

incide



QATAR AIRWAYS MAINTENANCE HANGAR

**Il progetto ingegneristico per
l'hangar più grande del mondo**

The engineering design for the world's largest hangar

QATAR AIRWAYS MAINTENANCE HANGAR

Il progetto ingegneristico per l’hangar più grande del mondo

The engineering design for the world’s largest hangar

1. IL NUOVO AEROPORTO INTERNAZIONALE DI DOHA	4
THE NEW DOHA INTERNATIONAL AIRPORT	
2. GLI INTERVENTI DELLA ADCC JV	6
THE INTERVENTIONS OF THE ADCC JV	
3. L’HANGAR DI MANUTENZIONE AEREI	8
THE AIRCRAFT MAINTENANCE HANGAR	
4. IL PROGETTO SVILUPPATO DA INCIDE	12
THE PROJECT DEVELOPED BY INCIDE	
Metodologia progettuale adottata Design methodology adopted	13
Criteri generali adottati General criteria adopted	14
5. IL METODO DI MONTAGGIO THE ASSEMBLY METHOD	18
6. COMPORTAMENTO STRUTTURALE STRUCTURAL BEHAVIOUR	24
6.1 Il sistema resistente verticale The vertical resistant system	26
Il sistema base portale The base-portal system	30
Colonne posteriori e trave banchina Rear columns and quay beam	36
Travi secondarie Secondary beams	38
6.2 Il sistema resistente orizzontale The horizontal resisting system	42
7 DESCRIZIONE STRUTTURALE DEL BLOCCO WORKSHOP	44
STRUCTURAL DESCRIPTION OF THE WORKSHOP AREA	

1 Il nuovo Aeroporto internazionale di Doha

L'Aircraft Maintenance Hangar è un centro per la **manutenzione dei velivoli di grande taglia** realizzato a Doha, nello stato del Qatar, nell'ambito della costruzione del nuovo Aeroporto internazionale (denominato DIA - Doha International Airport), a supporto delle attività di manutenzione della flotta della Qatar Airways.

Il nuovo Aeroporto internazionale di Doha è diventato il principale scalo internazionale dell'area medio orientale, sorto su un'area di 22 kmq, superficie pari a circa un quarto della dimensione della città vecchia di Doha, interamente creata ex novo con materiale di dragaggio proveniente dalle adiacenti profondità marine. I lavori, iniziati nel 2005, hanno visto l'inaugurazione delle prime strutture nel 2010, con capacità iniziale di 24 milioni di passeggeri annui. L'intero progetto è terminato nel 2015 e da quel momento il nuovo aeroporto internazionale di Doha può movimentare fino a **50 milioni di passeggeri ogni anno** e potrà movimentare sino a 2 milioni di tonnellate di merci.

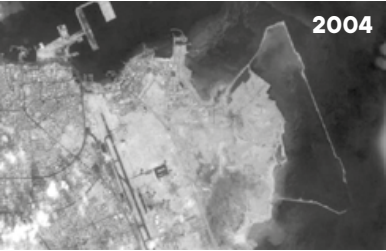
L'aeroporto è dotato di 4 piste, di cui una con lunghezza 4,850 metri, solo 150 metri più corta della pista dell'aeroporto di Ulvanovk, in Russia.

Alla sua apertura, il terminal di 350'000 mq, è stato l'edificio più ampio del Qatar,

coprendo una superficie pari a 50 campi di calcio.

Imponenti sono stati i lavori preparatori per il sito che hanno visto la movimentazione di enormi quantità di terreno per l'**interramento di un'area di mare** di circa 15 kmq. Tali lavori sono iniziati nel 2003, con la costruzione delle barriere di protezione e sono stati completati nel 2006, con l'inizio delle opere a terra.

Il Terminal Partenze e Transiti è il terminal principale dell'Aeroporto Internazionale di Doha e gestisce tutti i voli in classe economica di Qatar Airways, oltre a tutte le altre compagnie aeree che utilizzano l'aeroporto. Questo terminal è stato ampliato più volte al fine di far fronte al crescente numero di passeggeri che transitavano per l'aeroporto ogni anno. Il terminal dispone di **44 gate** e di una grande area duty-free e venne ampliato andando ad occupare anche la vecchia zona arrivi con l'apertura del nuovo Terminal Arrivi: da quel giorno, infatti, tutti i passeggeri in partenza e in transito utilizzano questa struttura, mentre i passeggeri in arrivo a Doha utilizzano il nuovo Terminal Arrivi.



▲ In alto foto aerea dello stato di avanzamento dei lavori: dall'interramento ad opera conclusa.

Above: aerial photo of the progress of the work: from burying to completion.

The new Doha international Airport



▲ Foto dell'aeroporto Internazionale Hamad di Doha (Qatar).
Doha Hamad International Airport (Qatar).



The Aircraft Maintenance Hangar is a **large aircraft maintenance centre** built in Doha, Qatar, as part of the construction of the new International Airport (named DIA - Doha International Airport), to support the maintenance activities of the Qatar Airways fleet.

The new Doha International Airport has become the main international airport in the Middle East, built on an area of 22 square kilometres, an area equal to about a quarter of the size of the old city of Doha, entirely created from scratch with dredged material from the adjacent deep sea. Work began in 2005 and saw the inauguration of the first facilities in 2010, with an initial capacity of 24 million passengers per year. The entire project was completed in 2015 and since then the new Doha International Airport can handle up to **50 million passengers annually** and will be able to handle up to 2 million tonnes of cargo.

The airport has four runways, one of which is 4,850 metres long, only 150 metres shorter than the runway at Ulvanovk Airport in Russia.

