe resistir cada apeo exterior durante las fases de montaje es de 1.400 kN en estado límite último (ELU).

El dimensionamiento de estos apeos está muy condicionado por cuestiones de rigidez axial, ya que frente a alineaciones de pantallas muy rígidas y de pilares también rígidos, los apeos exteriores no pueden ser excesivamente flexibles. De esta manera se minimizan las deformaciones diferenciales entre unos apoyos y otros dentro del mismo forjado.

Al ir apoyando cada planta sobre los elementos de hormigón definitivos, pantallas y pilares,

process due to the concentric elliptical shape of the decks that are smaller the higher up the building they are. The maximum cantilever is 3,5 m on the first floor.

The exterior props used were HEB 200 girders from the first floor upwards and HEB 300 downwards. The maximum load each exterior prop had to bear during the assembly phases was 1,400 kN in ultimate limit state (ULS).

The size of these props was determined to a large extent by their axis rigidity, since the exterior props could not be excessively flexible in view of the alignments of extremely rigid screens and rigid columns. The differential distortions between some props and others within the same deck were thus minimised.

By supporting each floor on the final concrete elements, screens and columns, on the internal



6. Seqüència del procés constructiu.
a. Execució de forjats apuntalats (setembre 2003).
b. Execució d'estructura superior de penjada (gener 2004).
c. Col·locació de pius superiors de penjada i enganxada de tirants a estructura de penjada (abril 2004).
d. Desapuntament i penjada de l'edifici (setembre 2004).
e. Execució de façana exterior (desembre 2004).
f. Façana exterior acabada (març 2005).

6. Secuencia del proceso constructivo.
a. Ejecución de forjados apeados (septiembre 2003).
b. Ejecución de estructura superior de cuelgue (enero 2004).
c. Colocación tetones superiores de cuelgue y enganche de tirantes a estructura de cuelgue (abril 2004).
d. Desapeo y cuelgue del edificio (septiembre 2004).
e. Ejecución de fachada exterior (diciembre 2004).
f. Fachada exterior concluida (marzo 2005).

6. Sequence of the construction process.
a. Constructing the propped decks (September 2003).
b. Constructing the upper suspension structure (January 2004).
c. Putting the upper suspension studs in place and anchoring the braces to the suspension structure (April 2004).
d. Removing the props and suspending the building (September 2004).
e. Constructing the exterior facade (December 2004).
f. Completed exterior facade (March 2005).

fonaments, i sobre els puntals exteriors, es pot cintrar una planta sobre l'anterior, i progressar en l'execució dels forjats seguint els procediments constructius convencionals d'edificis (fig. 6).

Seguint el procés, una vegada acabats tots els forjats, s'executa l'estructura superior de penjada, cintrant les bigues de penjada i les riostrs interiors i exteriors sobre l'últim forjat. A causa del pes elevat d'aquestes bigues, cal reapuntalar el nivell inferior per repartir el pes entre dues plantes.

Acabada l'estructura superior de penjada, es fa l'enganxada dels tirants interiors dels sectors II i III a les bigues de penjada i a les riostrs interiors. Un cop concloua aquesta operació, es fa el desapuntament dels tirants interiors, tallant els puntals sota la planta 1. En fer aquest procés, els tirants interiors entren en tracció tot elevat la càrrega fins a l'estructura superior de penjada, invertint el signe dels esforços, fins aquell moment de compressió (fig. 7).

Un cop penjat l'interior dels sectors II i III, es procedeix a fer la penjada interior del sector I. En primer lloc, es tallen els puntals sota els dos tirants centrals HEM 300, de manera simultània.

Un cop penjats aquests dos tirants, es va penjant i desapuntant de manera progressiva i seqüencial el voladís interior de les plantes 8, 5, 3 i 1, per mitjà dels tres tirants frontals, de mètrica 76.

Amb la penjada completa de l'interior del sector I, queda una superfície de 284 m² diàfans sense pilars a la planta baixa.

La penjada i el desapuntament exterior de l'edifici es fan planta a planta, enganxant els tirants exteriors des de l'estructura exterior de penjada fins al forjat superior. Una vegada col·locats tots els tirants, es fa la retirada dels puntals exteriors que suportaven aquella planta, deixant penjat el forjat dels tirants exteriors.

Penjada una planta, es col·loquen els tirants fins a la planta inferior, per fer posteriorment el desapuntament d'aquell nivell. Aquest procés repetitiu de col·locació de tirant i desapuntament es repeteix fins arribar, així, a la planta 1. Per mitjà d'aquesta operació, s'acaben tots els forjats penjats de l'estructura superior resistent, tal com s'aprecia en els esquemes de la figura 8.

sobre los tirantes interiores, apeados hasta la cimentación, y sobre los apeos exteriores, se puede cimbrar una planta sobre la anterior, y progresar en la ejecución de los forjados siguiendo los procedimientos constructivos convencionales de edificios (fig.6).

Siguiendo el proceso, una vez concluidos todos los forjados se ejecuta la estructura superior de cuelgue, cimbrando las vigas de cuelgue y las riostras interiores y exteriores sobre el último forjado. Debido al elevado peso de estas vigas, es necesario reapuntalar el nivel inferior para repartir el peso entre dos plantas.

Concluida la estructura superior de cuelgue, se procede a realizar el enganche de los tirantes interiores de los sectores II y III a las vigas de cuelgue y a las riostras interiores. Concluida esta operación se realiza el desapeo de los tirantes interiores, cortando los apeos bajo planta 1. Al realizar este proceso, los tirantes interiores entran en tracción elevando la carga hasta la estructura superior de cuelgue, invirtiendo el signo de los esfuerzos, hasta ese momento de compresión (fig. 7).

Colgado el interior de los sectores II y III, se procede a realizar el cuelgue interior del sector I. En primer lugar se cortan los apeos bajo los dos tirantes centrales HEM 300, de forma simultánea.

Colgados estos dos tirantes se va colgando y desapeando de forma progresiva y secuencial el voladizo interior de las plantas 8, 5, 3 y 1, mediante los tres tirantes frontales, de métrica 76.

Con el cuelgue completo del interior del sector I, queda una superficie de 284 m² diáfanos sin pilares en la planta baja.

El cuelgue y desapeo exterior del edificio se realiza planta a planta, engancho los tirantes exteriores desde la estructura superior de cuelgue hasta el forjado superior. Una vez colocados todos los tirantes, se procede a realizar la retirada de los apeos exteriores que soportaban dicha planta, dejando colgado el forjado de los tirantes exteriores.

Colgada una planta, se colocan los tirantes hasta la planta inferior, para posteriormente realizar el desapeo de ese nivel. Este proceso repetitivo de colocación de tirante y desapeo del forjado se repite hasta llegar así a la planta 1. Mediante esta operación se concluye con todos los forjados colgados de la estructura superior resistente, tal y como se aprecia en los esquemas de la figura 8.

braces, propped up to the foundations, and on the exterior props, it was possible to erect the centring for one floor above the previous one and then proceed to put the decks in place using conventional building methods (fig. 6).

Continuing the process, once all the decks were completed, work began on constructing the upper suspension structure by centring the suspension beams and the internal and external struts on the last deck. Due to the extremely heavy weight of these beams, it was necessary to repoint the lower level in order to distribute the weight over two floors.

Once the upper suspension structure was completed, work began to anchor the internal braces of sectors II and III to the suspension beams and internal struts. When this work was completed, the props were removed from the internal braces by cutting the props below the first floor. When this was done, the internal braces moved to a state of traction, raising the load up to the upper suspension structure, reversing the direction of the stresses, which until this point had been compression stresses (fig. 7).

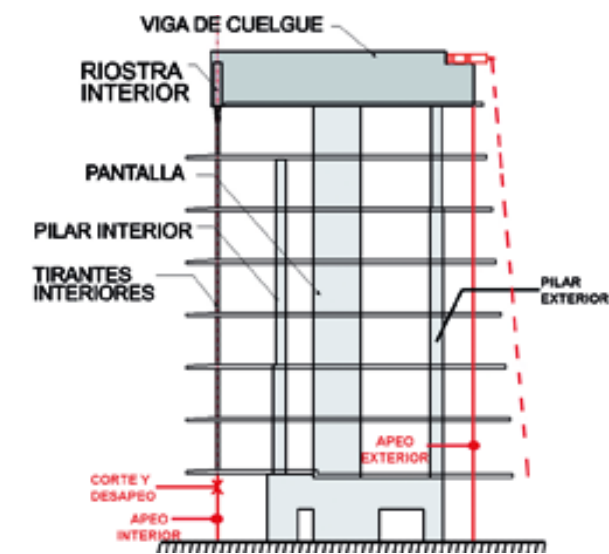
Once the interior of sectors II and III was suspended, work began to complete the internal suspension of sector I. Firstly, the props were cut below the two central HEM 300 braces at the same time.

Once these two braces were suspended, work began on suspending the interior cantilever of the eighth, fifth, third and first floors in a gradual and sequential manner using the three front braces, with a diameter of 76 mm. The props were removed, again sequentially, as work progressed.

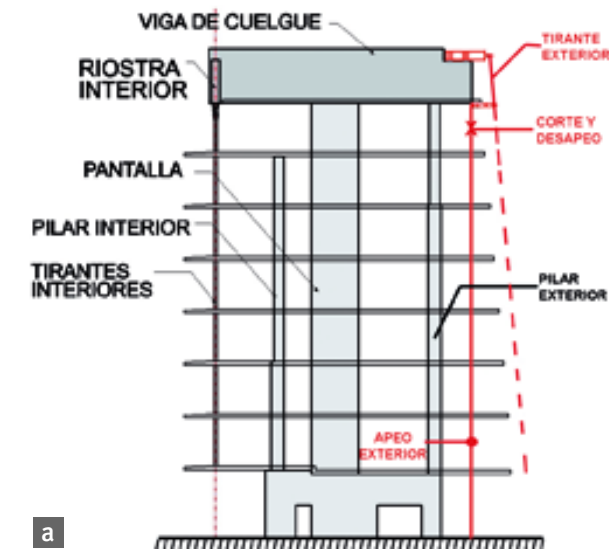
When the suspension of the interior of sector I was complete, the ground floor was left as an open plan space measuring 284 m².

