

La coberta del Palau d'Esports Sant Jordi. Tipologia i procés constructiu

Julio Martínez Calzón

DR. ENGINYER DE CAMINS, CANALS I PORTS
DIRECTOR D'OBRA I CONSULTOR DEL PROJECTE

Entre els dies 21 de novembre i 1 de desembre de 1988 s'executà amb èxit l'aixecament d'una estructura de 128 x 106 m en planta i de gairebé 1.000 t que ha de servir de coberta al Palau d'Esports Sant Jordi de Barcelona.

Dins el conjunt d'elements constructius que engloba el Palau d'Esports Sant Jordi, l'estructura de la coberta principal presenta una importància destacada, no sols per la forma especial i les grans dimensions que té, sinó per la singularitat del mètode emprat en la seva construcció. Aquest article exposa de manera detallada les principals característiques tipològiques de la coberta, la interacció que hi ha entre el disseny i el procés constructiu previst i la realització d'aquest últim, basat en el mètode general anomenat PANTADOME.

En un element estructural de les dimensions de la coberta del Palau d'Esports Sant Jordi (128 x 106 m lliures), el disseny arquitectònic i la seva realització estructural responen a un profund procés dialèctic que posa en joc factors molt diferents¹.

S'hi copsa que la **forma** de la coberta és el resultat d'incorporar a una idea primera, bàsica -que consisteix a assolir una referència ideal amb la muntanya de Montjuïc mitjançant un element cupular d'una certa irregularitat-, el tractament espacial necessari per a cobrir una planta aproximadament rectangular i l'adequat acoblament amb un mètode de construcció basat en l'elevació des de terra mateix de, quasi bé, la totalitat de l'estructura de la coberta ja muntada, mitjançant un sistema de ròtules: torres i gats.

Constitució híbrida

L'**estructura** triada per a la coberta consisteix en una malla espacial de doble capa de 2,4 m de gruix i de constitució híbrida², és a dir, que la solució prové de la inserció de grans peces soldades que formen una estructura base o primària, que divideix el conjunt en diverses zones cobertes mit-

jançant subestructures del tipus de malles espacials comunes, formades amb nusos esfèrics i barres tubulars collades, que es connecten adequadament amb les peces principals.

Aquesta tipologia estructural ofereix grans possibilitats, ja que permet, de la manera millor, dur a terme solucions les formes de les quals, en conjunt, se separen notablement de les corresponents a un treball membrana. Canalitzant les línies de força fonamentals a través de grans elements singulars, es poden establir zones parcials delimitades per aquests, a les quals predominin, precisament, les accions directes de tipus membrana. Així s'aconsegueix, de manera molt activa i interessant, una correspondència intensa entre la forma arquitectònica triada i un treball estructural actiu i eficaç.

En el pla del **procés** constructiu, la presència dels elements singulars permet així mateix d'establir esquemes i procediments molt més favorables ja que es poden aprofitar, de maneres molt diverses, les capacitats inicials aïllades o combinades dels elements singulars.

D'aquesta manera, la conjugació entre la forma, l'estructura i el



JULIO MARTÍNEZ CALZÓN

Cúpula muntada sobre la pista de joc, només recolzada en el seu entorn. Més endavant se li incorporaven les peces de coberta intermèdia ("sectors") i l'acabament.



JULIO MARTÍNEZ CALZÓN

Nus de malla típic

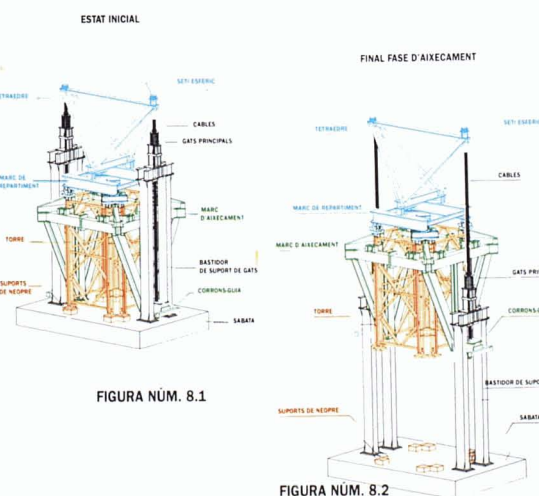


FIGURA NÚM. 8.1

FIGURA NÚM. 8.2

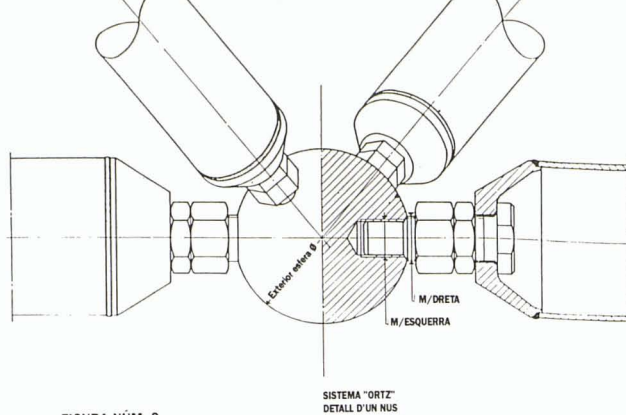
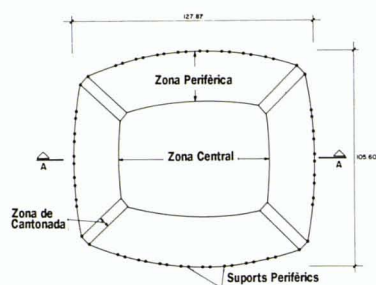


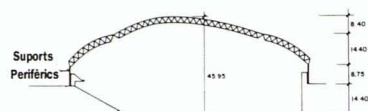
FIGURA NÚM. 9

Muntatge dels "sectors", construïts fora del recinte; ahora continuen les tasques





