

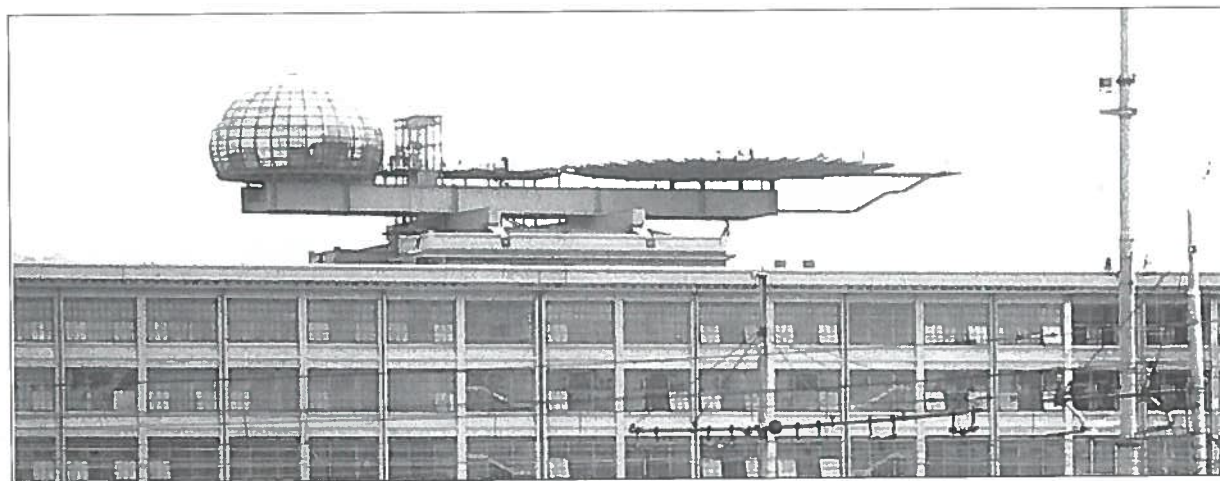
Le strutture dell'eliporto sopraelevato del nuovo Lingotto a Torino

M. de Miranda, W. Boller

Elevated heliport structures of the new "Lingotto" in Turin

Viene descritta una particolare struttura in acciaio progettata per sostenere una elisuperficie ed una cupola per sala riunioni, scavalcando gli edifici sottostanti, ad una altezza di 40 metri.

This paper describes a special steel structure designed to support a helideck and a dome-shaped construction for a conference hall and meeting room, which rises to a height of 40 metres from the ground overtopping the existing buildings.



Ph. Gianni Berengo Gardin

1. INTRODUZIONE

La memoria illustra le principali caratteristiche di una particolare struttura in carpenteria metallica, inserita nel contesto più ampio relativo alla ristrutturazione del complesso "Lingotto" a Torino.

Come noto, l'ex stabilimento Lingotto, progettato nel 1916 dall'ing. Giacomo Mattè Trucco, è stato oggetto di un progetto di recupero e ristrutturazione curato dall'arch. Renzo Piano.

Nel profilo del fabbricato risultano subito evidenti due elementi che innalzano il limite dell'esistente complesso riqualificandolo nella memoria collettiva: la piattaforma dell'eliporto e la cupola della sala meetings denominata "bolla".

L'elisuperficie è costituita da una struttura interamente in carpenteria metallica di forma circolare con diametro di 24 m. Esternamente a tale superficie è presente un anello di protezione in rete con un diametro esterno complessivo di 27 m.

L'elisuperficie, posizionata a quota 39.66 m e la sala riunioni, posizionata a quota 38.80 m, sono collegate mediante una passerella pedonale metallica.

La sala riunioni, contenuta nella "bolla", è raggiungibile, oltretutto dall'elisuperficie, mediante due ascensori panoramici realizzati con struttura in vetro e acciaio.

La sua posizione che la pone al di sopra del limite del Lingot-

1. INTRODUCTION

This paper illustrates the main features of a special structure made of steel structural work, which forms part of the more extensive project for restructuring the "Lingotto" complex in Turin.

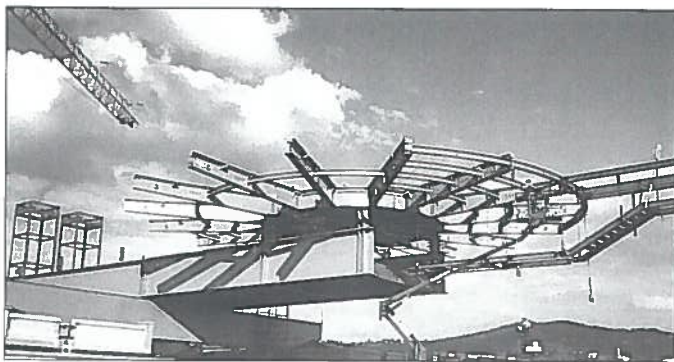
As we know, the former Fiat Lingotto works, designed in 1916 by Giacomo Mattè Trucco, has been the subject of a project of recovery and restructuring carried out under the direction of the architect Renzo Piano.

In its new configuration, the building at once presents two elements which modify the existing complex by increasing its height and which transform it, bestowing on it a new image in harmony with its historic role. These are the heliport deck and the dome of the conference hall and meeting room, which has been given the name "Bolla" (bubble).

The helideck consists of a circular-shaped structure, with a diameter of 24 metres, built entirely of structural steel. The helideck is encircled by a horizontal protective ring of meshwork, with an external diameter of 27 metres.

The helideck, located at a height of 39.66 m, and the dome-shaped conference centre, located at a height of 38.80 m, are interconnected by a metal footbridge.

The conference hall and meeting room contained in the "Bolla" can be reached both from the helideck and by means



to libero lo sguardo sui tetti di Torino, sulla Mole Antonelliana, fino a giungere all'orizzonte delle Alpi.

La cupola si imposta anch'essa su una piattaforma circolare di diametro esterno 12.50 m (in carpenteria metallica e calcestruzzo), ed è costituita da pannelli vetrati a doppia curvatura, di dimensioni variabili, realizzati con la tecnica del silicone strutturale.