The exterior of the building was suspended, and the props removed, floor by floor by anchoring the external braces from the upper suspension structure to the top deck. Once all the braces were in position, the external props supporting that floor were removed, leaving the deck suspended from the external braces.

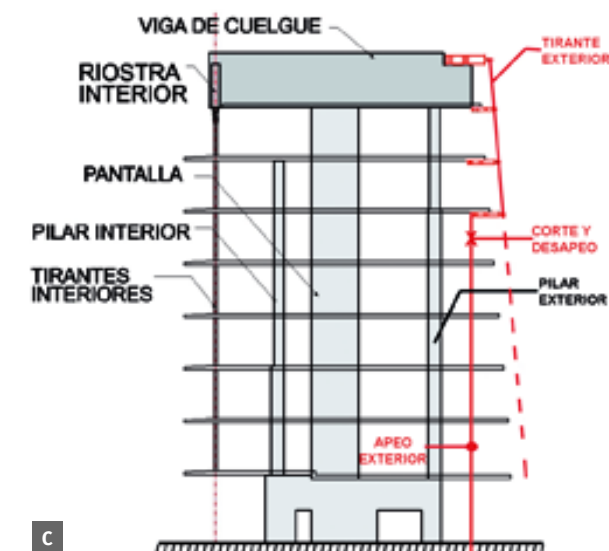
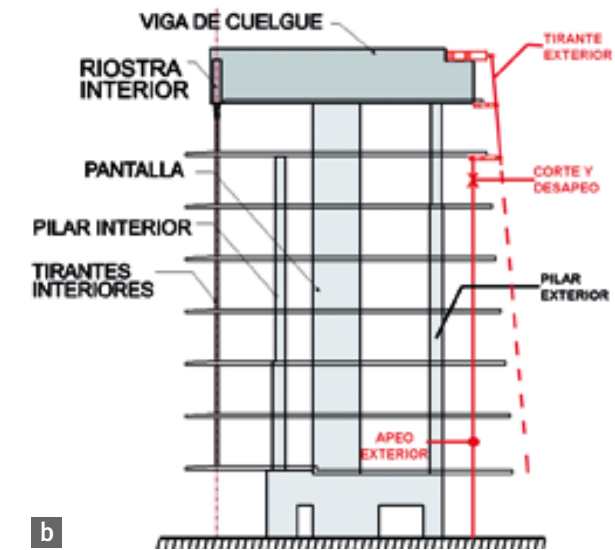
Once one floor had been suspended, the braces to the lower floor were put in place so that the props for this level could then be removed. This process of putting the braces in place and removing the props from the deck was repeated down to the first floor. The completion of this work resulted in all the decks being suspended from the upper load-bearing structure, as can be seen in the diagrams in figure 8.



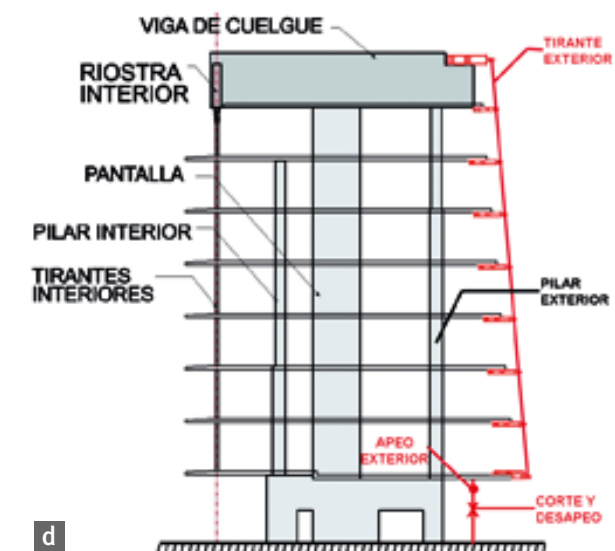
- 7. Desapuntament de tirants interiors.
- 7. Desapeo de tirantes interiores.
- 7. Removing the props from the internal braces.



- 8. Penjada i desapuntament de voladissos exteriors.
- a. Penjada i desapuntament de planta superior.
- b. Penjada i desapuntament de planta següent.
- c. Penjada i desapuntament repetitiu de plantes.
- d. Conclusió amb tots els forjats penjats.



- 8. Cuelgue y desapeo de voladizos exteriores.
- a. Cuelgue y desapeo de planta superior.
- b. Cuelgue y desapeo de siguiente planta.
- c. Cuelgue y desapeo repetitivo de plantas.
- d. Conclusión con todos los forjados colgados.



- 8. Suspension of the exterior cantilevers and removal of the props.
- a. The suspension of the top floor and the removal of the props.
- b. The suspension of the next floor and the removal of the props.
- c. The repeated suspension of the floors and removal of the props.
- d. Completion, leaving all the decks suspended.

2. PENJADA EXTERIOR DE L'EDIFICI

Tal com s'ha descrit, els voladissos exteriors de l'edifici s'aguanten per mitjà de la penjada de 69 tirants inclinats. Aquests tirants, amb una inclinació variable d'entre 4,8° i 8°, són metàl·lics amb secció circular massissa de 56 mm de diàmetre des de la planta 1 fins a la 3, 64 mm des de la planta 3 fins a la 5, i 76 mm des de la planta 5 cap amunt. L'acer té 460 N/mm² de límit elàstic, i els 69 tirants es disposen cada 3,6 m.

2.1. Pius de penjada exterior de forjats

L'enganxada dels tirants exteriors als forjats es realitza per mitjà de l'ús dels "pius de penjada exterior de forjats" (fig. 9). Aquests elements són unes mènsules HEB-280 d'acer S-275-JR, que se subjecten als forjats mitjançant un doble suport.

La unió dels tirants exteriors als pius exteriors de penjada de forjats es realitza articulant cada tirant planta a planta, mitjançant l'ús d'un terminal en "forquilla" superior i un en "orelló" inferior. Tots dos terminals es bolonen a dues xapes exteriors a mode d'orellons d'enganxada que se solden al mateix piu. Amb aquesta articulació planta a planta les unions permeten lleugers girs diferencials entre un tirant i un altre, per poder absorbir les toleràncies d'execució.

Davant la complicació de fer la subjecció a la llosa d'uns tirants metàl·lics situats a 90 cm de la vora del forjat, es van considerar diverses alternatives per als elements d'enganxada.

2. CUELQUE EXTERIOR DEL EDIFICIO

Tal y como se ha descrito, los voladizos exteriores del edificio se sustentan mediante el cuelgue de 69 tirantes inclinados. Estos tirantes con una inclinación variable entre 4,8° y 8°, son metálicos con sección circular maciza de 56 mm de diámetro desde la planta 1 a la 3, 64 mm desde la planta 3 a la 5, y 76 mm desde la planta 5 hacia arriba. El acero tiene 460 N/mm² de límite elástico, y los 69 tirantes se disponen cada 3,6 m.

2.1. Tetones de cuelgue exterior de forjados

El enganche de los tirantes exteriores a los forjados se realiza mediante el empleo de los "tetones de cuelgue exterior de forjados" (fig. 9). Estos elementos son unas ménsulas HEB-280 en acero S-275-JR, que se sujetan a los forjados mediante un doble apoyo.

La unión de los tirantes exteriores a los tetones exteriores de cuelgue de forjados se realiza articulando cada tirante planta a planta, mediante el empleo de un terminal en "horquilla" superior y uno en "orejeta" inferior. Ambos terminales se bolonan a dos chapas exteriores a modo de orejetas de enganche que se sueldan al propio tetón. Con esta articulación planta a planta las uniones permiten ligeros giros diferenciales entre un tirante y otro, para poder absorber las tolerancias de ejecución.

Ante la complicación de realizar la sujeción a la losa de unos tirantes metálicos situados a 90 cm del borde del forjado, se barajaron diferentes alternativas para los elementos de enganche.

2. EXTERNAL SUSPENSION OF THE BUILDING

As has been described, the external cantilevers of the building are supported by being suspended from 69 inclined braces. These braces are positioned every 3.6 m at differing angles between 4.8° and 8°. They are made of solid steel with an elastic limit of 460 N/mm² and have a circular section of 56 mm in diameter from the first to the third floor, 64 mm from the third to the fifth floor and 76 mm from the fifth floor upwards.

2.1. External deck suspension studs

The external braces are anchored to the decks by 'external deck suspension studs' (fig. 9). These elements are HEB 280 brackets in S-275-JR steel anchored to the decks by a double support.

The external braces are connected to the external deck suspension studs by linking each brace, floor by floor, using an upper hairpin terminal and a lower wing terminal. Both are bolted to the two external plates by means of couplings welded directly onto the stud. With this floor by floor linkage, the links allow slight differential twists between one brace and another, thereby allowing the construction tolerances to be absorbed.

A number of alternative couplings were considered given the difficulty of anchoring the slab to metal braces situated 90 cm from the edge of the deck.

The possibility of joining the girder frontally to the deck using a screwed base with rods pre-

La possibilitat de fer una junció del perfil en forma frontal al forjat, mitjançant l'ús d'una base cargolada amb barres prèviament embotides a la losa, es va descartar d'entrada ja que no eren mai perpendiculars a la vora del forjat.

Amb la geometria el·líptica dels forjats, els angles de l'eix del piu amb la vora del forjat eren diferents en tots i cada un dels pius de l'edifici, i per poder aconseguir una superfície plana perpendicular al piu hauria calgut fer uns reenfonaments o rescusats complicats a la llosa.

L'alternativa d'embotir el piu en el mateix forjat i materialitzar una unió mitjançant la junció de perfils transversals a mode de travessers, complicava moltíssim l'armat de les vores del forjat i requeria deixar tots els perfils col·locats a l'hora del formigonatge de cada planta.