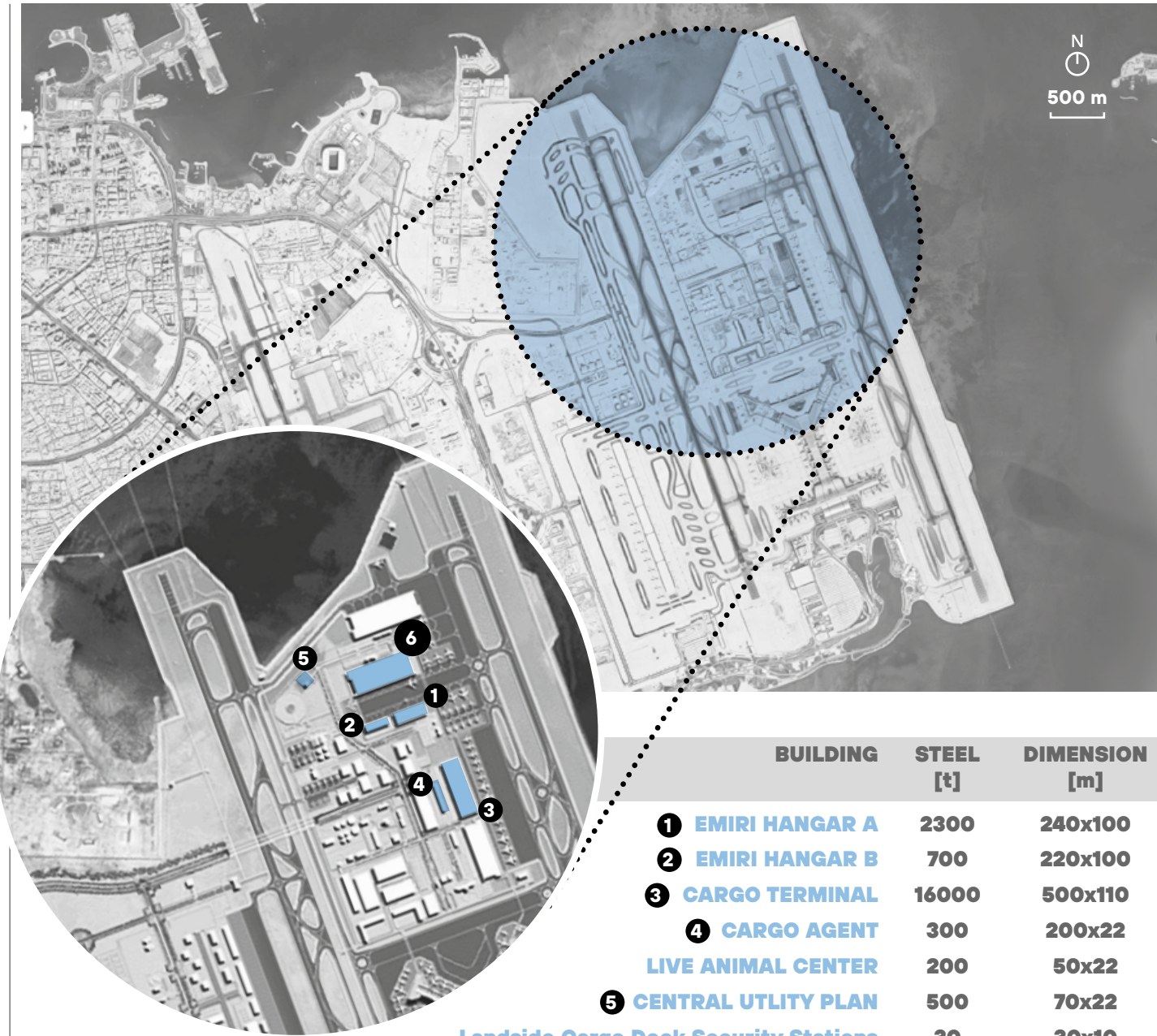
At its opening, the 350'000 m2 terminal was the largest building in Qatar, covering an area equal to 50 football fields.

Impressive preparatory work for the site involved the **movement of huge amounts of land to bury an area of sea** of about 15 square kilometres. This work began in 2003, with the construction of the protective barriers, and was completed in 2006, with the start of the ground works.

The Departure and Transit Terminal is the main terminal at Doha International Airport and handles all Qatar Airways economy class flights, as well as all other airlines using the airport. This terminal has been expanded several times in order to cope with the increasing number of passengers passing through the airport each year. The terminal has 44 gates and a large duty-free area and was expanded to take over the old arrivals area with the opening of the new Arrivals Terminal. From that day on, all departing and transit passengers use this facility, while arriving passengers in Doha use the new Arrivals Terminal.

2 Gli interventi della ADCC JV

The interventions of the ADCC JV



▲ In alto foto aerea del complesso aeroportuale con dettaglio sulle area di intervento
Top aerial photo of the airport complex with details of the area of intervention

	BUILDING	STEEL [t]	DIMENSION [m]
1	EMIRI HANGAR A	2300	240x100
2	EMIRI HANGAR B	700	220x100
3	CARGO TERMINAL	16000	500x110
4	CARGO AGENT	300	200x22
	LIVE ANIMAL CENTER	200	50x22
5	CENTRAL UTILITY PLAN	500	70x22
	Landside Cargo Dock Security Stations	30	30x10
	Pedestrian Entry Security Station	30	30x10
	Security Exit Station	30	20x10
6	AIRCRAFT MAINTENANCE HANGARS	21000	500x190
	Hazardous Goods Storage	250	50x22
	Chilled Water Building	300	100x22
	TOTAL	41640	

Gruppo di lavoro e coordinamento progettuale

Incide Engineering, in collaborazione con Ghafari Associates di Chicago (che ha curato la progettazione generale), ha svolto la progettazione delle strutture metalliche degli edifici facenti parte dei Contract Package CP-11 e CP-26, acquisiti dalla Joint Venture costituita da AKTOR (Grecia), Cimolai Spa (Pordenone), Al Darwish (Emirates), Cybarco (Cipro), per un **ammontare complessivo di oltre 1'000 milioni di dollari**.

I due contratti acquisiti dalla Joint Venture hanno compreso le seguenti infrastrutture, per un totale di circa **40'000 ton di carpenteria progettata**, nel periodo 2007-2009.

Tempistiche e fasi progettuali

Il progetto è stato completato nella fase approvata verso il cliente in 6 mesi ed articolato nelle fasi sotto riportate:

Working Group and Project Coordination

Incide Engineering, in collaboration with Ghafari Associates of Chicago (which handled the general design), carried out the design of the metal structures of the buildings included in Contract Packages CP-11 and CP-26, acquired by the Joint Venture formed by AKTOR (Greece), Cimolai Spa (Pordenone), Al Darwish (Emirates), and Cybarco (Cyprus), for a **total amount of over 1'000 million dollars**.

The two contracts acquired by the Joint Venture included the following infrastructures, for a total of approximately **40'000 tons of designed carpentry**, in the period 2007-2009.