L'ingresso alla bolla avviene attraverso una porta in cristallo posizionata di fronte allo sbarco degli ascensori panoramici, e comandata automaticamente.

La sala riunioni e l'eliporto oltre alla sala congressi, svolgono le funzioni forse più significative del progetto di recupero del Lingotto. La complessa struttura in carpenteria che sostiene tali superfici, e di cui si riferisce nella presente memoria, ne ha ben risolto i problemi statici.

2. DESCRIZIONE DELLE STRUTTURE

Le strutture in titolo hanno quindi la funzione di sostenere, ad una quota di circa 40 m di altezza dal piano viario urbano, scavalcando gli edifici sottostanti, un eliporto di 24 m di diametro, un locale di riunione coperto di 12.50 m di diametro, denominato "Bolla", ed una serie di solai e camminamenti di servizio.

Tali strutture possono essere suddivise, in base alla destinazione ed alla funzione statica, nelle seguenti strutture elementari:

- strutture dell'eliporto (elisuperficie)
- strutture della Bolla
- travate longitudinali: travi longitudinali e strutture orizzontali
- travi trasversali
- bilancini, e relative travi di collegamento.

L'ordine con cui sono state elencate le strutture elementari corrisponde all'iter naturale dei carichi verticali; infatti le strutture dell'elisuperficie e della Bolla si appoggiano sulle travi longitudinali, che ricevono anche i carichi degli orizzontamenti, da cui sono peraltro controventate, e trasmettono i propri carichi alle travi trasversali.

Queste infine si appoggiano sui bilancini che riportano sulle sottostrutture in cemento armato, attraverso otto apparecchi d'appoggio, i carichi ad essi trasmessi.

Complessivamente le azioni verticali trasmesse dai bilancini sono pari a circa 650 t per quanto riguarda i carichi permanenti e a circa 950 t con la totalità dei carichi accidentali.

2.1 Strutture dell'elisuperficie

L'elisuperficie è stata progettata per sostenere il carico di un elicottero, secondo le specifiche contrattuali, oltre al carico di neve e del personale di servizio ed alla spinta del vento.

Le strutture dell'elisuperficie sono costituite dai seguenti elementi strutturali:

- impalcato (sovrastuttura d'impalcato in lamiera di acciaio irrigidita)

of two panoramic lifts with a glass and steel structure.

Its position above the Lingotto leaves guests free to gaze over the roofs of Turin, past the Mole Antonelliana, all the way to the Alpine horizon.

The dome is also set on a circular platform with an outer diameter of 12.50 m, built of steel framing and concrete, and consists of double-curvature glass panels of different dimensions, produced using the structural silicon technique.

The entrance to the "Bolla" is through a glass door located in front of the arrival point of the panoramic lifts, which opens and closes automatically.

The conference hall and meeting room and the heliport have perhaps the most significant functions of the entire project for the transformation of the Lingotto works. The static problems involved in supporting these surfaces have been successfully solved by means of the complex steel structure described in this paper.

2. DESCRIPTION OF THE STRUCTURES

The structures described herein have the function of supporting, at a height of approximately 40 m from road level and overtopping the existing buildings, a heliport having a diameter of 24 m, a covered dome-shaped meeting centre known as "Bolla", with a diameter of 12.50 m, and a series of floors and service walkways.

These structures may be subdivided, on the basis of their purpose and static functions, into the following elementary structures:

- heliport structures (helideck)
- structures of the "Bolla"
- longitudinal trusses and girders: longitudinal beams and horizontal structures
- cross girders
- rockers and corresponding connecting beams.

The order in which the elementary structures have been listed corresponds to the natural order of the vertical loads: the structures of the helideck and "Bolla" rest on the main longitudinal girders, which also receive the loads of the storeys, by means of which they are also braced, and transmit their loads to the cross girders.

Finally, these rest on the rockers, which transfer the loads transmitted to them to the reinforced-concrete substructures (towers) by means of eight supporting members.

Altogether the vertical actions transmitted by the rockers are equal to approximately 650 tonnes in terms of the dead loads, and approximately 950 tonnes when all the live loads are included.

2.1 Structures of the helideck

According to contract specifications, the helideck has been designed to support the load of one helicopter, in addition to the loads exerted by snow, service staff, and wind pressure.

The helideck structures consist of the following structural members:

- deck (deck superstructure built of stiffened steel plate)
 - annular beams
 - radial beams
 - thoroidal beam
 - central tambour
- which are described below.

Deck. This consists of a top steel plate with a thickness of 10-11 mm, stiffened underneath with trapezoidal box ribs arranged radially with variable pitch and resting on the annular beams by means of continuous diaphragms.

From the static point of view, the steel plate-rib system beha-

- travi anulari
 - travi radiali
 - trave torica
 - tamburo centrale
- che vengono nel seguito descritti.

Impalcato. E' costituito da una lamiera superiore dello spessore di 10-11 mm, irrigidita inferiormente da nervature scato-lari a sezione trapezoidale (ribs) disposte in direzione radiale ed in passo variabile, e appoggiate alle travi anulari mediante diaframmi continui.

Il sistema lamiera-nervature longitudinali si comporta staticamente come lastra ortotropa a rigidezza differenziata nelle due direzioni, in grado di distribuire efficacemente i notevoli carichi concentrati indotti dall'elicottero.

La composizione costruttiva studiata per l'impalcato consente di porre in opera, e di assemblare mediante bullonatura, grandi pannelli di lamiera nervata prefabbricati in officina.

Travi anulari. Trasferiscono il carico trasmesso dal deck alle travi radiali.

Sono realizzate con profili laminati a caldo, con sezione a doppio T, calandrati e collegati alle travi radiali mediante giunti flangiati.

La torsione indotta dalla curvatura dell'asse delle travi nel piano orizzontale viene trasmessa in regime di torsione mista alle estremità di tali travi ed una apposita analisi statica è stata effettuata per valutarne adeguatamente il comportamento.

Travi radiali. Trasferiscono il carico trasmesso dalle travi anulari alla trave torica. Sono realizzate con profili a doppio T composti saldati ad altezza variabile, irrigiditi con nervature verticali poste in corrispondenza di ogni trave anulare.