PLANTA DE COBERTA



SECCIÓ A-A

FIGURA NÚM. 1

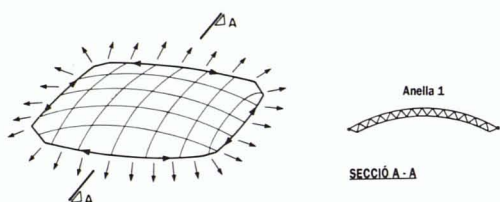


FIGURA NÚM. 2

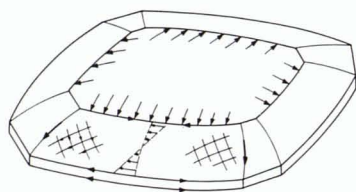


FIGURA NÚM. 3

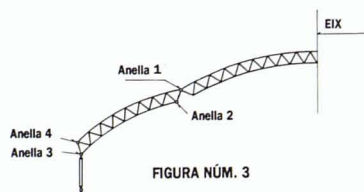


FIGURA NÚM. 4

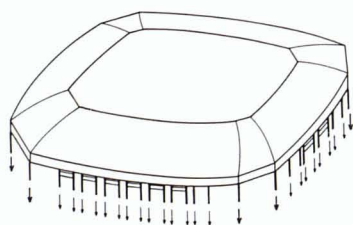


FIGURA NÚM. 5

procés constructiu de la coberta del Palau Sant Jordi s'aconsegueix mitjançant la subdivisió del conjunt en les parts següents (fig. 1):

- Una zona central de 73 x 50m, en forma de cúpula rebaixada (1/12) asimètrica longitudinalment, amb un perímetre en forma de rectangle de costats curvilinis, que reflecteix pràcticament la forma de la pista de l'àrea de joc.

- Una zona perifèrica de tipus toroidal, que s'estén, amb una amplària lleugerament variable, de 26 i 29 m, entre la vora de la cúpula central i el contorn exterior de les grades, que forma també la figura d'un rectangle curvilini.

- Quatre zones de cantonada, de planta pràcticament rectangular, que connecten els corresponents xamfrans que hi ha als angles dels dos rectangles curvilinis esmentats.

- Un conjunt de suports perimetrals pendulars, uniformement distribuïts de cap a cap de la vora exterior de la coberta, completats amb parelles addicionals als xamfrans de les quatre cantonades.

El treball estructural d'aquest conjunt d'elements pot ser visualitzat senzillament mitjançant la combinació de dos simples mecanismes resistents, en els quals s'aprecia clarament el treball diferenciat entre les zones de subestructures i les peces principals:

1) Les forces aplicades a la zona central aïllada hi determinen un treball de tipus membranal reaccionant sobre la seva anella de vora -peça singular- constituïda per un gran tub soldat de diàmetre 406 x 20 mm. Aquesta anella, anomenada núm.1, fortament traccionada per l'acció de la zona central (fig. 2), s'incorpora també al mecanisme següent.

2) La zona de contorn rep, al seu cordó superior, anella núm.1, les accions directes de la zona

central, reaccionant de manera aproximada a com ho faria un conjunt de quatre grans bigues de molt gruix sol·licitades al seu pla (fig.3); donant lloc a grans traccions al perímetre exterior -peça singular composta per dos grans tubs disposats paral·lelament (anelles núms.3 i 4) de dimensions $\varnothing 508 \times 25\text{mm}$ - i també ocasionant importants compressions a l'anella núm.1 i alhora grans compressions a les diagonals singulars de cantonada, que reben l'equivalent a les resultants de tallant de les bigues referides.

L'anella interior (núm. 1) queda en conjunt comprimida, atesa la importància més gran del segon mecanisme respecte del primer. La compatibilitat global del conjunt reajusta, de la mateixa manera, la membrana de la cúpula central transferint adequadament els esforços entre tots els elements singulars que actuen en el segon mecanisme.

Els sistemes resistents bàsics descrits es completen, naturalment, amb treballs complementaris de les malles de la zona perifèrica, que transfereixen directament una part de les càrregues que reben cap als suports pròxims. Per consegüent, el resultat global determina una marcada transferència de reaccions a través dels suports de cantonada i càrregues de caràcter molt homogeni a la resta dels suports del perímetre exterior (fig.4); reaccions que són sempre pràcticament verticals, atès el caràcter de pèndol dels esmentats suports, articulats a la base i a la coronació.

La rigidesa interna de la coberta espacial permet de resisitir també a les accions horitzontals sísmiques i del vent, mitjançant mecanismes similars als anteriors. Adoptant un doble joc de pòrtics perifèrics a les quatre bandes del perímetre exterior, quan s'uneixen a la coronació parelles de suports mitjançant dintells units rigidament a aquells en direcció perifèrica (fig.5), s'aconsegueix transferir les resultants d'aquestes accions fins a la sustentació inferior de l'estructura.

El sistema PANTADOME

Les condicions geomètriques degudament adoptades per a l'estructura, la presència de les peces principals i el fet que els pòrtics, des del seu muntatge inicial, poden contribuir a les components de forces horitzontals, són els conceptes bàsics del **sistema de muntatge PANTADOME**, ideat pel professor **Mamoru Kawaguchi**, consultor d'**Arata Isozaki** en aquesta obra. En descrivim seguidament les línies generals:

a) La zona central de la coberta s'arma en la seva totalitat en la posició més pròxima possible a terra, incorporant-hi en aquesta situació tots els materials de cobertura i acabats, com també les instal·lacions, les passarel·les, els accessos, etc., que se situen a la coberta o que en van penjats, en la seva posició definitiva (fig. 6).

b) De les zones laterals, se'n construeix exclusivament la part estructural i no totalment completa, sinó dividida en diversos sectors, separats per franges estretes obertes perpendiculars a les anelles limitadores d'aquesta zona.

La unió entre l'estructura central i els sectors perimetrals es fa mitjançant parelles de ròtules solidades a l'anella núm.1 i disposades en nusos frontals dels sectors esmentats.

c) Els suports perifèrics pendulars, aïllats o combinats en pòrtics per parelles, segons si pertanyen o no a un pòrtic contravent, es col·loquen prou inclinats cap a l'exterior del recinte, de manera que els sectors de la zona toroidal queden posicionats recolzant-hi, a través de les ròtules superiors dels suports i en les ròtules de l'anella núm.1.