Per independitzar els treballs d'execució dels forjats, l'execució de l'estructura metàl·lica i la col·locació de pius, es va optar per la solució definitiva de "pius de penjada" adossats inferiorment a la llosa, aprofitant les zones de fals sostre a l'exterior dels forjats.

Aquesta solució permet realitzar tots els pius de l'edifici iguals, i independitzar la col·locació d'aquests de l'execució dels forjats, deixant una sèrie de beines de 40 mm de diàmetre a la llosa per allotjar-hi posteriorment els cargols d'alta resistència que uniran el piu al forjat (fig. 10).

La tracció de cada tirant en cada planta, 225 kN en ELU, provoca un moment que es descompon en un parell de forces, tot comprimit el suport davanter del piu i traccionant el del darrere. El suport davanter se situa a 1,275 m de l'extrem del tirant, i se subjecta amb dos cargols d'alta resistència M16 sense pretensar.

La unió del darrera que se separa de la davantera 0,750 m es tracciona, per la qual cosa cal fer una unió capaç de suportar un tir d'1,75 vegades la tracció del tirant. Per aquest motiu, aquesta unió es pretensa per mitjà de l'ús de 4 cargols d'alta resistència de mètrica 16, deixant la unió sempre comprimida, per resistir la tracció que produeix la penjada exterior (fig. 9).

Per fixar l'HEB a la llosa es plantegen les dues unions descrites més amunt per mitjà de cargols d'alta resistència i l'ús d'unes bases superiors de 25 mm de gruix d'acer.

En els 7 cm deixats sobre les lloses dels forjats per al paviment hi ha d'haver prou espai per allotjar-hi les xapes de 25 mm esmentades, a més del llit de morter per a la regularització d'aquestes, i els caps dels cargols d'alta resistència. Aquest requisit invalidava l'alternativa de l'ús de barres convencionals de pretensat, per tal com es tractava d'elements amb rosques i caps de dimensions elevades, que sobresortien del reduït espai útil per allotjar-hi aquests terminals.

La posibilidad de realizar un empalme del perfil de forma frontal al forjado, mediante el empleo de una basa atornillada con barras previamente embebidas en la losa, se desechó de partida al no ser nunca los tetones perpendiculares al borde del forjado.

Con la geometría elíptica de los forjados, los ángulos del eje del tetón con el borde del forjado eran diferentes en todos y cada uno de los tetones del edificio, y para poder lograr una superficie plana perpendicular al tetón hubiera sido necesario realizar unos rehundidos o recrecidos complicados en la losa.

La alternativa de embeber el tetón en el propio forjado y materializar una unión mediante el empalme de perfiles transversales a modo de crucetas, complicaba enormemente el armado de los bordes del forjado y requería dejar todos los perfiles colocados a la hora del hormigonado de cada planta.

Para independizar los trabajos de ejecución de los forjados, ejecución de la estructura metálica, y colocación de tetones, se optó por la solución definitiva de "tetones de cuelgue" adosados inferiormente a la losa, aprovechando las zonas de falso techo en el exterior de los forjados.

Esta solución permite realizar todos los tetones del edificio iguales, e independizar la colocación de los mismos de la ejecución de los forjados, dejando una serie de vainas de 40 mm de diámetro en la losa para posteriormente alojar los tornillos de alta resistencia (TAR) que unirán el tetón al forjado (fig. 10).

La tracción de cada tirante en cada planta, 225 kN en ELU, provoca un momento que se descompone en un par de fuerzas, comprimiendo el apoyo delantero del tetón y traccionando el trasero. El apoyo delantero se sitúa a 1,275 m del extremo del tirante, y se sujeta por dos tornillos de alta resistencia M16 sin pretensar.

La unión trasera que se separa de la delantera 0,725 m se tracciona, por lo que hay que realizar una unión capaz de soportar un tiro de 1,75 veces la tracción del tirante. Por este motivo esta unión se pretensa mediante el empleo de 4 TAR de métrica 16, dejando la unión siempre comprimida, para resistir la tracción que produce el cuelgue exterior (fig. 9).

Para fijar el HEB inferior a la losa se plantean las dos uniones descritas mediante tornillos de alta resistencia, y el empleo de unas bases superiores de 25 mm de espesor de acero.

En los 7 cm dejados sobre las losas de los forjados para el pavimento debe haber espacio suficiente para alojar las chapas de 25 mm mencionadas, además de la cama de mortero para la regularización de las mismas, y las cabezas de los TAR. Este requisito invalidaba la alternativa del empleo de barras convencionales de preten-

viously embedded into the slab was rejected at the outset as the studs would never be perpendicular to the edge of the deck.

Given the elliptical shape of the decks, the angles of the axis of the stud with the edge of the deck were different for each and every one of the studs in the building. In order to achieve a flat surface perpendicular to the stud, it would have been necessary to make complicated dips or peaks in the slab.

The alternative of embedding the stud in the deck itself and effecting a link by fitting together transverse girders in the manner of crosspieces made it enormously difficult to reinforce the edges of the deck and required all the girders put in place during the concreting of each floor to be left.

In order for the construction of the decks and the metal structure and the fitting of the studs to all be done as separate tasks, the decision was made to use the solution of suspension studs up against the underneath of the slab, thereby making the most of the areas of false ceiling on the exterior of the decks.

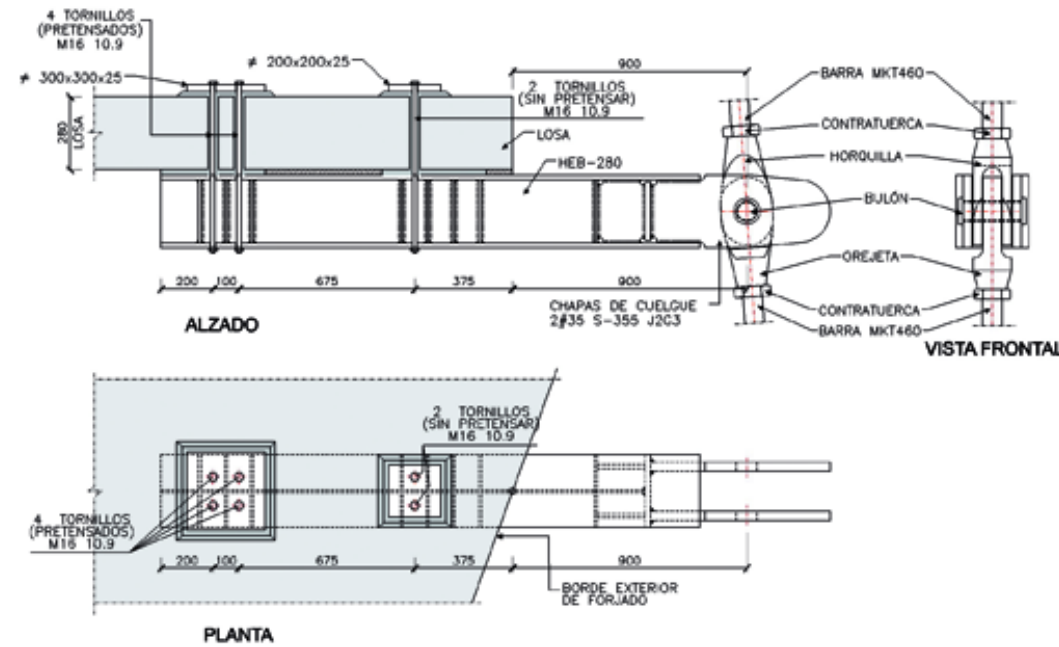
With this solution, it was possible to make all the studs in the building the same and to put them in place as a separate task to the construction of the decks, leaving in the slab a series of sheaths 40 mm in diameter that would later take high-resistance bolts to link the stud to the deck (fig. 10).

The traction on each brace on each floor, 225 kN in ULS, creates a moment that divides into split torque, compressing the front support of the stud and pulling on the rear support. The front support is positioned 1.275 m from the end of the brace and held in place by two M16 high-resistance bolts without pre-tensioning.

The rear coupling that is separated from the front one by 0.725 m is held under traction, hence a coupling capable of withstanding a pull 1.75 times the traction of the brace had to be made. As a result, the coupling was pre-stressed using four 16-m, high-resistance bolts, leaving the join constantly compressed to withstand the traction caused by the external suspension (fig. 9).

To fix the lower HEB to the slab, the two joints described above were achieved using high-resistance bolts and the use of steel bases more than 25 mm thick.

The 7 cm left on the deck slabs for the flooring should be enough space to take the 25-mm plates mentioned earlier, as well as the bed of mortar to even up the plates and the high-resistance bolts. This requirement made it impossible to employ the alternative of conventional pre-stressed rods: as these have large nuts and heads, they would have protruded from the small space for housing them.



9. Pius de penjada exterior de forjats HEB 280.

9. Tetones de cuelgue exterior de forjados HEB 280.

9. HEB 280 external deck suspension studs.

- 10. Detall de tirants exteriors, pius exteriors de penjada de forjats i pius superiors de penjada exteriors.
- 11. Detall d'una volandera indicadora de tensió (DTI).
- 10. Detalle de tirantes exteriores, tetones exteriores de cuelgue de forjados y tetones superiores de cuelgue exterior.
- 11. Detalle de una arandela indicadora de tensión (DTI).
- 10. Detail of the external braces, external deck suspension studs and the upper external suspension studs.
- 11. Detail of a tension indicator washer (DTI).



Per aquest motiu, va caldre recórrer a l'ús dels cargols d'alta resistència per fixar els pius als forjats.

La unió d'un perfil de 28 cm, amb una llosa de formigó de 28 cm amb cargols d'alta resistència pretesats amb una longitud de gairebé 60 cm no és habitual, i encara ho és menys que la unió no sigui entre dues xapes metàl·liques, sinó entre un perfil i una llosa de formigó.

Per aquests motius, per tenir una garantia plena de la correcta execució del parell de serratge dels cargols d'alta resistència de la unió del darrere, es va plantejar l'ús de volanderes indicadores de tensió (fig. 11) amb el mètode d'indicador directe de tensió (Direct Tension Indicators, DTI).