Timeframe and Project Phases

The project was completed in the approved phase to the client in 6 months and consisted of the following phases:



Gruppo di progettazione Design Group:



3 L'Hangar di manutenzione aerei

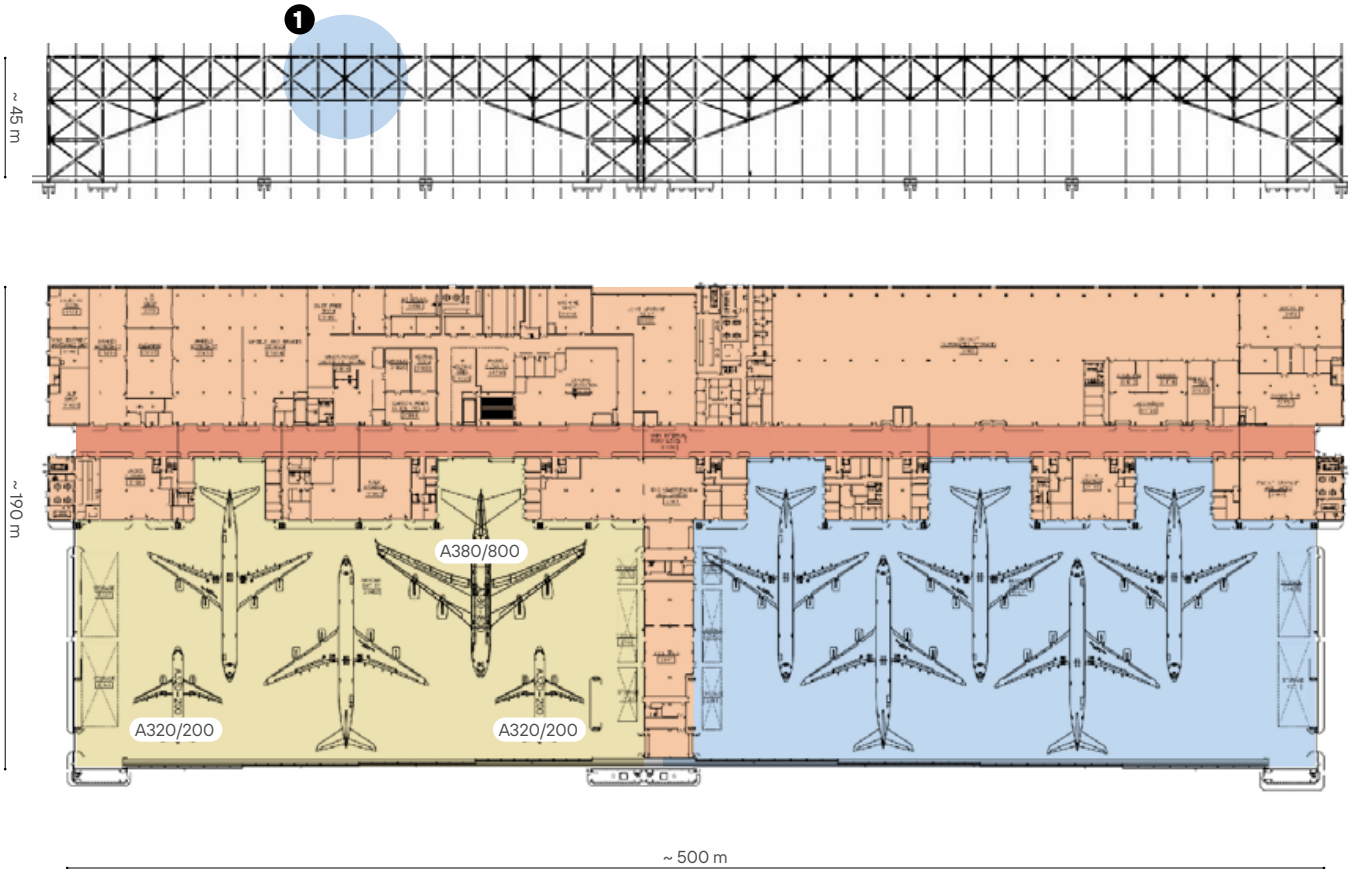
The Aircraft Maintenance Hangar

L'Aircraft Maintenance Hangar Facility è il centro di manutenzione principale della flotta internazionale della Qatar Airway's. Esso è in grado di ospitare contemporaneamente fino a **8 velivoli di grandi dimensioni e 4 di taglia piccola, comprese due posizioni per il superjumbo Airbus 380's.**

L'infrastruttura è composta da **due hangar affiancati** e progettati al fine di dare la maggiore flessibilità per il rimessaggio dei velivoli e, al tempo stesso, per garantire la massima efficienza alla manutenzione degli stessi, denominati rispettivamente **Larger e Smaller Hangar**, di larghezza totale 220 e 260 metri (luci nette portoni 180 e 220 metri) per circa 100 metri di profondità, con 5 appendici per ospitare la coda dei velivoli di dimensioni 40x20 metri. Agli hangar si affianca nella parte posteriore il **Workshop Building**, destinato ad ospitare i magazzini, i laboratori, gli uffici, e tutti i servizi generali dell'infrastruttura a supporto delle attività di manutenzione, di dimensione 510 x 70 metri, su 5 livelli. Il centro sarà fornito di piani ammezzati per l'accesso diretto ai piani di manutenzione dei velivoli.

The Aircraft Maintenance Hangar Facility is the main maintenance centre for Qatar Airway's international fleet. It can simultaneously accommodate up to **eight large and four small aircraft, including two positions for the Airbus 380's superjumbo.**

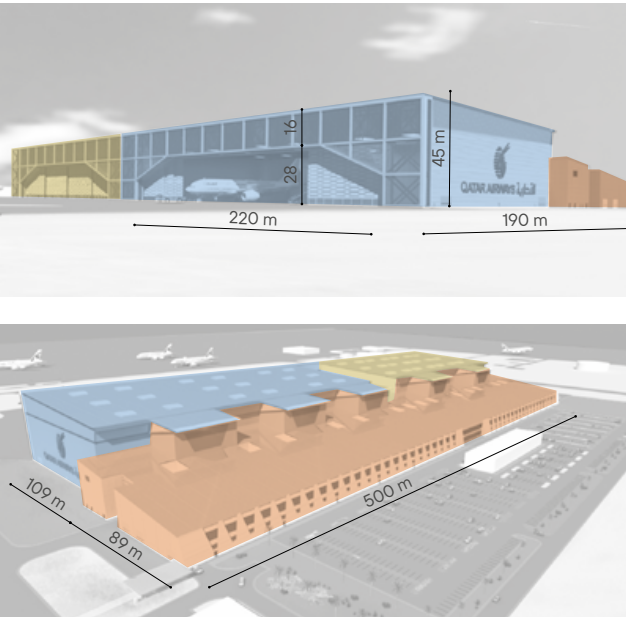
The infrastructure is made up of **two hangars placed side by side** and designed to give the greatest flexibility for the storage of aircraft and, at the same time, to guarantee maximum efficiency for their maintenance, called **Larger and Smaller Hangars** respectively, with a total width of 220 and 260 metres (net door spans of 180 and 220 metres) and a depth of about 100 metres, with 5 appendages to house the tail of the aircraft measuring 40x20 metres. The hangars are flanked at the rear by the **Workshop Building**, destined to house warehouses, laboratories, offices, and all the general infrastructure services to support maintenance activities, measuring 510 x 70 metres, on 5 levels. The centre will be provided with mezzanine floors for direct access to the aircraft maintenance floors.