El sistema format d'aquesta manera constitueix un mecanisme enfront de les accions verticals, mentre que enfront de les accions horitzontals, els pòrtics, combinats amb els sectors, ofereixen una capacitat de resistència molt elevada que permet de suportar els possibles embats sísmics i del vent.

Aquestes propietats del sistema permeten, mitjançant la col·locació d'un conjunt de gats sota la línia de malla contigua a l'anella núm.1, aixecar tota la coberta fins que assoleixi la forma de l'estructura final, passant per diverses fases que poden seguir-se a la figura núm.7, i que van des de la posició inicial, passant per una d'intermèdia de suports verticals fins a una altra de màxima dislocació amb els suports fortament inclinats cap enfora a l'instant que les ròtules números 1 i 2 se situen a la mateixa cota. A partir d'aquest moment, els suports comencen a retornar cap a la vertical fins que queden finalment amb una lleu inclinació cap endins.

En la posició final d'elevació es procedeix a fer la continuïtat de les anelles 2, 3 i 4, la fixació de les ròtules núm. 1 i el tancament o cosit de les franges entre sectors, instant en el qual es completa l'estructura i es pot procedir a la retirada gradual i progressiva dels gats, amb la qual cosa les accions sobre aquests s'incorporen com a càrregues a l'estructura completa. Finalment, la coberta i els acabats de les zones laterals culminen la realització de l'estructura.

Aquestes dues últimes fases de càrrega sobre l'estructura, hi provoquen deformacions elàstiques que situen els caps dels suports en la seva posició final vertical sota les accions permanents.

Aquest mètode constructiu presenta unes característiques singulars, no sols per la seva evolució sinó de tipus conceptual, que han de valorar-se molt positivament:

1) Les condicions necessàries per al moviment del conjunt en l'elevació exigeixen una alta qualitat de la realització geomètrica del sistema i unes toleràncies mínimes. És a dir, cal un control molt exacte de tots els paràmetres que incideixen en la construcció i l'acoblament: longitud de barres, geometria de nusos (diàmetres d'esferes, angles, alvè-

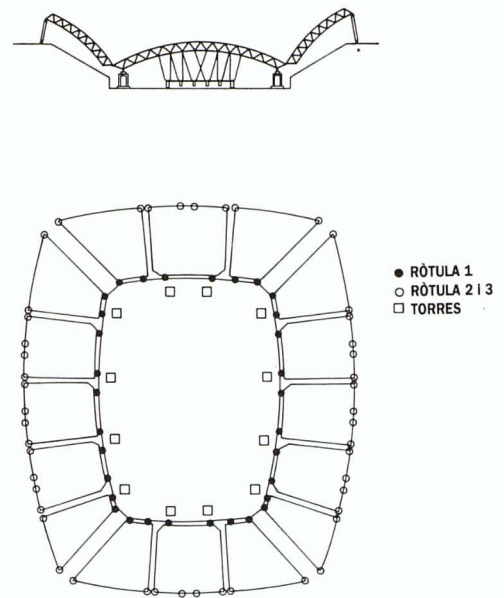


FIGURA NÚM. 6

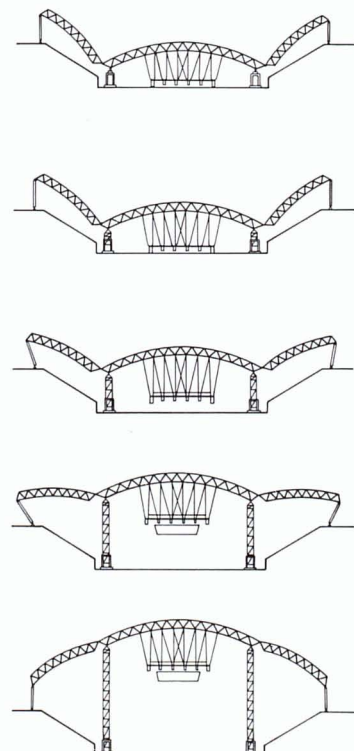


FIGURA NÚM. 7



JULIO MARTINEZ CALZÓN

Torre d'elevació abans i després de la maniobra d'aixecament.



JULIO MARTINEZ CALZÓN

Moviment basculant dels suports durant l'aixecament. Observeu-hi els dispositius de correcció i fixació antivent, lliures durant l'operació diària.



JULIO MARTINEZ CALZÓN



JULIO MARTINEZ CALZÓN

ols), perfecció a l'hora d'estrènyer els acoblaments successius; replantejos del conjunt i de les parts; perfecció en la posició i l'alineació dels eixos de ròtules i paral·lisme entre els corresponents a cada sector, etc. Tot plegat comporta de manera indirecta una gran qualitat pel que fa a la seguretat.

2) L'execució a terra redueix notablement les incidències d'accidents, els problemes de vent, la qualitat de les unions soldades, etc., a causa del recer que ofereix l'edifici.

3) La realització del desapuntament posa en càrrega la totalitat de l'estructura de manera gradual i amb un gran valor dels seus esforços, cosa que permet de determinar amb precisió -mitjançant un seguiment instrumental adequat- la resposta de l'estructura real respecte de la teòrica, i equival, en una certa manera, a una prova de càrrega controlada, cosa que permet de comprovar la idoneïtat de l'estructura o, en el cas contrari, actuar sobre els punts defectuosos que s'hi puguin detectar.

L'execució de l'estructura de coberta va ser treta a concurs i adjudicada, en litigi amb empreses japoneses i alemanyes, a l'agrupació temporal espanyola DRAGORONA, constituïda per Dragados y Construcciones, com a contractista general i realitzador del muntatge, de l'acoblament i de l'execució, i per Orona, com a empresa realitzadora dels elements estructurals de barres i esferes, realitzats segons el sistema patentat per ORTZ (fig. 9).