Il sistema nervature-travi anulari costituisce, col suo funzionamento a telaio a U rovesciato, un efficace vincolo per la stabilità del corrente inferiore delle travi radiali.

Tali travi sono giuntate con giunti a barre pretese in corrispondenza della trave torica, e con giunti saldati a piena penetrazione in corrispondenza del tamburo centrale.

Trave torica. Trasferisce il carico proveniente dalle travi radiali alle quattro colonnine emergenti dalle travi principali longitudinali. E' realizzata con profilo a doppio T composto saldato, di altezza pari a 950 mm, ed è giuntata con collegamenti di forza saldati a piena penetrazione.

La trave torica, pur avendo linea d'asse curva in pianta ed appoggi ben distanziati, non è soggetta a rilevanti azioni torcenti in quanto la presenza delle travi radiali disposte all'interno del cerchio definito dalla trave torica sostanzialmente impedisce alle sue sezioni di ruotare.

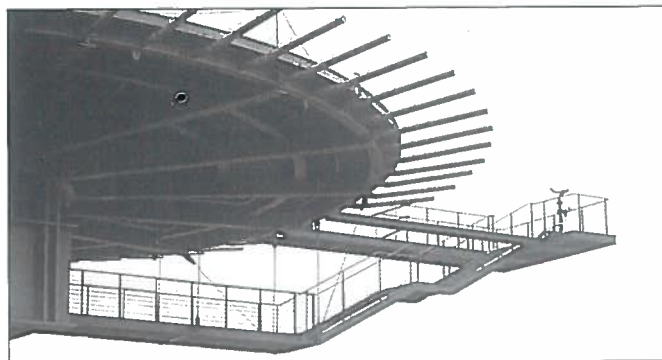
Sono infatti le travi radiali interne che assorbono sia i momenti flettenti provenienti dalle travi radiali a sbalzo, sia i momenti indotti dalla curvatura della trave torica.

In altre parole il sistema statico è configurabile come piastra reticolare (o graticcio) e tale circostanza ha consentito di adottare un profilo aperto per la trave torica, con vantaggi di ordine costruttivo, di manutenzione e di ispezionabilità.

Tamburo centrale. Realizza il collegamento statico di continuità fra le travi radiali.

E' costituito da una lamiera calandrata collegata superiormente ed inferiormente da due lamiere circolari che consentono la trasmissione degli sforzi rispettivamente di trazione e compressione tra le piattabande delle opposte travi radiali.

Una serie di nervature verticali consente la saldatura di continuità delle anime.



Ph. Gianni Berengo Gardin

ves like an orthotropic plate with differentiated stiffness in the two directions, which is effectively able to distribute the considerable concentrated loads induced by the helicopter. The constructional solution adopted for the deck enables large prefabricated ribbed steel-plate panels to be laid in position and bolted together.

Annular beams. These transfer the load transmitted by the deck to the radial beams.

They are curved hot-rolled I-beams connected to the radial beams by means of flanged joints.

The torsion induced by the curvature of the axis of the beams in the horizontal plane is transmitted in a mixed-torsion regime to the ends of these beams, and an appropriate static analysis has been carried out to assess their behaviour adequately.

Radial beams. These transfer the load transmitted by the annular beams to the thoroidal beam.

They are built of welded I section with variable heights and stiffened by vertical ribs, which are set at the point of intersection with each annular beam.

The rib-annular beam system, together with its reversed-U frame working mode, is an effective constraint for the stability of the bottom chord of the radial beams.

These beams are jointed together with pretensioned-bar joints at the point of intersection with the thoroidal beam, and with full-penetration welded joints at the point of intersection with the central tambour.

Thoroidal beam. This transfers the load transmitted by the radial beams to the four columns protruding from the main longitudinal girders.

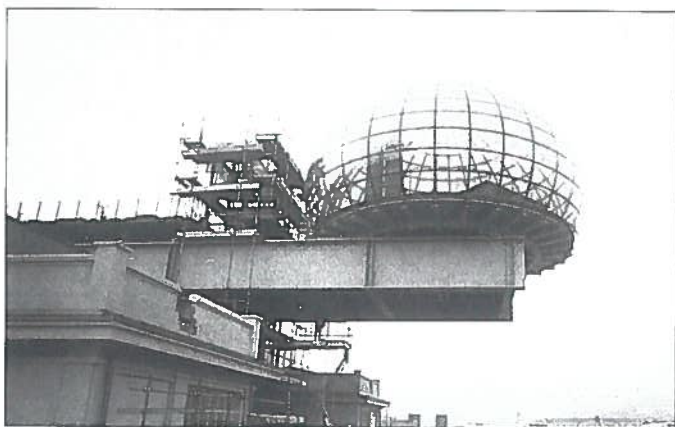
The thoroidal beam is made of 950-mm high welded I section and is jointed with full-penetration welded connections.

Although it has a curved line of axis in plan and well-distanced supports, the thoroidal beam is not subject to significant twisting actions in so far as its sections are substantially prevented from rotating by the presence of the radial beams, which are arranged within the circle defined by the thoroidal beam itself.

It is the internal radial beams that absorb both the bending moments coming from the cantilever radial beams and the moments induced by the curvature of the thoroidal beam.

In other words, the static system may be configured as a lattice-structure plate (or grid), and this circumstance has enabled the adoption of an open-section for the thoroidal beam, with advantages from the constructional, maintenance and inspection points of view.

Central tambour. This provides the static connection of continuity between the radial beams.



2.2 Strutture di sostegno della Bolla

La "Bolla", ossia la cupola destinata a sala riunioni a livello dell'eliporto, è sostenuta da una piattaforma in struttura composta acciaio-calcestruzzo, costituita da una piastra in calcestruzzo armato ed una sottostante orditura di travi in acciaio collaboranti staticamente con la piastra in c.a., descritte nel seguito.

Piastra in c.a. Ha pianta circolare con diametro pari a 12,50 m e spessore costante di 20 cm. E' gettata su lamiera grecata con funzione di cassero a perdere.