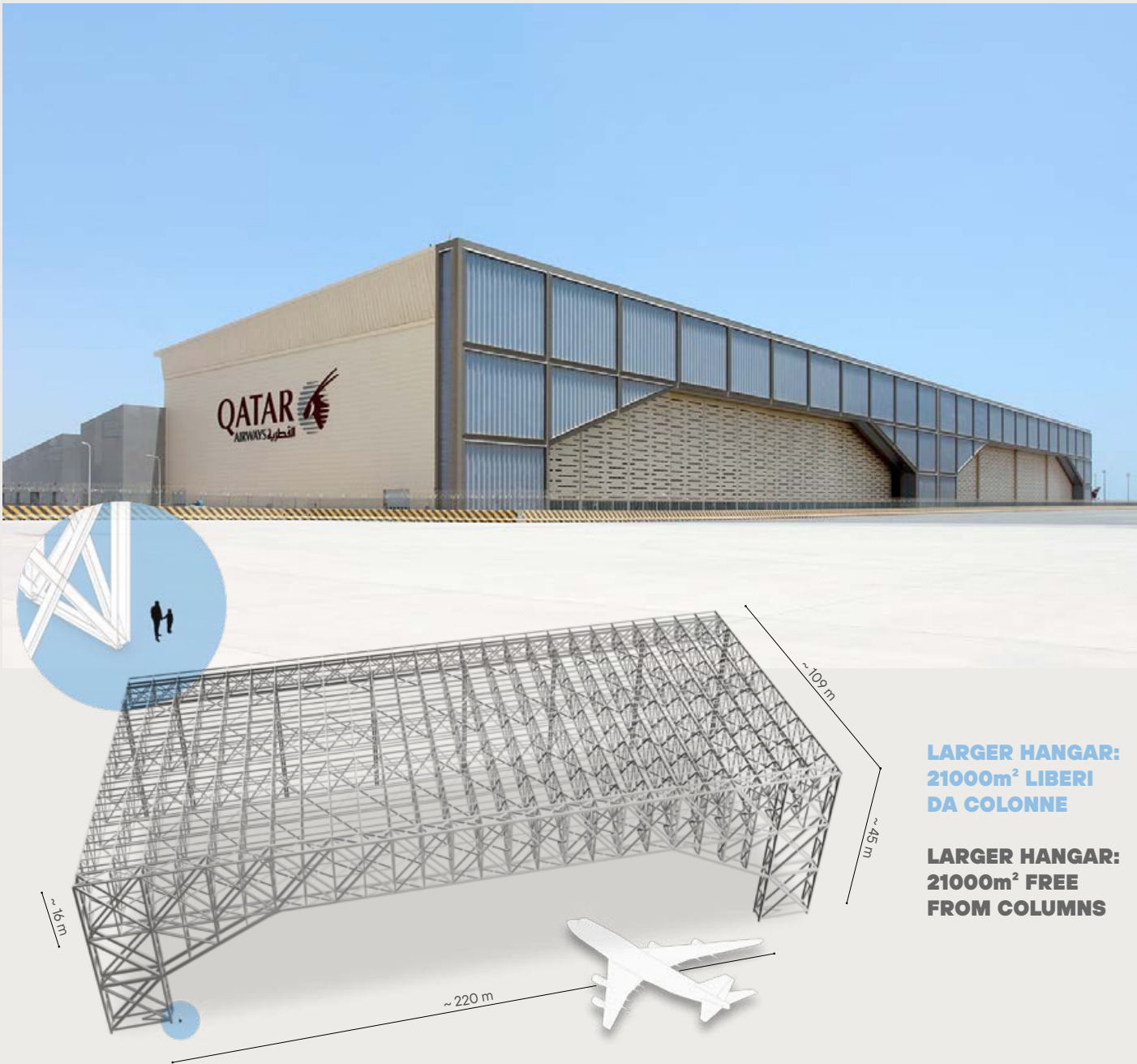
- Smaller hangar
- Larger hangar
- Workshop
- Internal road



► Fasi costruttive di un arcareccio in reticolare spaziale. Si notino le dimensioni enormi rispetto alle tradizionali carpenteie metalliche.
Construction stages of a spatial lattice purlin. Note the enormous dimensions compared to traditional metalwork.



- PLAN DIMENSIONS 190x510 m
- COVERED AREA 70'000 mq
- ROOF AREA 91'200 mq
- LARGE HANGAR FREE LIGHT 260 m (220 INTERNAL PORTAL)
- SMALLER HANGAR FREE LIGHT 220 m (180 INTERNAL PORTAL)
- INTERNAL HANGAR HEIGHT 32,25 m
- AIRCRAFT CAPACITY 8 WIDE BODY, 4 NARROW BODY, 2 A380
- GATE HEIGHT 27,2 M
- PORTAL LENGTH 400 m
- MAIN TRUSS HEIGHT 16 m
- SECONDARY BEAM HEIGHT 6/12m



**LARGER HANGAR:
21000m² LIBERI
DA COLONNE**

**LARGER HANGAR:
21000m² FREE
FROM COLUMNS**

◀ Maintenance hangar ad opera conclusa e rapporto dimensionale tra struttura dello Larger Hangar e figura umana.
Maintenance hangar when completed and dimensional relationship between the Larger Hangar structure and the human figure..

► Fasi di cantiere: montaggio e collaudo dei portoni scorrevoli.
Construction site phases: assembly and testing of sliding gates.



4 Il Progetto sviluppato da Incide

The Project developed by Incide

Incide Engineering è stata incaricata di sviluppare il **progetto esecutivo, delle strutture metalliche di tutto il complesso Aircraft Maintenance Hangar**, comprensivo degli Hangar, delle strutture del Workshop e degli edifici accessori minori. L'incarico ha previsto lo sviluppo del progetto posto a base di gara, con i seguenti vincoli non modificabili: • Mantenimento della configurazione geometrica base • Dimensioni in pianta • Luci libere • Altezza utile sotto catena e altezza utile portoni • Mantenimento dei requisiti funzionali dei carroponti sospesi.