Els avantatges de l'ús del mètode d'indicador directe de tensió per donar el parell de serratge als cargols d'alta resistència amb l'ús de volanderes indicadores de tensió són clars respecte de la resta de mètodes.

En el mètode de control del parell torsor, per fer el serratge d'unions amb cargols d'alta resistència s'introdueix un parell torsor als cargols que indueix un esforç a l'espiga del cargol, el qual depèn del diàmetre del cargol i d'un coeficient que avalua el fregament entre els components de la part que gira. Aquest coeficient varia molt segons les condicions de subministrament de cargols i rosques. Així, per a cargols i rosques lleugerament greixats, aquest coeficient és 0,18, mentre que si els cargols estan bruts o oxidats, pot arribar a valer 0,4, i en canvi, si estan molt greixats, podria arribar a 0,09.

Com es pot observar, la variació del coeficient de fregament és molt important segons quines siguin les condicions de greixatge de cargols i rosques. Si es procedeix a fer el pretesat fent servir el valor del parell torsor indicat per les normatives (Eurocodi o NBE-EA-95), pensant en

sado, al tractarse de elementos con tuercas y cabezas de dimensiones elevadas, que sobresaldrían del reducido espacio útil para alojar estos terminales.

Por este motivo se hizo necesario recurrir al empleo de los tornillos de alta resistencia para fijar los tetones a los forjados.

La unió de un perfil de 28 cm, con una losa de hormigón de 28 cm con tornillos de alta resistencia pretesados con una longitud de casi 60 cm no es habitual, y menos lo es todavía que la unió no sea entre dos chapas metálicas, sino que sea entre un perfil y una losa de hormigón.

Por estos motivos, para tener una garantía plena de la correcta ejecución del par de apriete de los TAR de la unión trasera, se planteó el empleo de arandelas indicadoras de tensión (fig. 11) con el método de indicador directo de tensión (Direct Tension Indicators, DTI).

Las ventajas del empleo del método de indicador directo de tensión para dar el par de apriete a los TAR con el empleo de arandelas indicadoras de tensión son claras respecto del resto de métodos.

En el método de control del par torsor, para realizar el apriete de uniones con TAR se introduce un par torsor a los tornillos que induce un esfuerzo en la espiga del tornillo, el cual depende del diámetro del tornillo, y de un coeficiente que evalúa el rozamiento entre los componentes de la parte que gira. Este coeficiente varía mucho según las condiciones de suministro de tornillo y tuercas. Así, para tornillos y tuercas ligeramente engrasados, ese coeficiente es 0,18, mientras que si los tornillos están sucios u oxidados puede llegar a valer 0,4, y en cambio si están muy engrasados podría llegar a 0,09.

Como puede observarse, la variación del coeficiente de rozamiento es muy importante según sean las condiciones de engrasado de tornillos

For this reason, it was necessary to use high-resistance bolts to fix the studs to the decks.

It is unusual to join a 28-cm girder to a 28-cm concrete slab using pre-stressed, high-resistance bolts that are almost 60 cm long, in particular given that we were not connecting two metal plates but a girder and a concrete slab.

For this reason, in order to fully guarantee the correct tightening torque of the high-resistance bolts of the rear coupling, it was decided to use tension indicator washers (fig. 11) using the direct tension indicator (DTI) method.

The direct tension indicator method has clear advantages over other methods in applying the tightening torque to the high-resistance bolts when using tension indicator washers.

In the torque control method, in order to bolt the joints using high-resistance bolts, torque is applied to the bolts, which in turn puts the shaft of the bolt under stress. This stress depends on the diameter of the bolt and on a coefficient that assesses the friction between the components of the rotating part. This coefficient can vary considerably depending on the condition of the nuts and bolts. If the nuts and bolts are lightly greased, this coefficient is 0.18, whereas if they are dirty or rusty, it may reach 0.4, and if they are heavily greased, it could reach 0.09.

As can be seen, the variation in the coefficient of friction may be considerable depending on the greasing or otherwise of the nuts and bolts. If the pre-stressing is done using the torque value indicated by the standards (Eurocode or NBE-EA-95) taking into account a state of greasing that would produce a coefficient of $K=0.18$, it may be that if the coefficient is really 0.09, the pre-stressing may be double the estimate and so the bolt will break, whereas if $K=0.36$, the pre-stressing will halve, thereby dramatically reducing the capability of the joint, which would

unes condicions de greixatge amb $K=0,18$, pot passar que si el coeficient realment val 0,09, s'obtingui un pretesat doble de l'estimat, cosa que arribaria a trencar el cargol; mentre que si $K=0,36$, s'obté un pretesat meitat, cosa que redueix dràsticament la capacitat de la unió, qüestió inadmissible en un element del qual pegen els forjats.

El mètode de control del parell torsor requiriria un mesurament experimental del coeficient K en cada lot de cargols i, tot i que es calibrés, hauria depès molt de les condicions de greixatge dels cargols i les rosques, per la qual cosa aquest mètode de parell de serratge, tot i que calibrat, no oferia les garanties necessàries per a les subjeccions dels pius exteriors de penjada de forjats.

El mètode de girar la rosca està calibrat per a unions de xapes metàl·liques de gruixos petits i no cobreix la unió d'un perfil a una llosa de formigó, amb una unió de gairebé 60 cm.

En descartar aquests mètodes, queda directament descartat el mètode combinat, que consisteix en una barreja de tots dos.

El mètode d'indicador directe de tensió per mitjà de l'ús de les volanderes indicadores de tensió resultava el mètode més fiable per assegurar el serratge correcte dels cargols d'alta resistència.

Les volanderes indicadores de tensió tenen uns ressalts (fig. 11) que, en assolir la força de tesat del cargol d'alta resistència, es redueixen fins a un límit, que indica l'ajustament correcte del cargol. Mitjançant aquest mètode hi ha un doble control, el propi de les volanderes indicadores de tensió, comprovant l'espai entre ressalts, i per mitjà del control del parell de serratge, controlat amb els assaigs de calibratge del sistema.

Com que es tracta d'una unió amb cargols de dimensions no convencionals, per fer les com-

y tuercas. Si se procede a realizar el pretensado utilizando el valor del par torsor indicado por las normativas (Eurocódigo ó NBE-EA-95), pensando en unas condiciones de engrasado con $K=0,18$, puede suceder que si el coeficiente realmente vale 0,09, se obtenga un pretensado doble del estimado, llegando a romper el tornillo; mientras que si $K=0,36$, se obtendrá un pretensado mitad, reduciendo drásticamente la capacidad de la unió, cuestión inadmissible en un elemento del que cuelgan los forjados.

El método de control del par torsor, requeriría una medición experimental del coeficiente K en cada lote de tornillos y, aunque se calibrara, hubiera dependido mucho de las condiciones de engrase de los tornillos y tuercas, por lo que este método del par de apriete, aun calibrado, no ofrecía las garantías necesarias para las sujeciones de los tetones exteriores de cuelgue de forjados.

El método de girar la tuerca está calibrado para uniones de chapas metálicas de espesores pequeños, y no cubre la unió de un perfil a una losa de hormigón, con una unió de casi 60 cm.

Al descartar estos métodos, queda directamente descartado el método combinado, que consiste en una mezcla de ambos.

El método de indicador directo de tensión mediante el empleo de las arandelas indicadoras de tensión resultaba el método más fiable para asegurar el apriete correcto de los TAR.

Las arandelas indicadoras de tensión tienen unos resaltes (fig. 11) que, al alcanzar la fuerza de tensado del TAR, se reducen hasta un límite, que indica el correcto apretado del tornillo. Mediante este método hay un doble control, el propio de las arandelas indicadoras de tensión, comprobando el espacio entre resaltes, y mediante el control del par de apriete, controlado con los ensayos de calibración del sistema.

be unacceptable in an element from which the decks are suspended.

The torque control method would call for a trial measurement of the K coefficient of each batch of bolts, and even it were calibrated, it would depend very much on the degree of greasing of the nuts and bolts. Consequently, this torque tightening method, even when calibrated, does not offer the necessary guarantees for anchoring the external deck suspension studs.

The method of turning the nut is calibrated for joining thin metal plates and cannot be used when joining a girder to a concrete slab using a joint that is almost 60 cm.

The fact that these two methods were rejected necessarily meant that a combined method involving both of them could not be used either.

The direct tension indicator method using tension indicator washers was, then, the most reliable method to ensure the correct torque of the high-resistance bolts.

Tension indicator washers have protrusions (fig. 11) which are flattened to a certain point when the high-resistance bolt tension force is reached, indicating that the bolt has been tightened correctly. This method provides two forms of control: the method characteristic of tension indicator washers, which involves checking the space between the protrusions; and the torque tightening control method, which is controlled using system calibration testing.

Given that this coupling is achieved by means of bolts of unusual size, it was decided that the tension of three studs (twelve screws) would be tested in order to check the state of the clamping. The same clamping and control procedure to be used throughout the building was employed in the tests, the bolts being arranged in advance in such a way that distortion and

- 12. Assaig de calibratge de les unions pretesades, instrumentalitzant els cargols d'alta resistència.
- 12. Ensayo de calibración de las uniones pretesadas, instrumentalizando los TAR.
- 12. Calibration of the pre-stressed joints, arranging the high-resistance bolts.



provacions de la condició de serratge, es van plantejar els assaigs de tesat de tres pius (12 cargols). A l'assaig es va fer servir el mateix procediment d'ajustament i control que s'hauria d'utilitzar en tota l'obra, instrumentant prèviament els cargols de manera que s'obtingués la deformació i la tensió a la canya del cargol en cada instant, i en particular en el moment que s'assolia la tensió de referència amb l'aixafament dels ressalts de les DTI.

Per mitjà d'aquests assaigs de calibratge (fig. 12), queda definit el parell torsor que cal fer servir en les unions de l'edifici, moment en el qual les DTI asseguruen el funcionament correcte de la unió.