Lo spessore della piastra, esuberante dal punto di vista statico, è stato determinato in funzione dell'ottenimento di un peso in grado di bilanciare, con i carichi permanenti, il peso dell'elisu-
perficie, e di evitare inversione di sforzi nelle travi principali per particolari condizioni di carico accidentale.

Travi anulari secondarie. Ricevono il carico della piastra in c.a., ordita radialmente.

La trave perimetrale è realizzata con un profilo laminato a C, disposto nello spessore della piastra in c.a., appoggiato alle travi radiali principali e vincolato torsionalmente nella mezzera tra gli appoggi dalle travi radiali perimetrali.

La trave interna è realizzata con profilo composto saldato a sezione rettangolare.

Riceve il carico dalla piastra di solaio e dalla trave radiale secondaria, appoggiandosi sulle travi radiali principali, disposte su un settore di 1/8 di cerchio (45°).

Travi radiali. Ricevono il carico dalle travi anulari secondarie. Sono realizzate con profili aperti, a doppio T, di altezza variabile nella corona perimetrale.

Sono suddivise in tre ordini di travi:

- le travi perimetrali, con funzione prevalente di irrigidimento della corona perimetrale;
- le travi intermedie, che collegano l'anello perimetrale con la trave anulare interna;
- le travi principali, che collegano l'anello perimetrale con la trave torica centrale, e che, in quest'ultima trave ritrovano la loro continuità flessionale.

Le travi radiali si appoggiano tutte sulla trave torica principale e su di essa scaricano la totalità delle azioni verticali provenienti dalla piastra in c.a.

Travi toriche. Hanno entrambe sezione scatolare rettangolare.

La trave centrale, oltre a fornire appoggio alla piastra in c.a., ha la funzione di dare continuità flessionale alle travi radiali principali.

La trave torica principale riporta sui quattro appoggi i carichi provenienti dalle travi radiali.

It consists of a roller-levell steel plate connected on top and underneath by two circular plates which enable transmission of the tension and compression stresses, respectively, between the flanges of the opposite radial beams.

A set of vertical ribs enable the continuity welding of the webs.

2.2 Structures of the "Bolla"

The "Bolla", i.e., the dome for housing the conference hall and meeting room at the level of the heliport, is supported by a platform made of a composite steel-concrete structure consisting of a reinforced-concrete slab and an underlying framework of steel girders which work in static synergy with the reinforced concrete slab, as described below.

Reinforced-concrete slab. The slab is of circular plan with a diameter of 12.50 m and a constant thickness of 20 cm.

It is cast on profiled steel sheet, which has the function of expendable shuttering.

The thickness of the slab, which is oversized from the static point of view, was determined in such a way as to obtain a weight able to balance, with the permanent loads, the weight of the helideck and to prevent inversion of stresses in the main girders on account of particular conditions of live loading.

Secondary annular beams. These take the load of the reinforced concrete slab, which presents a radial framework.

The perimetral beam is made of rolled channel section, set in the thickness of the reinforced concrete slab, resting on the main radial beams and torsionally constrained at the centre between the supports of the perimetral radial beams.

The innermost beam is made of composite welded rectangular section.

It receives the load from the reinforced concrete slab and from the secondary radial beam, resting on the main radial beams, which are arranged over a sector of 1/8 of a circle (45°).

Radial beams. These receive the load from the secondary annular beams.

They are made of I section with open profiles and have variable heights in the perimetral annulus.

They are subdivided into three orders of beams:

- perimetral beams, with the prevalent function of stiffening the perimetral annulus;
- intermediate beams, connecting the perimetral annulus with the inner annular beam;
- main beams, which connect the perimetral annulus with the central thoroidal beam and which, in this latter beam, find their flexural continuity.

All the radial beams rest on the main thoroidal beam and unload onto it all the vertical actions from the reinforced concrete slab.

Thoroidal beams. Both these beams have rectangular box sections. Besides providing a support for the reinforced concrete slab, the central beam has the function of providing flexural continuity to the main radial beams.

The main thoroidal beam transfers the loads coming from the radial beams to the four supports.

All the box sections, which have sizes that do not enable easy inspection, are filled with concrete in the reinforced concrete slab casting phase, which also creates considerable advantages in terms of the stiffness and balance of the loads.

Dome structure. The external skin of the Bubble is made of structural glass with special mechanical, safety, thermal and

Tutte le sezioni scatorali, di dimensioni tali da non poter essere facilmente ispezionabili, sono riempite di calcestruzzo in fase di getto della piastra in c.a., con vantaggi anche in termini di rigidità e di equilibrio dei carichi.

Strutture della cupola. La pelle esterna della bolla è realizzata in vetro strutturale con particolari caratteristiche meccaniche, di sicurezza, termiche ed isolanti. In particolare l'esigenza di ridurre al minimo il fattore solare avrebbe richiesto dei vetri riflettenti ma, la vicinanza dell'elisuperficie e la conseguente probabilità di causare abbagliamento agli elicotteri in avvicinamento ne escludevano l'impiego. Per tale ragione fu scelto un vetro speciale, non riflettente, avente comunque un basso fattore solare; la scelta cadde sul vetro Azurlite prodotto dalla P.P.G. Industries U.S.A., dotato di una debole colorazione in azzurro.

Le lastre in vetro sono state curvate, temperate, sagomate e molate per essere successivamente composte a vetro camera. Il vetro interno è del tipo trasparente, incolore, stratificato e curvato come l'esterno, del tipo K-Glass della Pilkington Industries U.K. Al vetro interno sono inoltre stati applicati, mediante incollaggio strutturale, gli elementi in profilo di alluminio per l'aggancio alla struttura portante.

Le lastre così composte sono state montate e fissate alla struttura per poi essere sigillate fra loro con silicone strutturale per conferire perfetta coplanarità all'insieme.

La struttura portante delle lastre di vetro è costituita da un reticolo radiale e circonferenziale in elementi tubolari in acciaio. Gli stessi risultano controventati con cavi in acciaio e presentano giunzioni bullonate mascherate entro cannocchiali. Tutto l'insieme visto dal basso assomiglia ad una enorme ragnatela.

All'interno della bolla sono presenti gli arredi fissi e mobili che compongono la sala riunioni.