Anàlisi sistemàtica

La realització d'una estructura d'aquesta envergadura i amb la peculiaritat del sistema constructiu previst requereix, al seu torn, que els constructors tinguin una capacitat tècnica molt alta centrada bàsicament en els aspectes següents:

- Construcció d'elements amb alta automatització de la producció, atesa la irregular forma de

l'estructura que exigeix longitud de barres, d'angles i d'esferes completament diferents a tots els punts;

- Màxim control de qualitat a fi d'aconseguir l'acompliment de les toleràncies d'execució previstes;

- Anàlisi sistemàtica de tots els estats intermedis d'execució, motivats per l'especejament de muntatge, variacions de sustentació, adaptació de barres i nusos reals, etc., aplicables als diversos models de suport i d'evolució de l'estructura en el seu procés d'execució.

- Importants equips de disseny per a aconseguir una perfecta realització del sistema d'elevació i garantir que durant aquest procés les toleràncies de moviments entre punts de sustentació es mantinguin dins dels marges estrictes requerits;

- Instrumentació i control de seguiment de diferents paràmetres de moviments i deformacions per a mantenir la garantia de resposta de l'estructura en totes les seves fases intermèdies i finals.

Cal destacar, com a important alternativa del projecte d'aixecament presentat per DRAGORONA, la reducció del nombre de torres d'elevació, que passa de les 24 previstes al projecte a la meitat, mitjançant la disposició de balancons en la coronació de cada una de les torres, a fi de mantenir el nombre de suports del conjunt en 24, de manera que les reaccions locals no superin la capacitat de les barres de l'estructura prevista. Aquest fet va fer necessària la modificació del sistema previst de fonaments, com també nous càlculs de comprovació de l'estructura en els models d'elevació i finals, ja que les reaccions s'integren de manera diferent a les previstes en el projecte.

Procés d'aixecament

L'aixecament de la coberta s'executà entre els dies 21 de novembre i 1 de desembre de 1988. Es pujà un total de 28,63 m, corresponents a 9 mòduls tipus de torre i a un semimòdul.

Tot el pla de realitzacions, pel que feia a temps previstos, a personal, a operacions, a visites i controls, etc., fou rigorosament respectat.

El primer dia, només s'efectuaren proves d'endegament i control de tots els sistemes d'aparells, a fi de mantenir, a partir del segon dia, els ritmes d'un mòdul diari, susceptibles de duplicar-lo si de cas fos necessari i si les condicions ambientals n'haguessin retardat el procés en alguna de les seves fases. Només l'últim dia, durant el matí, s'experimentaren vents de 35 km/h, amb ràfegues molt sistemàtiques que assolien els 70 km/h, per la qual cosa, d'acord amb el plec de condicions de l'aixecament on s'indicava la suspensió de les operacions quan hi hagués vents superiors als 40 km/h, es va ajornar l'aixecament final fins a la tarda del mateix dia, un cop el vent havia amainat.

A la fi del segon dia, es va posar en càrrega la gran estructura de passarella de 60 x 22 m en planta i d'un pes aproximat de 83 t, incloent-hi les instal·lacions que van suspeses de la coberta per mitjà de cables i que havien d'aixecar-se juntament amb aquesta. Els controls de reaccions, moviments i deformacions van determinar amb total precisió els valors produïts per aquesta incorporació.

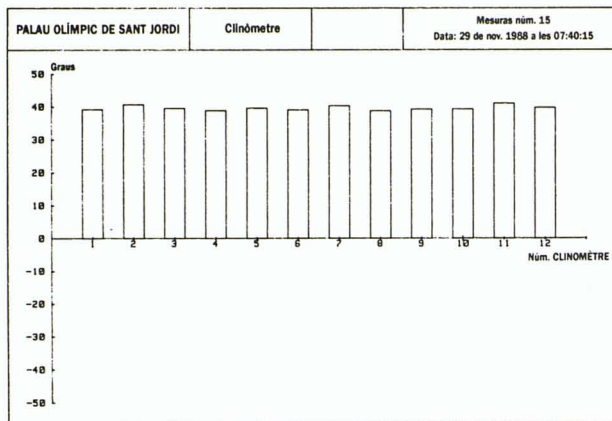
No s'hi va produir cap mena d'imprevistos durant el conjunt d'actuacions d'aixecament i es van complir totes les previsions. L'única incidència observada es produí en una de les ròtules núm 1, en la qual s'observà un lleuger fregament lateral entre el cos fix i el mòbil. Mitjançant un teodolit, es va comprovar que una de les dues volanderes de tefló que separaven tots dos cossos, s'havia després o no havia estat col·locada, per la qual cosa l'angulació en una de les fases màximes va provocar aquell lleuger fregament.

FITXA TÈCNICA GENERAL DE L'ESTRUCTURA DE LA COBERTA	
Arquitecte:	Arata Isozaki
Arquitecte col·laborador:	Juan Carlos Cardenal
Estructura:	Mamoru Kawaguchi
Enginyer col·laborador:	Julio Martínez Calzón
Direcció d'Obra:	
Julio Martínez Calzón	Enginyer de camins
Nil Lletjós Masó	Enginyer de camins
Naoki Inagawa	Arquitecte
Constructor	DRAGONORA
Gerent de l'agrupació	
Julio Peigneux	Enginyer de camins
Control	PAYMA
Propietat	Anella Olímpica de Montjuïc, SA
Característiques generals	
Dimensions:	127,87 x 105,60 m
Superfície:	13.462,6 m ²
Nombre total de nusos:	2.343
Nombre total de barres:	9.070
Pes total de l'estructura (sense suports):	966 t.

Vista de l'obra des de la façana nord després de l'aixecament.