En el cas que, en aplicar el parell torsor calibrat, els ressalts de les DTI no estiguessin prou aixafades, s'estaria produint més fregament del normal, infratesant els cargols, per la qual cosa caldria tornar a calibrar el mètode. De tota manera, durant l'execució de les obres, aquest fet no va ser necessari, en acabar totes les unions amb les volanderes aixafades per al parell torsor calibrat.

2.2. Pius superiors de penjada exterior

L'enganxada dels tirants exteriors a l'estructura superior de penjada es realitza per mitjà de l'ús dels pius superiors de penjada, que són unes bigues armades doble T metàl·liques de 70 cm de cantell, d'acer S-355, en què les ales són xapes de 450 x 35 mm, i l'ànima és de 25 mm. El terminal en orella del tirant superior s'articula a dues xapes que surten de l'extrem del piu (fig. 13).

Aquests pius superiors exteriors es disposen en el pla vertical dels pius exteriors de penjada de forjats i recullen els tirants exteriors cada 3,6 m. El tir màxim d'un tirant és de 1.650 kN en ELU, i el mecanisme de transmissió del tir a les bigues superiors de penjada és similar al dels pius de penjada de forjats, ja que el moment induït per la tracció de l'extrem es descompon en un parell de forces. D'aquesta manera, es comprimeix la unió davantera del piu, situada a 1,675 de l'extrem del tirant, unió simplement sostinguda, i es tracciona la unió del darrere.

La unió del darrere dista de la davantera 1,275 m i ha de ser capaç de resistir un tir d'1,31 vegades el tir del tirant. Per aquest motiu, aquesta unió es pretesa a les bigues de penjada, o les rioistes exteriors, per mitjà de l'ús de quatre barres pretesades tipus MKY 1050, de mètrica H32. La unió del darrere queda, així, sempre comprimida, per resistir la tracció que produeix la penjada total dels forjats exteriors, en un mecanisme anàleg a l'emprat per al piu tipus.

El procés seguit per fer la penjada exterior assegura l'absorció de les toleràncies normals en l'execució de la col·locació de tirants exte-

Al tractar-se de una unió con tornillos de dimensiones no convencionales, para realizar las comprobaciones de la condición de apriete, se plantearon los ensayos de tensado de tres tetones (12 tornillos). En el ensayo se empleó el mismo procedimiento de apriete y control que habría de utilizarse en toda la obra, instrumentando previamente los tornillos de manera que se obtuviera la deformación y tensión en la caña del tornillo en cada instante, y en particular en el momento en que se alcanzaba la tensión de referencia con el aplastamiento de los resaltes de las DTI.

Mediante estos ensayos de calibración (fig. 12), queda definido el par torsor que emplear en las uniones del edificio, momento en el cual las DTI aseguran el correcto funcionamiento de la unió.

En el caso de que, al aplicar el par torsor calibrado, los resaltes de las DTI no estuvieran suficientemente aplastadas, se estaría produciendo más rozamiento de lo normal, infratesando los tornillos, por lo que sería necesario volver a calibrar el método. De cualquier manera, durante la ejecución de las obras este hecho no fue necesario, al finalizar todas las uniones con las arandelas aplastadas para el par torsor calibrado.

2.2. Tetones superiores de cuelgue exterior

El enganche de los tirantes exteriores a la estructura superior de cuelgue se realiza mediante el empleo de los tetones superiores de cuelgue, que son unas vigas armadas doble T metálicas de 70 cm de canto, en acero S-355, donde las alas son chapas de 450 x 35 mm, y el alma es de 25 mm. El terminal en orejeta del tirante superior se articula a dos chapas que salen del extremo del tetón (fig. 13).

Estos tetones superiores exteriores se disponen en el plano vertical de los tetones exteriores de cuelgue de forjados, y recogen los tirantes exteriores cada 3,6 m. El tiro máximo de un tirante es de 1.650 kN en ELU, y el mecanismo de transmisión del tiro a las vigas superiores de cuelgue es similar al de los tetones de cuelgue de forjados, ya que el momento inducido por la tracción del extremo se descompone en un par de fuerzas. De esta manera se comprime la unió delantera del tetón, situada a 1,675 m del extremo del tirante, unió simplemente apoyada, y se tracciona la unió trasera.

La unió trasera dista de la delantera 1,275 m, y debe ser capaz de resistir un tiro de 1,31 veces el tiro del tirante. Por este motivo, esta unió se pretensa a las vigas de cuelgue, o a las riostras exteriores, mediante el empleo de cuatro barras pretesadas tipo MKY 1050, de mètrica H32. La unió trasera queda así siempre comprimida, para resistir la tracció que produce el cuelgue

stress was obtained in the bolt shaft at all times and in particular at the moment when the specified tension was reached, as indicated by the flattening of the protrusions of the direct tension indicators.

These calibration tests (fig. 12) determined the torque to be used in the joints in the building, being the moment when the direct tension indicators ensured that the joint was working correctly.

If the protrusions of the direct tension indicators were not sufficiently flattened when applying the calibrated torque, more friction than normal would be being caused, meaning the bolts were inadequately tensioned. In these circumstances, it would be necessary to recalibrate the method. This was not, however, required during the construction as all the joints had flattened protrusions at the end using the calibrated torque.

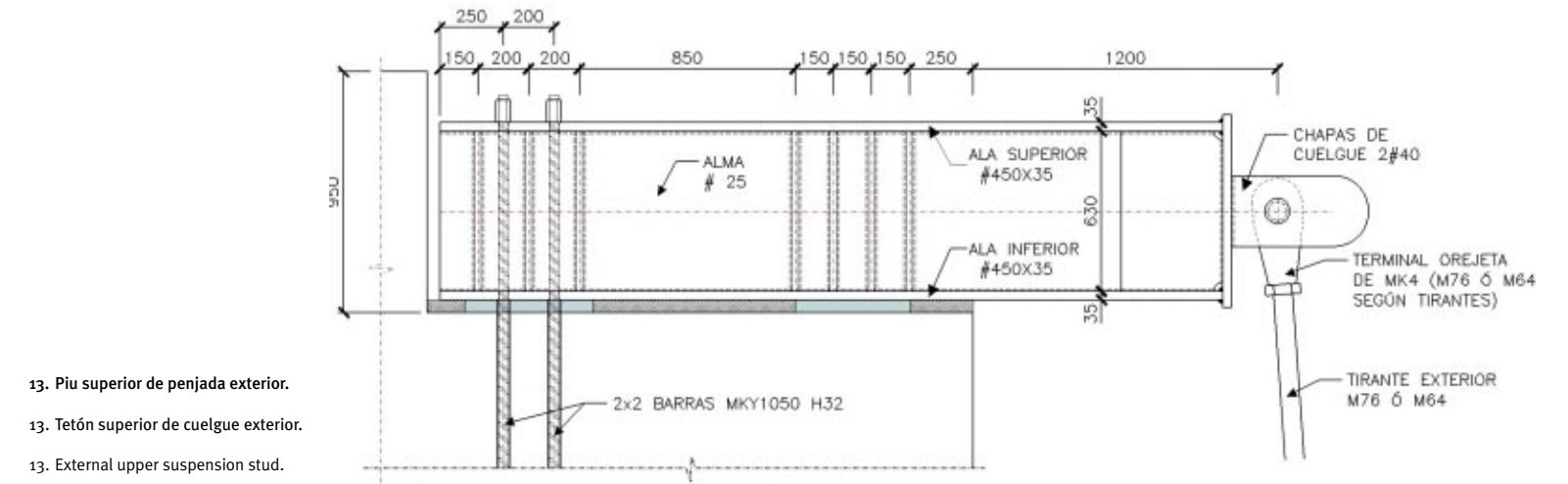
2.2. External upper suspension studs

The external braces are connected to the upper suspension structure by means of upper suspension studs, which are built-up, S-355 steel girders in the form of a double T and measuring some 70 cm thick. The flanges of these girders are plates measuring 450 x 35 mm, while the vertical leg measures 25 mm. The wing ending of the upper brace is linked to two plates that protrude from the end of the stud (fig. 13).

These external upper studs are arranged in the vertical plan of the external deck suspension studs and are jointed to the exterior braces every 3.6 m. The maximum pull of a brace is 1,650 kN in ULS, and the mechanism for channelling the pull to the upper suspension beams is similar to that of the deck suspension studs, since the moment induced by the traction of the end is divided into split torque. Consequently, the front link of the stud, which is simply supported and situated 1.675 m from the end of the brace, is compressed, while the rear link is subjected to traction.

The rear link is separated from the front one by 1.275 m and must be capable of withstanding a pull 1.31 times the pull of the brace. For this reason, this link is pre-stressed to the suspension beams or to the exterior struts through the use of four pre-stressed MKY 1050 rods with a diameter of H32. The rear link is, consequently, constantly compressed in order to withstand the traction produced by the total suspension of the exterior decks in a mechanism similar to that used for the standard stud.

The process followed to complete the exterior suspension thus guaranteed that the normal tolerances involved in positioning the exterior braces and connecting them to the deck suspen-



riors i enganxada als pius de penjada de forjats, de la manera següent.

En primer lloc, es col·loquen els pius superiors, enganxats a l'estructura superior de penjada. De manera simultània, es col·loca el piu del forjat immediatament inferior, el qual té una certa amplitud de col·locació en deixar beines de 40 mm en el forjat, per allotjar cargols d'M16 posteriorment. Amb aquestes amplituds es pot jugar entre la unió del darrere i la del davant per fer que l'extrem del tirant es mantingui en el mateix pla vertical que l'extrem del piu superior.

Aquest procés de col·locació de pius exteriors de forjats és repetitiu i, en el cas que es produís un error greu de replantejament de les beines que han d'allotjar els cargols per enganxar el piu, simplement caldria fer unes noves perforacions en el forjat amb el replantejament correcte per assegurar l'alineació dels tirants en el pla vertical.

Garantit el pla vertical pel qual han de passar els tirants, es va dissenyar una unió de tirants a pius de forjats bolonada, per assumir els petits canvis d'alineació en l'alineació inclinada del tirant en cada planta.