Particolare attenzione è stata inoltre posta alla luce solare diretta che viene regolata attraverso un sofisticato sistema di tende manovrate automaticamente al variare dell'inclinazione solare. E' infine previsto un sistema di correzione dell'acustica del locale attuato per mezzo di lastre in vetro appese alla struttura tubolare e variamente inclinate.

Dati tecnici:

Vetro esterno:	Azurlite P.P.G. 6 mm temperato
Intercapedine:	10 mm in Swiggel S.G. sigillante Proglaze Vec 90
Vetro interno:	Stratificato 4/4-9 con rivestimento basso emissivo K Glass Pilkinton
N. elementi:	416
Superficie totale:	350 m ²
Diametro massimo:	15 m
Altezza:	8 m.

2.3 Travata longitudinale

E' costituita da due travi a doppio T di 43.14 m di lunghezza e di 2.20 m di altezza, disposte ad un interasse di 6.84 m e collegate inferiormente da una serie di traversi e di telai a U, nonché da una controventatura con schema Pratt.

Alle due estremità sono appoggiate l'elisuperficie e la Bolla.

Al centro la trave longitudinale trova appoggio sulle travi trasversali.

Ai traversi appartenenti al piano della controventatura sono appoggiati una serie di camminamenti di servizio ed una serie di telai, portanti un solaio sopraelevato (di collegamento tra Bolla ed Elisuperficie) ed un solaio sospeso di servizio.

Una scala in acciaio, sospesa alle citate strutture orizzontali, collega i vari livelli e la copertura dell'edificio sottostante.

Una seconda scala in acciaio, a sbalzo dall'Elisuperficie e



Ph. Gianni Berengo Gardin

insulating characteristics. In particular, the need to reduce to a minimum the sun factor would have required the use of reflecting glass panes, but the proximity of the helipad and the consequent probability of causing glare to approaching helicopters ruled out its application. This is why a special non-reflecting glass has been chosen, with a low sun-reflecting factor: Azurlite glass, manufactured by P.P.G. Industries, U.S.A., slightly light blue-tinted.

The glass panes are bent, tempered, shaped and ground and then assembled into glazed panels. The internal pane is transparent, stratified and bent like the external one, and consists of K-Glass by Pilkington Industries, U.K..

The aluminium strip elements for the anchoring of the bearing structure are also applied to the internal glass by structural inoculation.

The panes obtained in this way are mounted and fixed to the structure and sealed to each other using structural silicone to obtain perfect coplanarity of the whole.

The bearing structure for the glass panes consists of a radial and circumferential reticule made of steel tubular elements. These are braced using steel stays and have bolted junctions hidden within telescopic elements. Seen from below, the whole structure looks like a gigantic spider-web.

The Bubble contains the fixed and mobile furnishings which compose the conference hall.

Special attention has been paid to the direct sunlight problem, which is solved by means of a sophisticated system of shades automatically adjusted in tune with the inclination of the sunlight. Finally, the acoustics of the internal spaces are corrected by a system consisting of glass panes hung from the tubular structure and tilted to varying degrees.

Technical data:

External glass:	Azurlite P.P.G. 6 mm, tempered
Cavity:	10 mm, filled with Swiggel S.G. Proglaze Vec 90 sealant
Internal glass:	4/4-9 stratified, with low-emission coating K Glass by Pilkinton
No. of elements:	416
Total surface area:	350 m ²
Max. diameter:	15 m
Height:	8 m.

2.3 Longitudinal girders

This consists of two I beams with a length of 43.14 m and a height of 2.20 m, which are set at an on-centre of 6.84 m and are connected at the bottom by a series of cross members and U-shaped frames, as well as by a bracing with the scheme of a Pratt truss.

The helideck and the "Bolla" rest on the two ends.

At the centre, the longitudinal truss rests on the cross girders.

Ph. Gianni Berengo Gardin



sospesa ad essa nella sua parte inferiore, collega direttamente l'Elisuperficie con il camminamento sottostante.

2.4 Travi trasversali

Ricevono il carico delle travi longitudinali e lo trasmettono ai bilancini d'appoggio. Sono realizzate con sezioni a cassone in lamiera irrigidita con nervature trasversali e multidiaframmata in corrispondenza delle sezioni di applicazione dei carichi e delle sezioni di cambiamento di direzione delle piattabande.

Le travi sono percorribili e ispezionabili al loro interno.

Al fine di contenere le deformazioni orizzontali per effetto delle spinte del vento, le travi trasversali sono controventate da due coppie di tiranti in acciaio ad alta resistenza, nei campi laterali. Nel campo centrale il collegamento e la controventatura sono realizzate dalle strutture del primo orizzontamento.

2.5 Bilancini d'appoggio

Ricevono il carico dalle travi trasversali e lo trasmettono agli appoggi disposti in sommità delle due torri in c.a.

Sono realizzati con sezioni scatolari, ispezionabili internamente, diaframmate in corrispondenza dei cambiamenti di direzione delle piattabande superiori.

I due bilancini principali di ciascuna torre sono collegati mediante una trave a doppio T che ha la funzione di controventarli trasversalmente e di trasferire a terra le azioni orizzontali longitudinali.

Le azioni orizzontali trasversali vengono trasmesse e ripartite su entrambe le torri in c.a. in quanto trasversalmente è previsto un vincolo fisso su ciascun bilancino.

La deformabilità trasversale delle torri in c.a. garantisce una limitata coazione indotta dalle variazioni termiche.

3. ANALISI STRUTTURALI

In una prima fase di progetto tutti i dimensionamenti sono stati effettuati individuando gli schemi statici principali definiti nel capitolo precedente, ed eseguendo il calcolo delle caratteristiche della sollecitazioni direttamente su schemi isostatici o limitatamente iperstatici, ma comunque chiaramente definiti e a favore di sicurezza.

In una seconda fase sono state rimosse alcune ipotesi semplificative e sono state eseguite delle analisi strutturali agli elementi finiti allo scopo di affinare i risultati e verificare ulteriormente il dimensionamento effettuato.

In particolare sono state eseguite le seguenti analisi statiche.

3.1 Calcolo dell'impalcato dell'elisuperficie

È stato effettuato modellando la lamiera superiore ed i ribs con elementi finiti bidimensionali a lastra-piastra.