JULIO MARTÍNEZ CALZÓN



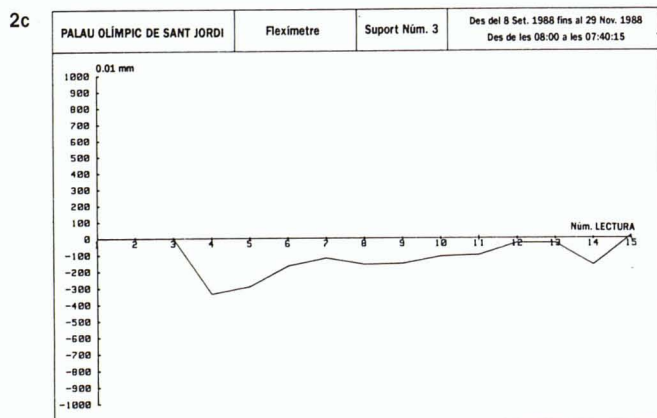
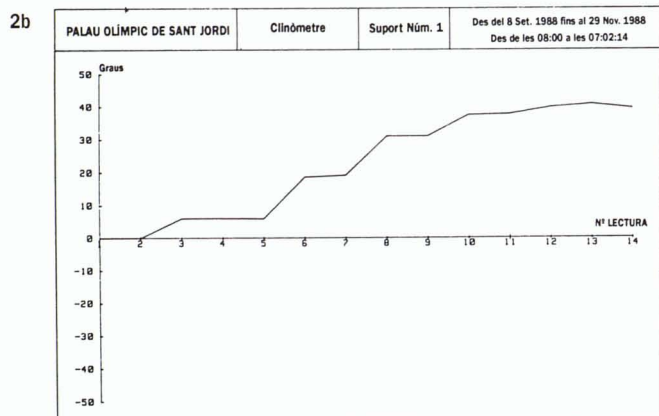
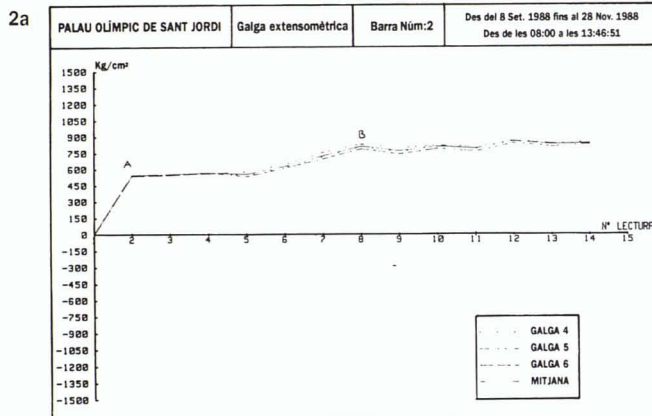
1.- Sortida gràfica de l'evolució de tensions d'una barra instrumentada, deduïdes a partir de deformacions. A representa el punt d'entrada en càrrega de la cúpula (fotografia 7a) i B l'entrada en càrrega de les passarelles penjades (fotografia 7b).

2.- Instrumentació de suports durant l'aixecament.

2a Evolució de girs a les fases intermèdies, d'un suport.

2b Situació de gir de tots els suports en un moment determinat.

2c Evolució de tensions, en un suport, per moviments horitzontals, fins a una base intermèdia de l'aixecament.



PARTS PRINCIPALS DEL PROJECTE GENERAL D'ELEVACIÓ

El projecte general d'elevació constà de les parts principals següents:

- A- Projecte de fonaments, per a les reaccions de 80 transmeses per cada torre aproximadament.
- B- Projecte de torres d'aixecament.
- C- Equips hidràulics i sistemes de control.
- D- Travament en fases d'elevació.
- E- Projecte d'instrumentació i control.
- F- Uns altres controls.

A. FONAMENTS

S'hi van realitzar sabates armades de dimensions tipus de 4,50 x 3 x 0,50 m a fi d'aconseguir repartiments mitjans de 0,9 t/m², admissibles a l'losa de la pista i també accions locals addicionals sobre les bigues riostra d'aquesta.

B. TORRES D'ELEVACIÓ

(fig. 8.1 i 8.2)

Aquest sistema, juntament amb els gats aixecadors, constitueixen la clau del procés constructiu. El sistema és compost de les unitats següents:

Fusts

Va ser dissenyat un tipus d'element de torre especial, format per quatre panells estàndards, tipus ACROW de 3 x 1,50 m, units mitjançant angulars de cantonad, i formant un quadrat en planta de 2 x 2 m, amb elements portants a les vuit cantonades dels caps dels panells.

Marc d'aixecament

Element mòbil que abraça el mòdul inferior de la torre amb pestells que encaixen amb aquest als vuit caps resistents.

Es completa amb dues peces en V verticals, les quals al seu vèrtex inferior reben l'ancoratge dels cables d'aixecament.

El marc s'aixeca arrossegant el conjunt de la torre fins a una alçària en la qual es pot introduir sota la torre el nou mòdul de 3 m d'alçària que s'uneix al tram anterior superior. Amb un lleuger descens del conjunt, la torre recolza sobre la sabata de fonaments, mitjançant uns suports de neoprè col·locats provisionalment a l'extrem inferior. Tot seguit, el marc d'elevació es fa baixar, mitjançant diferencials de cadena, fins a la posició inicial inferior, a fi d'iniciar-hi un nou cicle.

Bastidors de suport de gats

Són pòrtics estrets de 5 m d'alçària que suporten al dintell superior els gats, deixant passar els cables de suspensió pel seu interior. Mitjançant grues de corró revestides de neoprè, es pot regular el procés de guiatge vertical i horitzontal, cosa que permet els petits girs requerits des de la base de les torres.

Balanci

Sistema col·locat a la part superior de la torre, en forma de tetràedre, i que recolza sobre un marc de repartiment que transfereix a les cantonades de la torre la càrrega transmesa per la coberta als extrems de l'aresta superior del tetràedre, el qual compta amb dos suports esfèrics degudament anivellats per rebre les esferes corresponents dels nusos de la coberta.

L'esquema de funcionament de les torres, d'acord amb això que hem exposat, exigeix una condició de biarticulació al cap i a la base durant les fases d'aixecament i de repòs. El gir al cap és garantit, en una direcció, mitjançant els suports esfèrics, i en l'ortogonal, mitjançant la inclusió, entre cada gat d'elevació i el bastidor, d'una parella de gats hidràulics de cada torre, en

circuit tancat, que fan un efecte de matalàs d'oli, compensant la diferència de càrregues entre els dos gats d'elevació, i mantenint amb el gir apropiat els requeriments de l'estructura de coberta, sense variar la igualtat de longitud dels cables de tir.