La col·locació de tirants exteriors planta a planta va suposar el replantejament *in situ* i el tall de tirants amb les longituds reals en cada cas. Per absorbir les petites toleràncies de longitud, les mateixes rosques superior i inferior dels terminals en forquilla i orella permetien una amplitud de +/- 5 cm.

total de los forjados exteriores, en un mecanismo análogo al empleado para el tetón tipo.

El proceso seguido para realizar el cuelgue exterior asegura la absorción de las tolerancias normales en la ejecución de colocación de tirantes exteriores y enganche a los tetones de cuelgue de forjados, de la forma siguiente.

En primer lugar se colocan los tetones superiores, enganchados a la estructura superior de cuelgue. De forma simultánea se coloca el tetón del forjado inmediatamente inferior, el cual tiene cierta holgura de colocación al dejar vainas de 40 mm en el forjado, para posteriormente alojar tornillos de M16. Con estas holguras se puede jugar entre la unió trasera y la delantera para hacer que el extremo del tirante se mantenga en el mismo plano vertical que el extremo del tetón superior.

Este proceso de colocación de tetones exteriores de forjados es repetitivo y, en caso de que se produjese un error grave de replanteo de las vainas que deben alojar los tornillos para enganchar el tetón, simplemente habría que realizar unas nuevas perforaciones en el forjado con el replanteo correcto para asegurar la alineación de los tirantes en el plano vertical.

Garantizado el plano vertical por el que deben pasar los tirantes, se diseñó una unió de tirantes a tetones de forjados bolonada, para asumir los pequeños quiebros en la alineación inclinada del tirante en cada planta.

La colocación de tirantes exteriores planta a planta supuso el replanteo *in situ* y el corte de tirantes con las longituds reals en cada caso. Para absorber las pequeñas tolerancias de longitud, las propias tuercas superior e inferior de los terminales en horquilla y orejeta permitían una holgura de +/- 5 cm.

sion studs could be absorbed in the following way:

Firstly, the upper studs, linked to the upper suspension structure, were put in place. At the same time, the stud of the deck immediately below was put in place with a degree of free play in the positioning since 40-mm sheaths were left so that M16 bolts could later be screwed in. This free play made it possible to move the rear and front links to ensure that the end of the brace remained in the same vertical plane as the end of the stud above.

This process of putting the external deck studs in place was repetitive and, if a serious error had occurred in the positioning of the sheaths to take the bolts to connect the studs, all that would have been required would have been to make new perforations in the deck in the correct position to ensure the alignment of the braces in the vertical plane.

Once the vertical plane through which the braces were to pass had been guaranteed, a bolted joint between the braces and the deck studs was designed in order to deal with the minor misalignments in the inclination of the brace on each floor.

The floor-by-floor positioning of the exterior braces called for the placement and the cutting of each of the braces to their real size in situ. In order to absorb the small tolerances in length, the upper and lower nuts of the hairpin and wing endings allowed free-play of +/- 5 cm.

3. PENJADA INTERIOR DE L'EDIFICI

3.1. Penjada interior dels sectors II i III

Tal com ja s'ha descrit, els voladissos interiors dels forjats dels sectors II i III, des del pilar interior fins al voladís, es penjen per mitjà de 19 tirants interior a cada costat, equidistants a 3,6 m.

Aquests tirants són perfils metàl·lics HEM 200 i es connecten als forjats de formigó per mitjà de l'ús d'uns "traversers metàl·lics" (fig. 14), perfils HEM 120, que transfereixen la reacció del forjat al tirant fent-les treballar a flexió, i tallant. Els petits moments flectors locals que els tirants filtren del forjat són transmesos mitjançant el mecanisme d'un parell de forces entre els braços dels transversers.

La junció entre tirants es realitza mitjançant unions amb tapajunts d'ales i d'ànima, fent en obra unions soldades en angle treballant a rasant, menys compromeses i més fàcilment controlables que no pas les soldadures a límit en elements traccionats (fig. 14).

La decisió de realitzar la junció per mitjà de tapajunts a mitja planta està justificada, ja que els moments flectors que apareixen en els tirants canvien de signe entre un forjat i el següent, amb el punt de moment nul al centre, deixant la unió sotmesa sols a esforços axials.

La necessitat d'utilitzar perfils HEM en els tirants exteriors es deu al fet que aquests són els perfils que proporcionen una àrea més gran per a unes dimensions exteriors més reduïdes, exigència obligada en el nostre cas per qüestions arquitectòniques.

L'ús del mateix perfil en tota l'altura de l'edifici podria fer pensar en un dimensionament

3. CUELQUE INTERIOR DEL EDIFICIO

3.1. Cuelgue interior de los sectores II y III

Tal y como ya se ha descrito, los voladizos interiores de los forjados de los sectores II y III, desde el pilar interior hasta el voladizo, se cuelgan mediante 19 tirantes interiores en cada lado, equidistantes a 3,6 m.

Estos tirantes son perfiles metálicos HEM 200, y se conectan a los forjados de hormigón mediante el empleo de unas "cruceas metálicas" (fig. 14), perfiles HEM 120, que transfieren la reacción del forjado al tirante haciéndolas trabajar a flexión, y cortante. Los pequeños momentos flectores locales que los tirantes filtran del forjado son transmitidos mediante el mecanismo de un par de fuerzas entre los brazos de las cruceas.

El empalme entre tirantes se realiza mediante uniones con cubrejuntas de alas y de alma, realizando en obra uniones soldadas en ángulo trabajando a rasante, menos comprometidas y más fácilmente controlables que las soldaduras a tope en elementos traccionados (fig. 14).

La decisión de realizar el empalme mediante cubrejuntas a media planta está justificada ya que los momentos flectores que aparecen en los tirantes cambian de signo entre un forjado y el siguiente, con el punto de momento nulo en el centro, dejando la unión sometida sólo a esfuerzos axiales.

La necesidad de emplear perfiles HEM en los tirantes interiores, se debe a que estos son los perfiles que proporcionan mayor área para unas dimensiones exteriores más reducidas, exigencia obligada en nuestro caso por cuestiones arquitectónicas.

3. INTERNAL SUSPENSION OF THE BUILDING

3.1. Internal suspension of sectors II and III

As has already been described, the internal cantilevers of the decks in sectors II and III, from the inner column to the cantilever, are suspended by means of 19 internal braces set 3.6 m apart on each side.

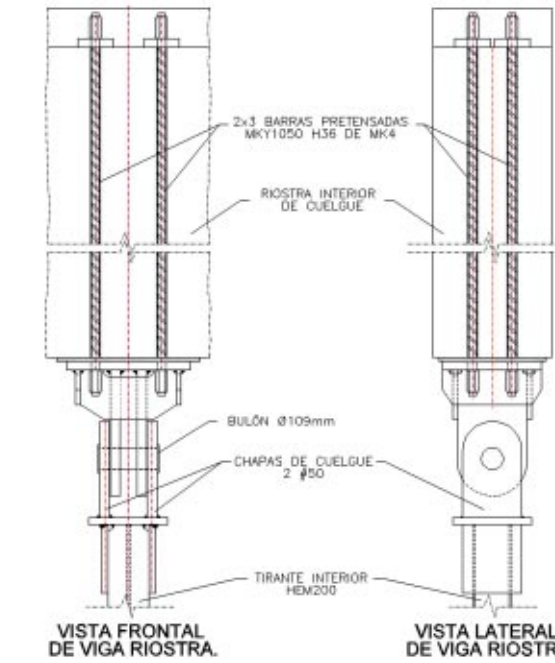
These braces are HEM 200 metal girders and are linked to the concrete decks by 'metal crosspieces' (fig. 14), HEM 120 girders, which transfer the reaction of the deck to the brace by making the crosspieces work by flexion, and shear. The minor local bending moments that the braces transfer from the deck are channelled between the arms of the crosspieces by a torque mechanism.

The braces are connected using butt jointing of the flanges and vertical legs, with angled, welded joints being done on site at ground level, which was less involved and easier to control than butt welding on elements under traction (fig. 14).

The decision to use butt joints at half floor height is justified since the bending moments that appear in the braces change direction from one deck to the next, with the point of zero moment at the centre, leaving the joint subject only to axis stresses.

The need to use HEM girders for the internal braces is due to the fact that these girders offer more area for smaller external dimensions, an essential requirement in our case for architectural reasons.

The use of the same girder throughout the entire height of the building may imply that the size was not optimised. However, this is not the case.



15. Enganxada de tirants interiors de sectors II i III a bigues de penjada i riostras interiors.

15. Enganche de tirantes interiores de sectores II y III, a vigas de cuelque y riostras interiores.

15. The internal braces of sectors II and III coupled to the internal suspension beams and struts.

poc optimitzat. Tanmateix no és així. Tot i que en la fase d'edifici penjat, el tirant duu menys càrrega de tracció a les plantes baixes i més en les altes, durant les fases constructives amb l'edifici apuntalat passa el contrari, amb les plantes baixes treballant a majors esforços de compressió que les altes.

Així, en les fases constructives la màxima compressió que duu cada tirant és de 1.500 kN en ELU, produïda pel pes propi dels forjats, més una certa sobrecàrrega de treball. Mentre que la màxima tracció d'un tirant amb l'edifici acabat és de 2.100 kN també en ELU, produïda pels pesos propis de forjats, càrregues mortes i sobrecàrregues d'ús.

L'argument definitiu per no reduir la secció del tirant per planta va ser la necessitat de donar rigidesa al tirant davant l'elongabilitat axial. Com que es tracta d'un edifici penjat interiorment amb tirants d'acer estructural més flexibles que els pilars i les pantalles de formigó, cal evitar l'acumulació de deformacions diferencials excessives entre els tirants i els pilars adjacents que puguin produir problemes de fissuraments als envans i tancaments de l'edifici.

L'enganxada superior dels tirants a l'estructura superior de penjada es realitza mitjançant una articulació bolonada de l'extrem del tirant a una peça metàl·lica, que es fixa mitjançant una base pretensada a les bigues superiors de penjada i a les riostras interiors (fig. 15).