Supported on the cross members belonging to the plane of the bracing is a series of service walkways and a series of frames carrying an elevated floor (connecting the "Bolla" and the helideck) and a suspended service floor.

A steel stairway, suspended from the horizontal structures referred to above, connects the various levels and the roof of the building underneath.

A second steel stairway, cantilevered from the helideck and suspended from the latter at its bottom, connects the helideck directly with the walkway underneath.

2.4 Cross girders

These receive the load of the main longitudinal trusses and transmit it to the rockers.

The cross girders consist of box sections made of steel plate stiffened with cross ribs and multidiafragmed at the sections of application of the loads and at the sections where the flanges change direction.

It is possible to traverse the beams and inspect them inside.

In order to contain the horizontal strains resulting from wind pressure, the cross girders are braced by two pairs of high-strength steel tie rods in the lateral fields.

In the central field, the connection and bracing are ensured by the structure of the first storey.

2.5 Supporting rockers

These receive the load from the cross girders and share it with the supports arranged at the top of the two reinforced concrete towers. The rockers are made of box sections, which can be inspected inside and are diafragmed at the points where the upper flanges change direction.

The two principal rockers of each tower are connected by means of an I beam, which has the function of bracing them transversely and transferring the longitudinal horizontal actions to the ground.

The transverse horizontal actions are transmitted and shared between both of the reinforced concrete towers, in that transversely a fixed constraint is envisaged on each rocker.

The transverse deformability of the reinforced concrete towers guarantees a limited constraint induced by thermal variations.

3. STRUCTURAL ANALYSES

In an initial design phase, all the sizing was carried out by identifying the principal static schemes defined in the foregoing section and computing the characteristics of the loads directly on the basis of statically determinate or limited indeterminate schemes, which were, however, clearly defined and conservative from the safety standpoint.

In a second phase, a number of simplifying hypotheses were removed, FEM structural analyses were carried out with the purpose of refining the results and further verifying the sizing chosen. In particular, the following static analyses were carried out.

3.1 Calculation of the deck of the heliport

The calculation was carried out by modelling the top steel plate and the ribs by means of slab-plate two-dimensional finite elements. The calculation made it possible to identify the effective degree of constraint provided by the rib to the upper steel plate and to determine the effective state of bi-axial stress present in the plate and ribs.

3.2 Calculation of the annular beams

The calculation was carried out with reference to the three external rings, modelling the I beams with two-dimensional

Il calcolo ha permesso di individuare l'effettivo grado di vincolo fornito dalle nervature alla lamiera superiore e di determinare l'effettivo stato di sollecitazione biassiale presente nella lamiera stessa e nelle nervature.

3.2 Calcolo delle travi anulari

E' stato effettuato con riferimento ai tre anelli esterni, modellando le travi a doppio T con elementi bidimensionali (le anime) ed elementi monodimensionali con rigidità assiale, flessionale e torsionale (le piattabande).

Il calcolo ha permesso di individuare il comportamento di torsione mista delle travi curve a sezione aperta costituenti gli anelli, confermando sostanzialmente le ipotesi di calcolo di progetto, in cui era stata attribuita al bimomento, in regime di torsione non uniforme, l'intera azione torcente.

3.3 Calcolo delle strutture principali dell'elisuperficie

E' stato effettuato con riferimento all'intera struttura composta da travi radiali ed anulari, modellate con elementi bidimensionali dotati di rigidità assiale, flessionale nelle due direzioni, e torsionale.

Il calcolo è stato eseguito per le combinazioni più gravose di carico concentrato e distribuito, trascurando a favore di sicurezza il contributo dell'impalcato.

Il calcolo ha permesso di determinare la distribuzione trasversale dei carichi fra le varie travi radiali, offerta dalle travi anulari per l'azione dei carichi concentrati.

3.4 Calcolo delle strutture principali della Bolla

E' stato effettuato con gli stessi criteri di cui al punto precedente, tenendo conto della rigidità torsionale dei profili scatolari e trascurando, a favore di sicurezza, il contributo resistente ed irrigidente della soletta in c.a. in quanto tutto il carico relativo al peso proprio strutturale, pari ad oltre il 50% del carico complessivo, è effettivamente applicato alla sola struttura in acciaio.

Il calcolo ha consentito di valutare l'effettiva interazione statica fra le travi toriche e le travi radiali con particolare riferimento alla ripartizione dei momenti flettenti trasmessi dalle travi radiali esterne, fra la trave torica principale e le travi radiali interne.

3.5 Analisi statica e dinamica dell'intera struttura

E' stata effettuata allo scopo di valutare le caratteristiche deformazionali e dinamiche dell'intera struttura, cioè del complesso formato dalla struttura in acciaio sopraelevata e dai telai in c.a. sui quali esse sono appoggiate.

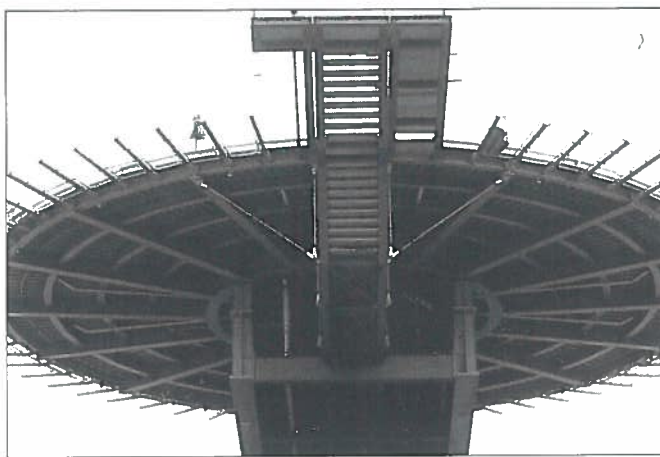
La modellazione della struttura in acciaio è sinteticamente così riassunta:

- Elisuperficie e Bolla: sono state modellate mediante una lastra-piastra equivalente; le relative masse sono state localizzate nei rispettivi baricentri.
- Travate longitudinali: le travi longitudinali, modellate con elementi bidimensionali (le anime) e monodimensionali (le piattabande), sono collegate dai traversi e dalle controventature modellati con elementi monodimensionali.