Els girs a les bases de les torres, necessaris per a compatibilitzar els moviments de l'estructura al cap de la torre, en fases de vent i sense provocar-hi encastaments, s'aconsegueixen a base de deformació dels neoprens de suport en les fases d'estructura recolzada, i amb lleugers desplaçaments dels corrons-guia en les fases d'aixecament, per deformació dels neoprens de revestiment d'aquests. En realitat, es creen encastaments de poca entitat perfectament acceptables per les torres i pels fonaments.

C. EQUIPS HIDRÀULICS I DE CONTROL

Havien de mantenir l'aixecament de la coberta sense moviments diferencials entre els punts de suport superiors a 30 mm.

Es van triar gats buits, de la casa suïssa VSL, que integraven el sistema de control de nivell en el sistema hidràulic d'elevació mateix, de manera que aquell en comandés l'operació.

Els gats permeten el pas d'un cable de set caps de 0,6" que es poden ancorar a dos punts: un de superior i un altre d'inferior al gat.

Quan el pistó del gat avança, el cable queda fixat a l'ancoratge superior i es produeix l'elevació del conjunt; quan acaba la carrera de l'èmbol, de 12 a 14 cm, se n'inicia la retracció i queden desancorats els cables d'ancoratge superior, i automàticament ancorats en l'inferior per l'arrossegament de les falques. Aquest sistema confereix una gran seguretat a l'operació, ja que qualsevol fallada del sistema hidràulic que impliqui un descens de l'èmbol fixarà automàticament la càrrega a l'ancoratge inferior, amb un petit descens paràsit del conjunt degut a l'arrossegament de falques, que serà com a màxim de 10 mm.

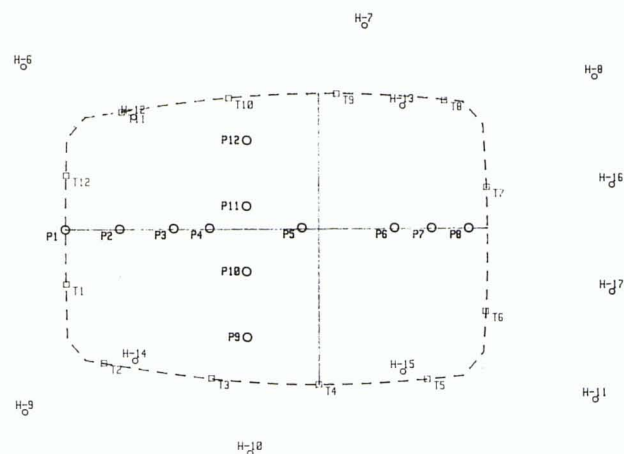
La igualtat de cabal a cada torre era controlada mitjançant sis grups motobomba tarats, amb partidor de cabal per a garantir-ne un 50% a cadascuna de les torres subministrades per cada grup.

La precisió en el control de nivells s'aconsegueix mitjançant un sistema de filferros tensos verticals, fixats a la coberta i enrotllats a una roda que quan gira envia, mitjançant un sensor, impulsos equivalents a aixecaments de 2 mm. Cada 20 mm de pujada, el sensor talla automàticament el subministrament d'oli a la torre corresponent. Fins que totes les torres no han assolit el graó de 20 mm corresponent, no s'inicia el següent, cosa que manté la garantia de nivells dins els marges esmentats.

Tot el comandament d'aquesta operació és localitzat en un centre de control que permet de visualitzar tant les posicions com els aixecaments de la coberta en cada torre mitjançant indicadors lluminosos. Una vàlvula de seguretat a cada circuit fa que el sistema s'aturi automàticament en el cas que la pressió pugui per damunt d'una de prefixada anteriorment.

D. TRAVAMENTS EN FASE D'ELEVACIÓ

A causa que a les fases d'elevació la rigidesa de l'estructura és reduïda respecte de la definitiva, l'anàlisi dinàmica dels models de l'estructura en construcció indicava que en direcció transversal podien produir-se situacions de ressonància, ja que estava el període propi d'aquesta estructura molt proper al temps de



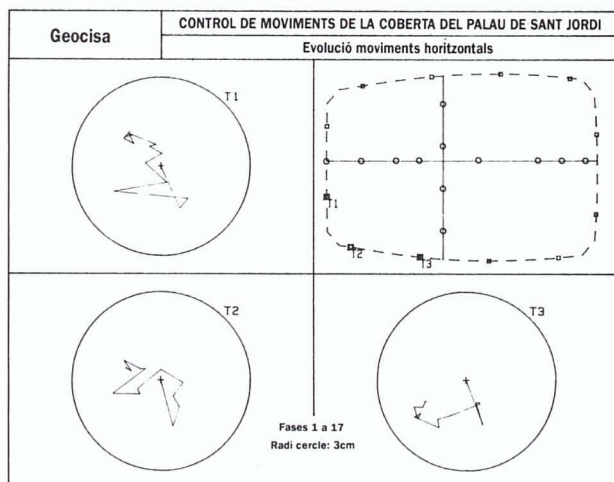
3.- Situació dels nusos de malla i punts de torre controlats a efectes de moviments, i situació de les fites topogràfiques des de les quals se'n feia el control.

4.- Moviments horitzontals de la coberta durant l'operació.

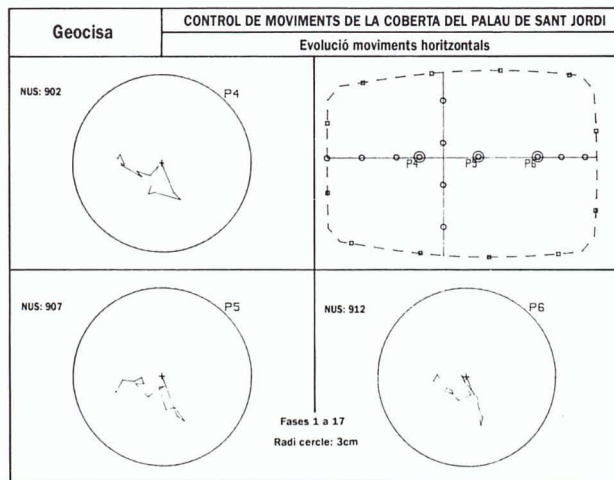
4a Al cap de la torre

4b Als nusos de malla.