El boló que articula les dues xapes de 50 mm de gruix és de 109 mm de diàmetre d'acer de 460 N/mm² de límit elàstic, i la base superior

El empleo del mismo perfil en toda la altura del edificio podría hacer pensar en un dimensionamiento poco optimizado. Sin embargo no es así. Aunque en la fase de edificio colgado, el tirante lleva menos carga de tracción en las plantas bajas y más en las altas, durante las fases constructivas con el edificio apeado sucede lo contrario, con las plantas bajas trabajando a mayores esfuerzos de compresión que las altas.

Así, en las fases constructivas la máxima compresión que lleva cada tirante es de 1.500 kN en ELU, producida por el peso propio de los forjados, más una cierta sobrecarga de trabajo. Mientras que la máxima tracción de un tirante con el edificio concluido es de 2.100 kN también en ELU, producida por los pesos propios de forjados, cargas muertas y sobrecargas de uso.

El argumento definitivo para no reducir la sección del tirante por planta fue la necesidad de dar rigidez al tirante frente a la elongabilidad axial. Al tratarse de un edificio colgado interiormente con tirantes de acero estructural más flexibles que los pilares y pantallas de hormigón, hay que evitar la acumulación de deformaciones diferenciales excesivas entre los tirantes y los pilares adyacentes que puedan producir problemas de fisuraciones en las tabiquerías y cerramientos del edificio.

El enganche superior de los tirantes a la estructura superior de cuelque se realiza mediante una articulación bolonada del extremo del tirante a una pieza metálica, que se fija mediante una basa pretensada a las vigas superiores de cuelque y a las riostras interiores (fig. 15).

Even though the brace bore less traction load on the lower floors and more on the upper floors during the suspended building phase, during the construction phases when the building was propped up, the opposite occurred, with the lower floors operating under greater compression stresses than the upper floors.

Thus, during the construction phases, the maximum compression borne by each brace was 1,500 kN in ULS, produced by the weight of the decks, plus a certain working overload, whereas the maximum traction on a brace in the completed building is 2,100 kN, again in ULS, produced by the weight of the decks, the dead loads and use overloads.

The final argument for not reducing the section of the braces on each floor was the need to make them rigid to oppose axis stretch. Given that this is a building suspended internally using braces made of structural steel, which are more flexible than columns and concrete screens, there was a need to avoid the accumulation of excessive differential distortions between neighbouring braces and columns that could give rise to the problem of cracks appearing in the building's partition walls and foundations.

The braces are connected to the upper suspension structure by means of a bolt linking one end of the brace to a metal piece fixed by means of a pre-stressed base to the upper suspension beams and the internal struts (fig. 15).

The bolt linking the two 50-mm-thick plates is 109 mm in diameter and made of steel with an elastic limit of N/mm², and the upper base is fixed



14. Detall de transversers en tirants interiors i unions de tirants interiors de sectors II i III amb tapajunts.

14. Detalle de cruceas en tirantes interiores y uniones de tirantes interiores de sectores II y III con cubrejuntas.

14. Detail of crosspieces in internal braces and joints of internal braces in sectors II and III with butt joints.

es fixa a les bigues i riostes interiors per mitjà de quatre barres pretesades tipus MKY 1050, de mètrica H36, deixant la unió permanentment comprimida.

3.2. Penjada interior del sector I

Tal com s'ha descrit, l'interior de les àmplies zones de forjats del sector I es penja mitjançant dues famílies de tirants (fig. 16), així els dos grans tirants centrals HEM 300 en acer S-355 parteixen els 21,4 m de llum transversal en tres obertures de 7,2 m i disten 6,05 m de les pantalles centrals.

Els voladissos interiors de les plantes 1, 3, 5 i 8 se sustenten mitjançant tres tirants verticals metàl·lics d'acer de 460 N/mm² de límit elàstic i 76 mm de diàmetre, tot articulant-se planta a planta, mitjançant la junció amb uns pius metàl·lics que s'enganxen per mitjà d'una base frontal al forjat, a la qual es cargola una sèrie de barres deixades prèviament embotides a la llosa.

Per fer la unió dels tirants HEM 300 del sector I als forjats, es fa servir la mateixa solució que amb els tirants HEM 200 dels sectors II i III mitjançant travessers metàl·lics, i la junció entre diferents trams de tirant es realitza amb tapa-junts d'ales de la mateixa manera.

Durant el procés constructiu, els dos tirants centrals treballen a compressió per tal com estan apuntalats fins als fonaments, amb una com-

El bulón que articula las dos chapas de 50 mm de espesor es de 109 mm de diámetro en acero de 460 N/mm² de límite elástico, y la base superior se fija a las vigas y riostras interiores mediante cuatro barras pretensadas tipo MKY 1050, de métrica H36, dejando la unión permanentemente comprimida.

3.2. Cuelgue interior del sector I

Tal y como se ha descrito, el interior de las amplias zonas de forjados del sector I se cuelga mediante dos familias de tirantes (fig. 16), así los dos grandes tirantes centrales HEM 300 en acero S-355, parten los 21,4 m de luz transversal en tres vanos de 7,2 m y distan 6,05 m de las pantallas centrales.

Los voladizos interiores de las plantas 1, 3, 5 y 8, se sustentan mediante tres tirantes verticales metálicos de acero de 460 N/mm² de límite elástico y 76 mm de diámetro, articulándose planta a planta, mediante el empalme con unos tetones metálicos que se enganchan por medio de una basa frontal al forjado, a la que se atornillan una serie de barras dejadas previamente embebidas en la losa.

Para realizar la unión de los tirantes HEM 300 del sector I a los forjados, se emplea la misma solución que con los tirantes HEM 200 de los sectores II y III mediante crucetas metálicas, y el empalme entre diferentes tramos de tirante se

to the internal beams and struts by means of four pre-stressed MKY 1050 rods that are H36 in diameter, leaving the joint permanently compressed.

3.2. Internal suspension of sector I

As has been described, the interior of the large deck areas of sector I are suspended by means of two groups of braces (fig. 16), thus the two large central HEM 300 girders in S-355 steel divide the 21.4 m of the transverse span into three bays of 7.2 m and are 6.05 m from the central screens.

The internal cantilevers on the first, third, fifth and eighth floors are supported by three vertical steel girders with an elastic limit of 460 N/mm² and a diameter of 76 mm, linking floor by floor with metal studs joined together by means of a frontal base to the deck, to which a series of rods previously embedded in the slab are bolted.

In order to join the HEM 300 braces of sector I to the decks, the same solution as that employed with the HEM 200 braces in sectors II and three, using metal crosspieces, was adopted. The various stretches of braces were also connected together using flange and vertical leg butt joints.

During the construction process, the two central braces worked by means of compression since they were propped from the foundations, with a maximum compression of 3,000 kN in ULS

pressió màxima en ELU de 3.000 kN per tirant, mentre que amb l'edifici penjat la màxima reacció que ha de resistir cada tirant és de 7.500 kN també en ELU.

Tal com passava amb els tirants dels sectors I i III, aquests tirants tenen secció constant en tota l'altura ja que treballen a compressió durant el procés constructiu, amb esforços superiors a les plantes inferiors, i estan sotmesos a elevades traccions amb l'edifici en servei, creixents amb l'altura.

realiza con cubrejuntas de alas y de alma de la misma manera.

Durante el proceso constructivo los dos tirantes centrales trabajan a compresión al estar apeados hasta la cimentación, con una compresión máxima en ELU de 3.000 kN por tirante, mientras que con el edificio colgado la máxima reacción que debe resistir cada tirante es de 7.500 kN también en ELU.

Como ocurría con los tirantes de los sectores II y III, estos tirantes tienen sección constante en toda la altura al trabajar a compresión durante el proceso constructivo, con esfuerzos superiores en las plantas inferiores, y al estar sometidos a elevadas tracciones con el edificio en servicio, crecientes con la altura.

per brace. With the building suspended, the maximum reaction that each brace must withstand is 7,500 kN in ULS.

As occurred with the braces in sectors II and III, these braces have a constant section throughout the entire height since they worked by compression during the construction process, with greater stresses on the lower floors, and since, now that the building is in service, they are subjected to considerable levels of traction, which increase as the floors rise.

4. ESTRUCTURA SUPERIOR DE PENJADA

Com s'ha descrit, l'edifici està penjat exteriorment mitjançant 69 tirants inclinats articulats planta a planta, que s'enganxen a l'estructura superior de penjada per mitjà de l'articulació als pius superiors de penjada.

La penjada interior es resol mitjançant l'alineació de tirants interiors HEM 200 en els sectors II i III, i mitjançant les dues famílies de tirants del sector I, els dos grans HEM 300 i els tres tirants de 6 mm de diàmetre.

4. ESTRUCTURA SUPERIOR DE CUELGUE

Como se ha descrito, el edificio está colgado exteriormente mediante 69 tirantes inclinados articulados planta a planta, que se enganchan a la estructura superior de cuelgue mediante la articulación a los tetones superiores de cuelgue.

El cuelgue interior se resuelve mediante la alineación de tirantes interiores HEM 200 en los sectores II y III, y mediante las dos familias de tirantes del sector I, los dos grandes HEM 300, y los tres tirantes de 76 mm de diámetro.

4. UPPER SUSPENSION STRUCTURE

As has been described, the building is suspended externally by means of 69 inclined braces linked floor by floor that are also coupled to the upper suspension studs.

The internal suspension is resolved by means of the alignment of internal HEM 200 braces in sectors II and III and by means of the two groups of braces in sector I, the two large HEM 300s and the three braces that are 76 mm in diameter.



16. Interior del sector I penjat amb dos HEM 300 i tres tirants de 76 mm de diàmetre.

16. Interior del sector I colgado con dos HEM 300 y tres tirantes de 76 mm de diámetro.

16. Interior of sector I suspended with two HEM 300s and three braces that are 76 mm in diameter.



17. Vista de l'estructura superior de penjada: bigues principals, riostra interior i doble riostra exterior.

17. Vista de la estructura superior de cuelgue: vigas principales, riostra interior y doble riostra exterior.

17. View of the upper suspension structure: main beams, internal strut and double external strut.

Tant els tirants exteriors com els interiors dels sectors II i III es disposen cada 3,6 m, enfrontant-se als pòrtics de pantalles i pilars, disposats cada 7,2 m i partint la llum en dos.