In questo modo è stato possibile valutare il comportamento spaziale dell'intera travata per azioni trasversali e torsionali.

- Travi trasversali e bilancini: sono state modellate con elementi monodimensionali.
- Telai in c.a.: sono stati modellati con elementi monodimensionali equivalenti ai telai reali, incastrati alla base ed incernierati in sommità.

L'equivalenza meccanica tra le mensole ideali schematizzate ed i telai reali è stata ottenuta eguagliando le rigidità elastiche in sommità delle mensole alle rigidità elastiche in som-



Ph. Gianni Berengo Gardin

elements (webs) and one-dimensional elements with axial, flexural and torsional rigidity (flanges).

The computation made it possible to identify the mixed torsional behaviour of the open-section curved beams forming the rings, which substantially confirmed the design calculation hypotheses, in which the entire twisting action had been attributed to the combined moment in the non-uniform torsion regime.

3.3 Calculation of the main structures of the helideck

The calculation was carried out with reference to the entire structure consisting of radial and annular beams modelled using two-dimensional elements provided with axial, flexural (in two directions) and torsional rigidity. The calculation was carried out for the most severe combinations of concentrated and distributed load, neglecting the contribution of the deck to obtain a conservative evaluation from the safety standpoint. The calculation made it possible to determine the transverse distribution of the loads between the various radial beams afforded by the annular beams owing to the action of the concentrated loads.

3.4 Calculation of the main structure of the "Bolla"

This calculation was carried out following the same criteria as those applied in the previous point, taking into account the torsional rigidity of the box sections and neglecting, on the side of safety, the strengthening and stiffening contribution of the reinforced concrete slab, in so far as the entire dead load of the structure itself, corresponding to more than 50% of the overall load, is actually applied to the steel structure alone.

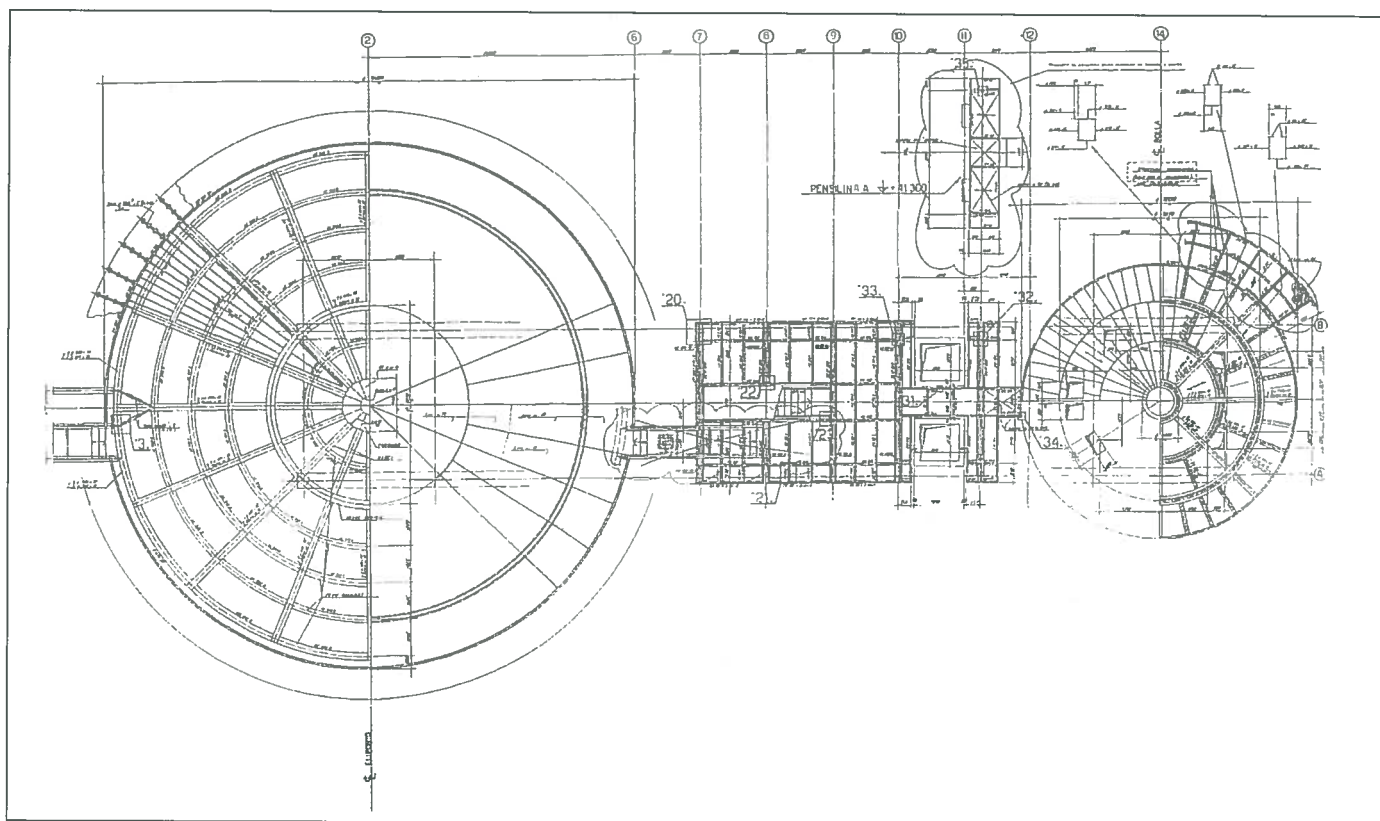
The calculation has enabled the evaluation of the effective static interaction between the thoroidal beams and the radial beams, with particular reference to the sharing of the bending moments transmitted by the outermost radial beams between the main thoroidal beam and the inner radial beams.

3.5 Static and dynamic analysis of the entire structure

This analysis was carried out to evaluate the deformation characteristics and dynamic characteristics of the entire structure, i.e., of the complex formed by the elevated steel structure and the reinforced concrete frames on which it is supported.