Scopo dell'incarico è stato lo sviluppo della soluzione esecutiva, con identificazione delle **soluzioni costruttive più idonee**, e delle modifiche alle impostazioni progettuali del progetto di gara, lo sviluppo delle **connessioni nodali**, e lo studio delle **interfacce con le strutture di fondazione e con le strutture in calcestruzzo del workshop**. Il progetto è stato sviluppato dai seguenti dati di input forniti dal cliente: • Dati generali sui carichi progettuali da utilizzare e normative di riferimento • Geometria dell'edificio • Requisiti funzionali

Sulla base di tali dati si sono identificati i carichi base di progetto, definiti i carichi da applicare alla struttura, sviluppati i modelli ad elementi finiti per l'analisi generale degli edifici, identificate le azioni trasmesse alle fondazioni, scelti gli elementi strutturali da utilizzare e progettati i collegamenti ed i particolari costruttivi.

Incide Engineering was appointed to develop the **executive design, of the metal structures of the entire Aircraft Maintenance Hangar complex**, including the Hangars, the Workshop structures and the minor accessory buildings. The assignment provided for the development of the project put out to tender, with the following non-modifiable constraints • Retention of the basic geometric configuration • Plan dimensions • Clear span • Useful height under chain and useful door height • Maintaining the functional requirements of overhead cranes.

The purpose of the assignment was the development of the executive solution, with the identification of **the most suitable construction solutions**, and modifications to the design settings of the tender project, the development of the **nodal connections**, and the study of the **interfaces with the foundation structures and the concrete structures of the workshop**. The design was developed from the following input data provided by the client: • General data on the design loads to be used and reference standards • Building geometry • Functional requirements.

On the basis of this data, the basic design loads were identified, the loads to be applied to the structure were defined, the finite element models for the general building analysis were developed, the actions transmitted to the foundations were identified, the structural elements to be used were chosen, and the connections and construction details were designed.



Metodologia progettuale adottata

Il nostro incarico non prevedeva la produzione dei disegni d'ufficio, lavoro che è stato successivamente sviluppato dall'ufficio tecnico Cimolai, e quindi le tecnologie progettuali da adottare potevano essere anche le più tradizionali, in modalità cioè bidimensionale. La nostra società da tempo ha scelto di **operare nell'ambito dei progetti di carpenteria metallica in modalità 3D**, mediante l'utilizzo del programma *Tekla*, che consente di risolvere in modo veloce ed intelligente tutte le problematiche legate alla progettazione in acciaio. Un modello 3D, consente infatti, di evidenziare le problematiche nello spazio, avere il diretto controllo dei pesi e dei baricentri (aspetto particolarmente importante per gli studi di montaggio), avere in tempo reale disegni d'assieme e di dettagli e, se richiesto, avere la completa produzione dei disegni d'officina.

In questo specifico caso la complessità delle problematiche affrontate, non tanto dovuta dalla geometria ma soprattutto delle giunzioni, che hanno visto risolvere situazioni con **nodi con 12 aste** provenienti da varie direzioni dello spazio con ingombri geometrici rilevanti, ci ha spinto verso un approccio tridimensionale. Tale scelta progettuale è stata estremamente soddisfacente in quanto ha permesso di:

- **individuare sin da subito le difficoltà geometriche**, e risolvere situazioni particolarmente complesse;
- **portare all'attenzione del costruttore le problematiche per trovare insieme la soluzione costruttiva**, che meglio si sposasse con le sue tecnologie di produzione;
- **analizzare e proporre** al cliente in modo appropriato, professionale e semplice da capire (e quindi da poter essere valutate), **soluzioni alternative** al progetto del tender soggette all'approvazione dei vari enti di verifica.

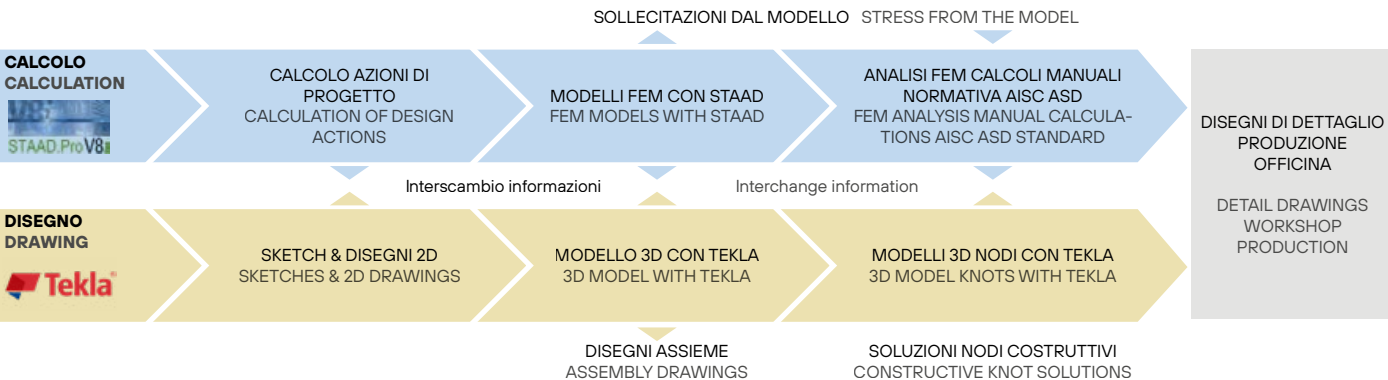
Design methodology adopted

Our assignment did not include the production of workshop drawings, which was subsequently developed by Cimolai's technical department, and therefore the design technologies to be adopted could also be the more traditional ones, i.e. in two-dimensional mode. For some time now, our company has chosen to **operate in the field of metal carpentry projects in 3D mode**, through the use of the Tekla programme, which allows us to quickly and intelligently solve all the problems associated with steel design. A 3D model, in fact, makes it possible to highlight problems in space, to have direct control of weights and centres of gravity (a particularly important aspect for assembly studies), to have assembly and detail drawings in real time, and if required, to have the complete production of workshop drawings.