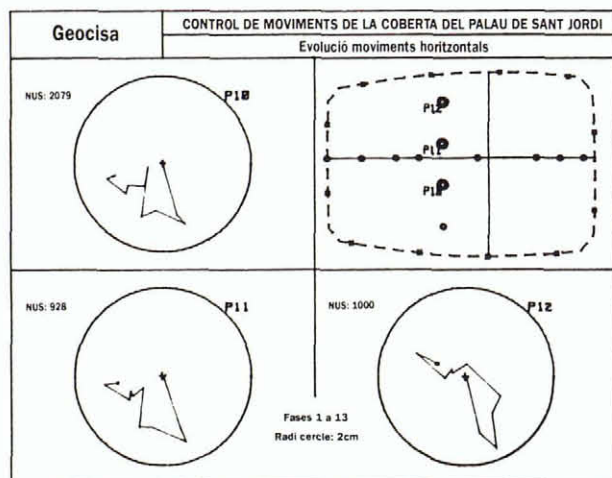
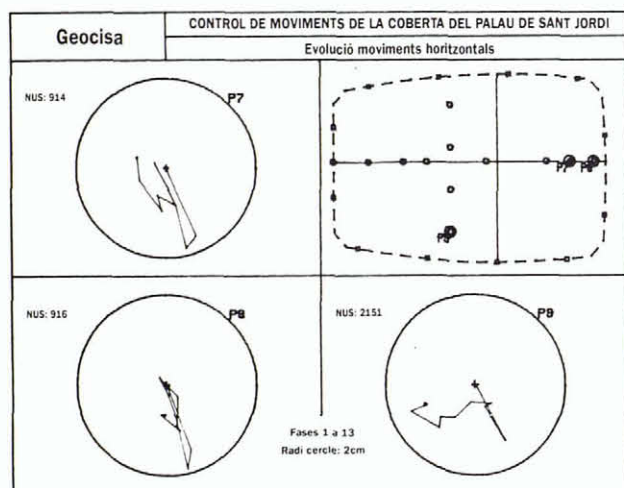
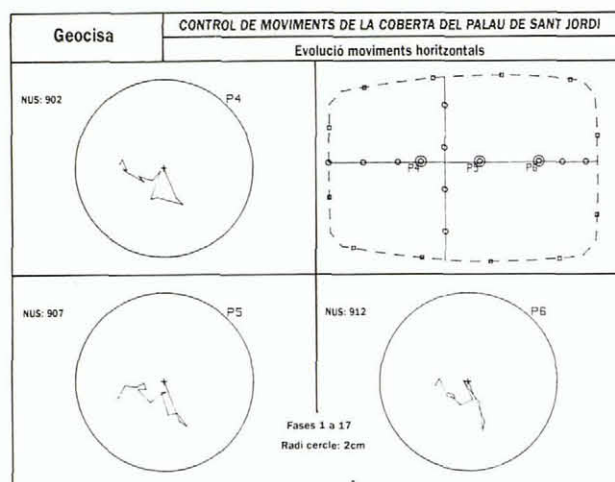
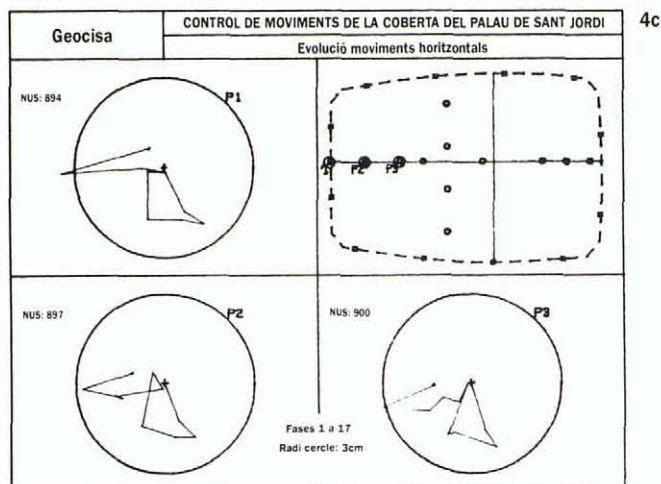
4c Del total de nusos de malla controlats (comparativament).



4a



4b



pas de vent en aquella direcció, per a les velocitats màximes previstes. Per això, es va decidir de col·locar uns elements eventuals de fixació dels pòrtics corresponents a l'estructura de formigó.

Atès que aquesta possibilitat s'hauria de poder emprar en qualsevol moment de l'elevació, i que els pòrtics esmentats presenten uns moviments amplíssims als caps, a causa de la dislocació necessària, calgué projectar un sistema d'una certa complexitat mitjançant cables i barres Dywidag, que es fixaven amb gran rapidesa quan era necessari, davant l'eventual presència de vents importants. Es fixaven de manera sistemàtica cada dia quan acabaven les operacions d'aixecament.

Aquest sistema fou projectat, a més a més, considerant la possibilitat eventual de corregir possibles desplaçaments paràmits horitzontals de la coberta a les fases d'aixecament, motivades per l'acumulació de franquícies, d'errades, de dissimetries o d'unes altres circumstàncies imprevistes.

E. PROJECTE D'INSTRUMENTACIÓ I CONTROL

S'hi van efectuar dues menes de control:

- Intern, intrínsec a l'operació d'aixecament, constituït per sensors de nivell a cada torre i per cintes mètriques metàl·liques per a la supervisió directa dels encarregats en cap de les torres.