The modelling of the steel structure may be summarised as follows:

- Helideck and "Bolla": These were modelled by means of an equivalent slab-plate; the corresponding weights of the two structures were located in their respective centroids.
- Longitudinal trusses: The longitudinal beams, modelled using two-dimensional elements (webs) and one-dimensional elements (flanges), are connected by the cross members and the bracings, modelled using one-dimensional elements.



mità dei telai, calcolate con una analisi separata dei telai in c.a. L'equivalenza dinamica è stata ottenuta distribuendo sulle mensole ideali la massa effettiva dei telai reali.

3.6 Analisi degli effetti del vento

L'azione dinamica del vento sulla struttura è stata analizzata con particolare riferimento alle schiere di vortice di Von Karman e all'effetto delle raffiche.

La rigidità della struttura è stata calibrata nelle fasi iniziali del progetto in modo da soddisfare le condizioni di comfort per gli utenti, in termini di massime accelerazioni in corrispondenza della sala riunioni.

L'analisi dinamica condotta nel progetto finale e le prove dinamiche effettuate hanno verificato e confermato le ipotesi di progetto.

4. ASPETTI PROGETTUALI

La progettazione è stata sviluppata con l'obiettivo di costruire e mettere in opera una struttura in grado di soddisfare le esigenze funzionali pur tenendo conto dei vincoli esterni in modo semplice e funzionale.

Particolare attenzione è stata data all'obiettivo di progettare dettagli strutturali non solo funzionali ad esigenze statiche ed economiche, ma anche soddisfacenti da un punto di vista estetico-

5. FABBRICAZIONE E MONTAGGIO

Le travi principali a cassone e le travi longitudinali sono state interamente prefabbricate in officina allo scopo di evitare saldature in cantiere.

Le giunzioni tra i vari conci sono tutte saldate a piena penetrazione.

Sono stati pertanto trasportati pochi elementi di grandi dimensioni, successivamente sollevati e posti in opera per mezzo di autogrù di elevata capacità.

In this way, it was possible to evaluate the spatial behaviour of the entire truss due to transverse and torsional actions.

- Cross girders and rockers: These were modelled using beam elements.
- Reinforced-concrete frames: These were modelled with one-dimensional elements equivalent to the real frames, fully clamped at the base and hinged at the top.

The mechanical equivalence between the ideal cantilevers of the scheme and the real frames was obtained by equating the stiffnesses at the top of the cantilevers to the stiffnesses at the top of the frames, calculated with a separate analysis of the reinforced concrete frames.

The dynamic equivalence was obtained by distributing the effective weight of the real frames over the ideal cantilevers.

3.6 Wind analysis

The wind dynamic action on the structure was analysed with main reference to Von Karman vortex sheddings and gust buffeting effects. The stiffness of the structure was tuned, in the early design phase, to comply with the limit conditions for comfort, in terms of maximum accelerations, at the Meeting Room location. The dynamic analysis carried out in the final design and the final dynamic tests checked and confirmed the design assumptions.

4. DESIGN REMARKS

The conceptual design of the structure was carried out with the objective of design, build and erect a structure able to fulfil its function within the external constraints, in a simple and essential way. Special attention was also paid to the objective of design structural details not only functional to the static and economical requirements but also effective from an aesthetic point of view.

5. FABRICATION AND ASSEMBLY

The main box girders and the longitudinal girders were entirely

Le piattaforme dell'Elisuperficie e della Bolla sono state prefabbricate nelle massime dimensioni compatibili con il trasporto e quindi assemblate a piè d'opera e poste in opera con autogru.

Il sollevamento e la posa in opera degli elementi di grandi dimensioni e pesi fino a 40 t ha richiesto un particolare studio essendo necessario scavalcare l'edificio frontale del Lingotto, alto circa 30 m e della profondità di circa 15 m.

L'assemblaggio finale degli elementi in opera è stato effettuato prevalentemente mediante giunzioni bullonate.

La struttura è stata collaudata con prove di carico statiche e con prove di vibrazione atte a verificarne le caratteristiche dinamiche.

E' stata rilevata una buona corrispondenza tra le previsioni teoriche degli spostamenti e le frequenze delle vibrazioni.

prefabricated in the factory with the aim of avoiding the need for field welds. The joints between the various elements are all full-penetration welded. Consequently, there was the need to transport only a small number of large-sized elements, which were subsequently hoisted and set in place by means of a high-capacity crane truck. The platforms of the helideck and "Bolla" were prefabricated in the maximum dimensions compatible with transportation, and subsequently assembled at the construction site and set in position using a crane truck. The hoisting and laying in position of the large-sized elements with weights of up to 40 tonnes required a particular study since it was necessary to clear the front building of the Lingotto, which is approximately 30 metres high and approximately 15 metres deep. The final assembly of the elements at the construction site was prevalently carried out by means of bolted joints. The structure underwent testing with static load tests and vibration tests aimed at verifying its dynamic characteristics. Good agreement was found with the theoretical prediction of displacements and vibration frequencies.

PROGETTO ED ESECUZIONE / DESIGN AND CONSTRUCTION

Progetto architettonico / <i>Architect:</i>	arch. Renzo Piano - RPBW - Genova
Collaboratori / <i>Architect cooperation:</i>	arch. Mark Carrol - RPBW
Progetto cantierizzato / <i>Project manager:</i>	ing. Walter Boller - Impresa Del Favero - Trento
Progetto esecutivo delle strutture / <i>Design of structures:</i>	ing. Mario De Miranda - Studio De Miranda Associati - Milano
Committente / <i>Owner:</i>	Lingotto - Torino
Appaltatore / <i>Main contractor:</i>	ATI Del Favero - Maltauro - Aster (Mandataria Del Favero - Trento)
Direttore dei lavori / <i>Work manager:</i>	prof. ing. Franco Levi - Torino
Collaudo statico / <i>Static test:</i>	ing. Riccardo Montauti - Livorno
Carpenterie metalliche / <i>Steel structures:</i>	De Valle - Torino Ortolan - Treviso
Strutture e finiture della bolla / <i>Steel frame of the glass-dome:</i>	Bodino - Torino
Principali quantità di materiali / <i>Main characteristics of the materials:</i>	carpenteria metallica Fe 510 t 585