In this specific case, the complexity of the problems faced, not so much due to the geometry but especially of the joints, which involved solving situations with **nodes with 12 rods** coming from various directions in space with significant geometric encumbrances, pushed us towards a three-dimensional approach. This design choice was extremely satisfactory as it allowed us to

- **identify geometric difficulties early on**, and solve particularly complex situations;
- **bring the problems to the manufacturer's attention in order to find together the construction solution** that best matched its production technologies;
- **analysing and proposing** to the client, in an appropriate, professional and easy-to-understand (and therefore easy to evaluate) manner, **alternative solutions** to the tender design subject to the approval of the various verification bodies.

▼ Fasi dell'elaborazione di progetto e ciclo progettuale Project development phases and project cycle



4

Criteri generali adottati

PROGETTO IN ACCORDO ALLE NORME AMERICANE
DESIGNED IN ACCORDANCE WITH AMERICAN STANDARDS

Building code: IBC 2003/ ASCE 7 02
Steel: AISC ASD 9A EDITION
Concrete: ACI 318M 02 /ACI 336.1/ ACI 336.3R/ACI 360R

PESI PROPRI STRUTTURALI E PESI PORTATI
STRUCTURAL SELF-WEIGHT AND BORNE WEIGHTS

The self-weight of the structure 78.5 KN/m³
The self-weight of the reinforced concrete 25.0 KN/m³
The dead loads of the roof:
Roofing and insulation 0.4 KN/m²
Cladding for the facades 0.4 KN/m²
Sky lights 300 KN/piece
Suspended ceiling be 0.25 KN/m²
Roof services 0.25 KN/m²
Floor uniform additional load on Workshop 0.5 KN/m²

SABBIA DISTRIBUITA ED ACCUMULO
DISTRIBUTED AND ACCUMULATED SAND

Sand accumulation A>100 m² = 0.1 KN/m²
Sand accumulation A≤100 m² = 1.2 KN/m²

SOVRACCARICHI IN COPERTURA
OVERLOAD IN THE ROOF (according to ASCE 7-02 Section 4.9)

Live loads min value 0.58 KN/m² max value 0.96 KN/m²
Lr= 0,96 R1R2 where 0,58 ≤ Lr ≤ 0,96

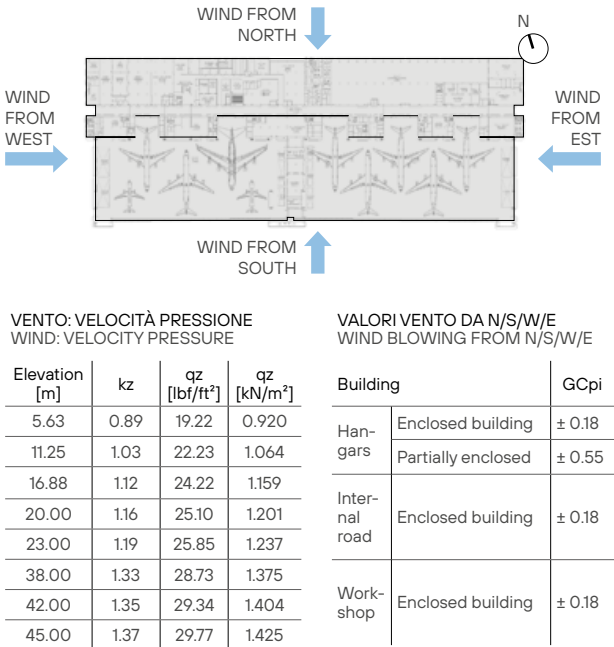
VENTO coefficiente maggiore
WIND major coefficients (according to ASCE 7-02/IBC2003)

Basic wind speed: V = 42 m/sec 3 sec gust
Building importance factor I = 1.15
Site exposure: category C
Kzt = 1 (topographic factor)
Kz = var
Kd = 0.85 (wind directionality factor)
G = 0.85

LIMITI DI DEFORMABILITÀ DEFORMATION LIMITS

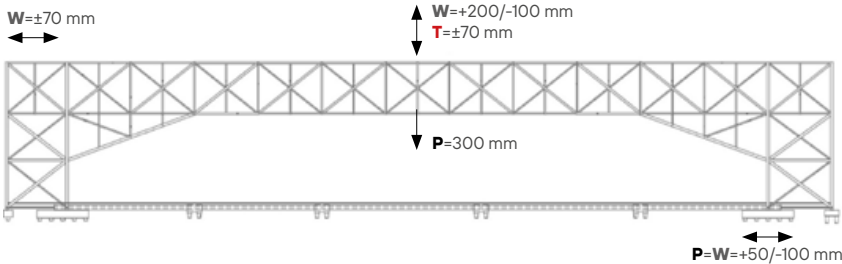
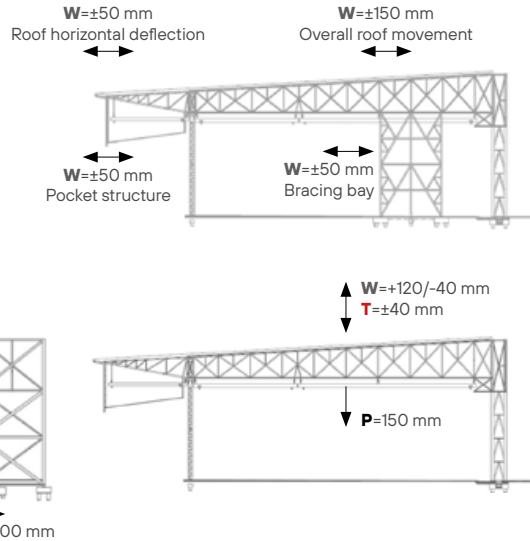
Deformability limit for main beam: L/1000

▼ Sono state analizzate 20 diverse condizioni di vento
20 different wind conditions were analysed



▼ Limiti di deformabilità della struttura in acciaio.
Deformability limits of the steel structure of Hangars

W = WIND T = TEMPERATURE P = PERMANENT LOADS



General criteria adopted

IL SISTEMA DEI CARROPONTI SOSPESI

Tre diversi carroponti sono presenti in corrispondenza della sezione trasversale dell'hangar. Si tratta di due carroponti da 15 t presenti nell'area di manutenzione principale, di cui uno a due campate ed uno a campata singola, e un carroponte presente nella parte posteriore, da 2,5 t.

Essendo la struttura del tetto soggetta a spostamenti verticali e orizzontali massimi dell'ordine dei 100 mm l'operatività dei carroponti è stata limitata a condizioni di vento di velocità inferiore ai 70 km/h.