- Extern a l'operació, realitzat per GEOCISA, que controlava els aspectes següents:

- la geometria: mitjançant topografia d'alta precisió, proporcionant coordenades absolutes de 24 punts de la coberta; i els girs, mitjançant clinòmetres en una sèrie de fusts de pòrtics perimetral;

- les deformacions: a 16 barres de l'estructura, mitjançant tres bandes extensomètriques a 120 o en el tub, juntament amb termoparells combinats per establir la incidència paràmita tèrmica; s'hi instrumentaren també quatre dels suports de la coberta de manera similar i els tirants dels tetràedres de les torres, a fi de comprovar de forma indirecta les reaccions deduïdes per la lectura de manòmetres;

- el factors ambientals: anemòmetres per al vent; termòmetres i termoparells per al control de temperatures.

La captació de dades se centrava en una unitat de registre de 32 kb de memòria, que en permetia la transmissió a un ordinador que processava les dades i editava en temps reals resultats gràfics i taules.

F. UNS ALTRES CONTROLS

A més dels aspectes descrits anteriorment, l'operació d'aixecament comptà amb unes altres activitats sistemàtiques i organitzatives de gran importància per al desenvolupament correcte i segur del procés, les quals relacionem tot seguit:

- les comunicacions entre els equips de torres i el centre de comandament: megafònica, telefònica, i de botó (vermell o verd) que permetien advertir de manera general o local sobre les ordres, les anomalies o la disponibilitat per a efectuar una operació;

- sistematització d'operacions, amb la formació en període de prova del personal mitjançant una torre de prova i l'edició de manuals d'operació i d'esquemes de funcionament;

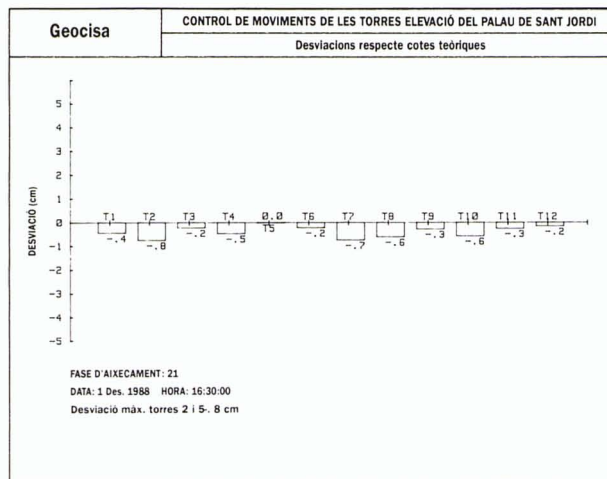
- proves de càrrega: control d'una de les torres amb tots els seus equips i sistemes, mitjançant càrrega amb barres de Dywidag per a simular les accions de la coberta;

- control general.

Procés futur

Un cop acabades les operacions de tancament de les anelles i del recosit de les franges, cap a la fi del mes de febrer, es procedirà a l'operació de desapuntament que s'efectuarà de manera gradual i progressiva, mitjançant els gats de compensació de càrrega i retirada de xapes en funció de tascons ja inclosos als suplements disposats en l'estat final actual d'aixecament³.

J. M. C ☐



5.- Situació comparativa de l'anivellament de les 12 torres en les últimes fases de la maniobra d'aixecament.

6.- Deformada de la coberta ("teòric" representa la contrarreforma ideal; l'escala vertical només afecta la línia "teòric").

6a Secció segons eix Y

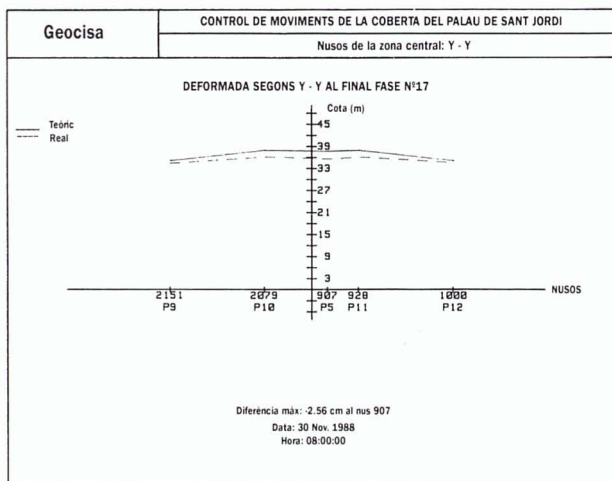
6b Secció segons eix X

Referències:

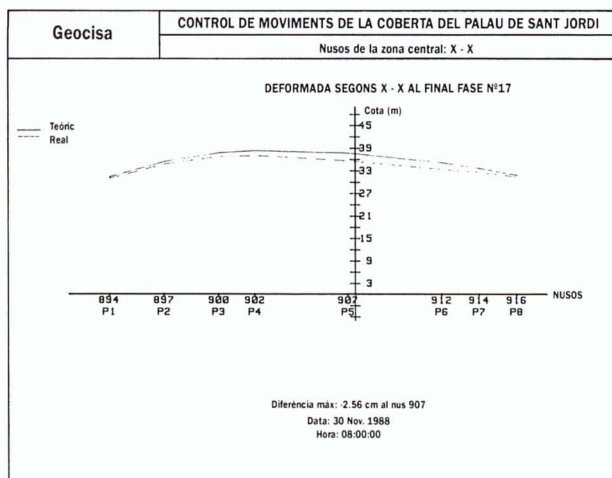
1.- A la recent publicació *Barcelona Drawings*, (Editorial Custavo Gili, SA, Barcelona, 1988) es pot seguir una bella seqüència del desenvolupament d'aquesta complexa trama de relacions establerta per l'arquitecte autor del projecte, Arata Isozaki. Mitjançant un seguit de dibuixos i croquis s'estableix l'evolució del procés creador de la coberta i s'hi aprecia de manera clara com, d'una manera gradual, les característiques del procés constructiu van intervenint en l'evolució formal de l'obra.

2.- Aquesta tipologia, juntament amb els sistemes de malles teses, sistemes tensigrity i combinacions de teles en sistemes pneumàtics o superfícies atirantades, constitueixen els tipus estructurals emprats actualment en la construcció de cobertes de grans espais.

3.- Un cop acabada aquesta operació, farem un nou article que reculli aquesta última fase i també una descripció global de la resta de les estructures del Palau.



6a



6b