Els tirants alineats amb els pòrtics s'enganchen directament a les bigues principals de penjada, mentre que els intermedis ho fan a la riostra interior i a la doble riostra exterior (fig. 17).

4.1. Bigues principals de penjada

Cada 7,2 m es disposa una biga de penjada de formigó pretensat HP-40, de 40 m de cantell per 0,6 m d'ample, de la qual pengen els tirants exteriors subjectes mitjançant els pius superiors de penjada i els tirants interiors mitjançant la junció amb barres pretensades.

Aquestes bigues s'encasten a les pantalles centrals i als pilars exteriors, amb un vol interior de 7,35 m i un vol variable per als exteriors (fig. 18).

Les bigues es pretesen mitjançant l'ús de 4 unitats de pretensat de 24 cordons de 0,6".

4.2. Riostrs interiors i doble riostra exterior

Per riostrar l'interior de les bigues principals de penjada dels sectors II i III, i per recollir els tirants interiors intermedis situats entre els pòrtics principals, es disposen les riostrs interiors, que són unes bigues de formigó armat HA-30 de cantell variable entre 2 i 4,66 m, i 0,6 m d'ample, que segueixen el pendent de la coberta. Aquestes bigues treballen a flexió positiva duent la càrrega dels tirants intermedis a les bigues de penjada (fig. 19).

Tanto los tirantes exteriores como los interiores de los sectores II y III, se disponen cada 3,6 m, enfrentándose a los pórticos de pantallas y pilares, dispuestos cada 7,2 m y partiendo la luz en dos.

Los tirantes alineados con los pórticos se enganchan directamente a las vigas principales de cuelgue, mientras que los intermedios lo hacen a la riostra interior y a la doble riostra exterior (fig. 17).

4.1. Vigas principales de cuelgue

Cada 7,2 m se dispone una viga de cuelgue de hormigón pretensado HP-40, de 4 m de canto por 0,6 m de ancho, de la que cuelgan los tirantes exteriores sujetos mediante los tetones superiores de cuelgue y los tirantes interiores mediante el empalme con barras pretensadas.

Estas vigas se empotran en las pantallas centrales y en los pilares exteriores, con un vuelo interior de 7,35 m y un vuelo variable para los exteriores (fig. 18).

Las vigas se pretensan mediante el empleo de 4 unidades de pretensado de 24 torones de 0,6".

4.2. Riostras interiores y doble riostra exterior

Para arriostrar el interior de las vigas principales de cuelgue de los sectores II y III, y para recoger los tirantes interiores intermedios situados entre los pórticos principales se disponen las riostras interiores, que son unas vigas de hormigón armado HA-30 de canto variable entre 2 m y 4,66 m, y 0,6 m de ancho, que siguen la penden-

The external braces and the internal braces in sectors II and III are arranged every 3.6 m, in contrast with the screen porticos and columns, which are arranged every 7.2 m and divide the span in two.

The braces aligned with the porticos are directly linked to the main suspension beams, whereas the intermediate braces are connected to the internal strut and the double external strut (fig. 17).

4.1. Main suspension beam

Every 7.2 m, there is a pre-stressed HP-40 concrete beam measuring 4 m thick and 0.6 m wide, from which hang the external braces held in place by the upper suspension studs and the internal braces by the connection to pre-stressed rods.

These beams are embedded in the central screens and the outer columns, with an inner projection of 7.35 m and a variable projection outwards (fig. 18).

The beams are pre-stressed by means of the use of four pre-stressed units with 24 strands of 0.6".

4.2. Internal struts and double external strut

Internal struts are employed to brace the interior of the main suspension beams in sectors II and III and to take up the intermediate inner braces situated between the main porticos. These internal struts are reinforced HA-30 concrete beams of variable thickness ranging from 2 m to 4.66 m and are 0.6 m wide. They follow the slope of the deck and act by positive bending, channelling the



19. Riostra interior. 19. Riostra interior. 19. Inner strut.
20. Doble riostra exterior. 20. Doble riostra exterior. 20. Double external strut.

De manera similar al que s'esdevé amb els tirants interiors, per poder recollir els tirants exteriors disposats entre les bigues de penjada es disposa una doble biga riostra de formigó que permeti transmetre aquests esforços a les bigues principals i serveixi de corona exterior de riostrament de totes les bigues de penjada.

La riostra exterior és una doble biga de formigó armat de cantell variable que segueix perimetralment el pendent de la coberta, en HA-30, amb 0,5 m de gruix cada una d'elles.

Es projecten dues bigues per poder mantenir el mateix detall de piu superior, que davant el tir genera un parell que comprimeix el suport del davant i tracciona el del darrere, alhora que s'eviten les torsions en seccions rectangulars de poca amplada. Amb aquesta tipologia, la biga riostra més exterior treballarà amb càrregues verticals descendents i flectors positius en el centre de cada obertura, mentre que la més interna ho farà amb càrregues verticals ascendents i amb flectors negatius en el centre de l'obertura (fig. 20).

te de la cubierta. Estas vigas trabajan a flexión positiva llevando la carga de los tirantes intermedios a las vigas de cuelgue (fig. 19).

De forma similar a lo que ocurre con los tirantes interiores, para poder recoger los tirantes exteriores dispuestos entre las vigas de cuelgue se dispone una doble viga riostra de hormigón que permita transmitir estos esfuerzos a las vigas principales y sirva de corona exterior de arriostramiento de todas las vigas de cuelgue.

La riostra exterior es una doble viga de hormigón armado de canto variable que sigue perimetralmente la pendiente de la cubierta, en HA-30, con 0,5 m de espesor cada una de ellas.

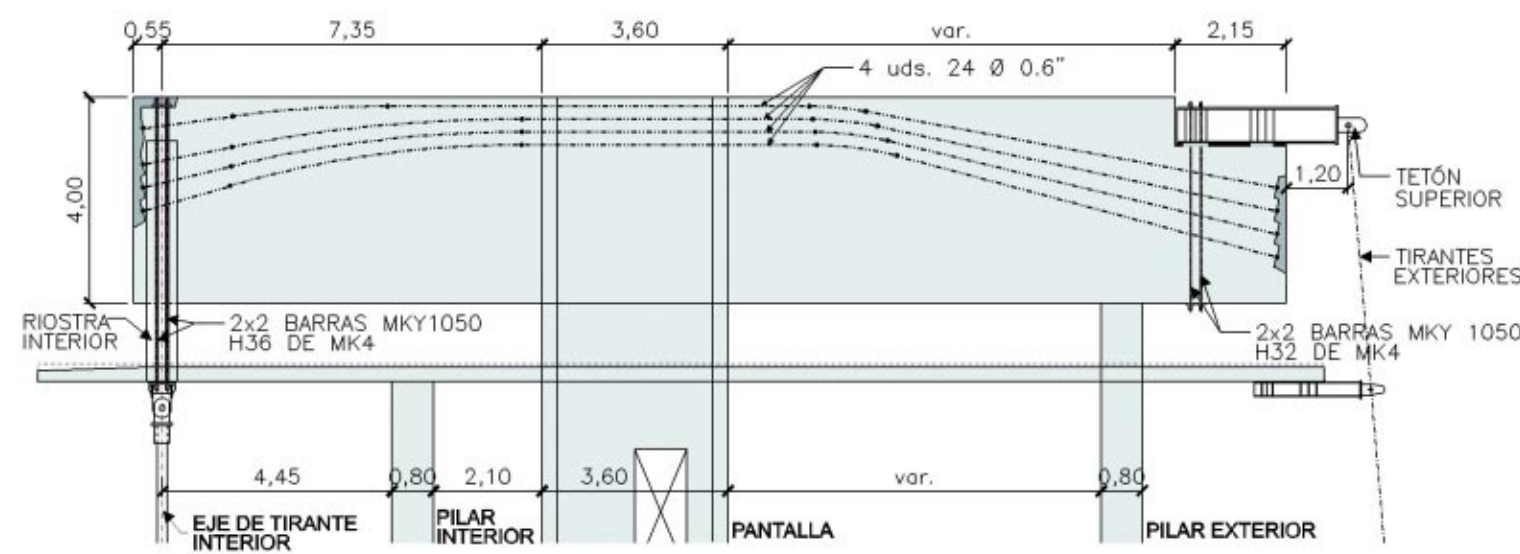
Se proyectan dos vigas para poder mantener el mismo detalle de tetón superior, que frente al tiro genera un par que comprime el apoyo delantero y tracciona el trasero, al mismo tiempo que se evitan las torsiones en secciones rectangulares de poco ancho. Con esta tipología, la viga riostra más exterior trabajará con cargas verticales descendentes y flectores positivos en el centro de cada vano, mientras que la más interna lo hará con cargas verticales ascendentes y con flectores negativos en el centro del vano (fig. 20).

load from the intermediate braces to the suspension beams (fig. 19).

In order to take up the external braces positioned between the suspension beams, a similar approach is adopted to that employed with the inner braces, as a concrete double tie beam is used to channel these stresses to the main beams and serves as an external header crown for all the suspension beams.

The external strut is a double reinforced HA-30 concrete beam of variable thickness that follows the slope of the deck around the edge, each of which is 0.5 m thick.

Two beams were included in the design in order to keep the same detail of an upper stud, which, in response to the pull, generates a torque that compresses the front support and pulls on the rear support, while at the same time preventing twisting in the thin rectangular girders. With this approach, the tie beam furthest to the outside acts with descending vertical loads and positive bending at the centre of each span, whereas the tie beam closest to the inside acts with ascending vertical loads and with negative bending at the centre of the span (fig. 20).



18. Detall d'una biga principal de penjada postesada. 18. Detalle de una viga principal de cuelgue postesada. 18. Detail of a post-stressed main suspension beam.