Le vie di corsa sono state progettate in modo da non risultare collaboranti alla struttura del tetto, e il sistema di sospensione delle vie di corsa è stato anch'esso progettato in modo che il sistema delle vie di corsa nel suo complesso risultasse isostatico, in modo anche da non risentire delle deformazioni dovute alle dilatazioni termiche.

La massima deformazione verticale tra i punti di supporto di due vie di corsa adiacenti, nella direzione laterale è < L/600, dove L è la distanza tra due vie di corsa.

THE OVERHEAD CRANE SYSTEM

Three different overhead cranes are present in the cross section of the hangar. These are two 15-tonne overhead cranes in the main maintenance area, one with two spans and one with a single span, and a 2.5-tonne overhead crane at the rear.

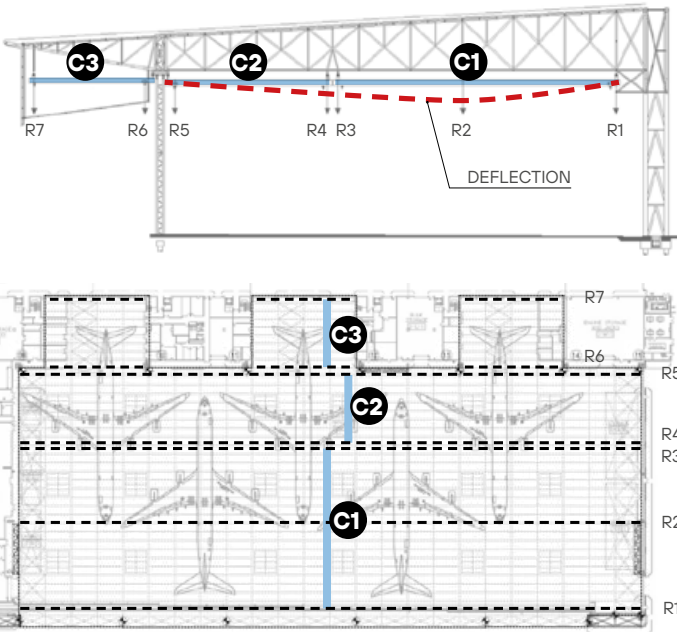
Since the roof structure is subject to maximum vertical and horizontal displacements in the order of 100 mm, the operation of the overhead cranes was limited to wind speeds of less than 70 km/h.

The travel ways were designed so that they would not cooperate with the roof structure, and the travel way suspension system was also designed so that the travel way system as a whole would be isostatic, also so that it would not be affected by deformations due to thermal expansion.

The maximum vertical deformation between the support points of two adjacent raceways, in the lateral direction, is < L/600, where L is the distance between two raceways.

▼ Sezione trasversale e vista superiore del Larger Hangar con la posizione dei tre carroponti.

Cross section and top view of the Larger Hangar with the position of the three gantries.



C1 Carroponte a doppia trave con capacità di gancio di 15 t a due campate (sbalzo 0,65 m - campata 30 m - campata 24 m - sbalzo 1,0 m), sospesa alle travi della pista R1, R2, R3. Double girder crane with 15 t hook capacity with two spans (overhang 0.65m, span 30m, span 24m, overhang 1.0m), suspended from runway beams R1,R2,R3.

C2 Carroponte a doppia trave con capacità di gancio di 15 t con una sola campata di 31m. Double girder crane with 15 t hook capacity, with a single span of 31m.

C3 Carroponte a trave singola con capacità di gancio di 2 t, per ciascuna tasca, con una campata di 23m. Single girder crane with 2 t hook capacity, for each pocket, with a single span of 23m.

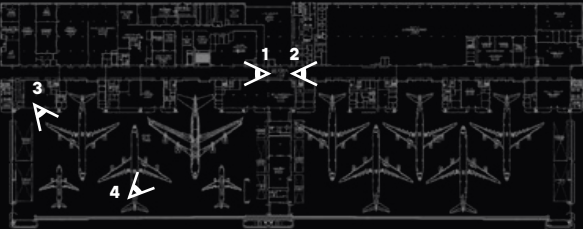
LIMITI DI DEFORMABILITÀ CARROPONTI OVERHEAD
CRANE DEFORMABILITY LIMITS

Rails	Rails distance L [m]	Limit L/600 [mm]
R1-R2	30	50.0
R2-R3	24	40.0
R4-R5	31	51.7
R6-R7	23	38.3

LA VIABILITÀ INTERNA TRA L'HANGAR E LE OFFICINE GARANTISCE UNA RAPIDA MOVIMENTAZIONE DEI PEZZI DI RICAMBIO E DEI COMPONENTI NECESSARI



▲ Viste interne a lavori ultimati del corridoio carraio tra gli Hangars ed il workshop.
Completed internal views of the driveway corridor between the Hangars and the workshop.



THE INTERNAL ROAD SYSTEM BETWEEN THE HANGAR AND THE WORKSHOPS ENSURES THE RAPID MOVEMENT OF SPARE PARTS AND NECESSARY COMPONENTS



► Viste interne Hangar a lavori compiuti. Evidenziati nelle immagini i carroponti appesi alla struttura di copertura:
Interior views of the Hangar after the work was completed. Highlighted in the pictures are the gantries hanging from the roof structure:

- C1 Carroponte a doppia trave 15 t.
Double girder crane with 15 t.
- C2 Carroponte a doppia trave 15 t.
Double girder crane with 15 t.
- C3 Carroponte a trave singola 2 t.
Single girder crane with 2 t.

5 Il Metodo di montaggio

The assembly method

Il metodo di montaggio previsto per l'hangar, sviluppato direttamente dall'ufficio tecnico Cimolai, merita di essere citato, in quanto esso ha condizionato le scelte del progetto esecutivo.

La struttura della copertura di ogni singolo hangar è stata pensata **assemblata completamente a terra**, e successivamente **sollevata mediante l'utilizzo di strand-jack**. La copertura del Larger Hangar (l'hangar di maggiori dimensioni) utilizza come punti di sollevamento le 4 colonne del portale principale, le sette colonne sul filo **G** posteriore, e due pile provvisorie aggiuntive sul fronte principale **Q** per un peso totale sollevato di circa 9000 t.

Questa metodologia ha richiesto un progetto totalmente indipendente che tenesse conto di carichi di progetto diversi legati alle azioni del vento con periodi di ritorno minori, e che valutasse le azioni sulla struttura e sulle fondazioni in tutte le sue fasi per fare in modo che al momento del collegamento della copertura alle strutture definitive non vi fossero nella struttura tensioni residue.

Inoltre il progetto di montaggio ha condizionato il progetto esecutivo, ed entrambi hanno richiesto aggiustamenti reciproci, in quanto le azioni indotte sulle strutture definitive nelle fasi transitorie, si sono verificate in alcuni casi maggiori o opposte a quelle ipotizzate.

► Larger Hangar - Schema della struttura del tetto montata a terra e punti di sollevamento con strand-jack e fasi di montaggio della copertura a terra

Larger Hangar - Schematic of ground-mounted roof structure and lifting points with strand-jack and ground cover installation steps

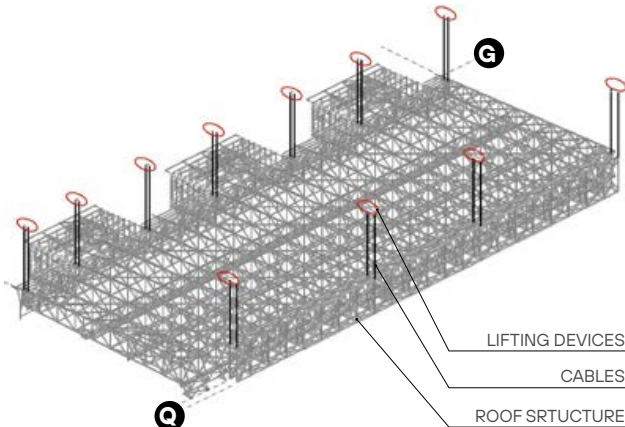


The assembly method envisaged for the hangar, developed directly by Cimolai's technical department, deserves to be mentioned, as it conditioned the executive design choices.

The roof structure of each hangar was designed to be **assembled completely on the ground**, and then **raised by means of strand-jacks**. The roof of the Larger Hangar uses the four columns of the main gantry, the seven columns on the rear **G**, and two additional temporary piles on the main front **Q** as lifting points, for a total lifted **weight of approximately 9000 t**.

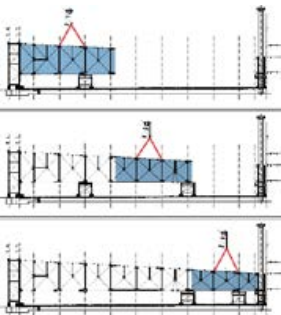
This methodology required a totally independent design that took into account different design loads related to wind actions with shorter return periods, and that evaluated the actions on the structure and foundations at all stages to ensure that when the roof was connected to the final structures, there were no residual stresses in the structure.

Furthermore, the erection design conditioned the executive design, and both required mutual adjustments, as the actions induced on the definitive structures in the transitional phases were in some cases greater than or opposite to those assumed.



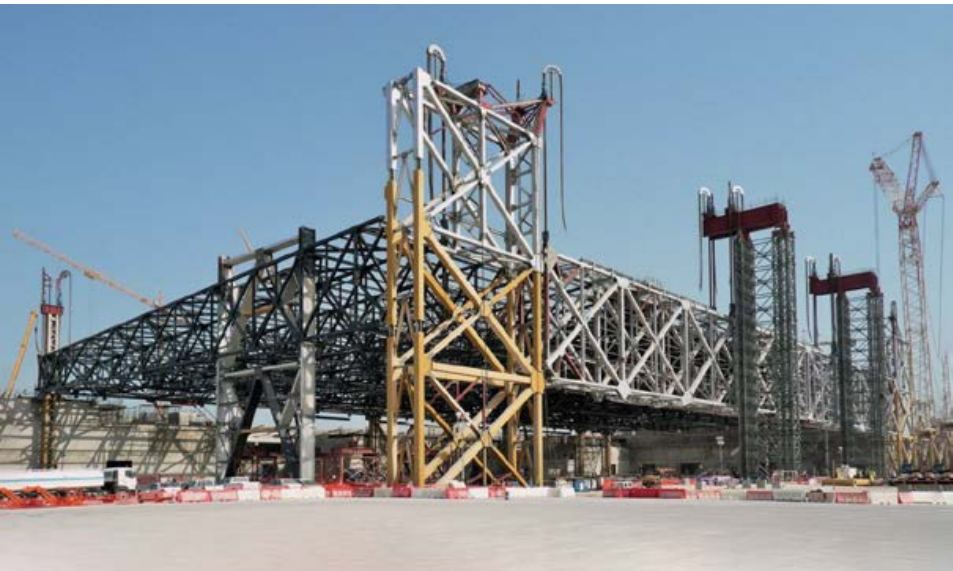
▼ Fasi di assemblaggio a terra delle travi secondarie

Ground assembly stages of secondary beams



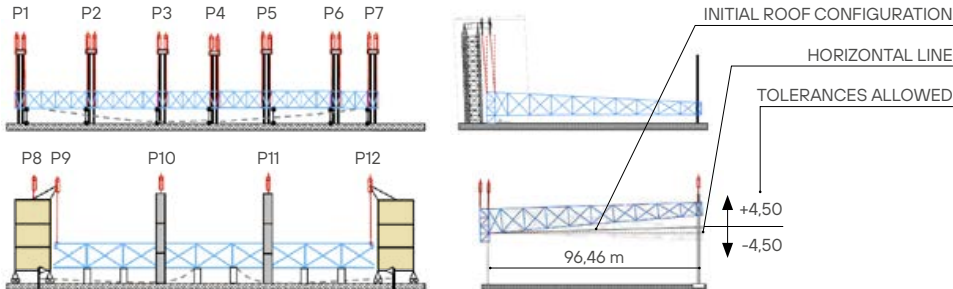
► Fasi di sollevamento della copertura dello Smaller Hangar

Smaller Hangar roof lifting phases



► Le torri temporanee sono montate fuori asse di 16 cm. Quando sono caricate, si defletteranno recuperando il fuori piombo nei trefoli.

The temporary towers are assembled out of plumb by 16cm. When the temporary towers are loaded, they will deflect by recovering the out-of-lead in the strands.



5

Trave reticolare del portone principale

Il portale principale con **funzione prevalentemente ad arco nella fase finale, durante le fasi di sollevamento determina delle inversioni nei segni delle sollecitazioni delle aste**. Per effetto di tali inversioni, in particolare in aste usualmente tese, le scelte fatte nel progetto definitivo sono state riviste, rinforzando o aumentando le sezioni scelte o controventandole dove necessario per contrastare gli effetti di instabilità.

Connessioni strutturali del portone principale

Le azioni indotte dal montaggio hanno inoltre comportato un completo controllo e irrobustimento di alcuni particolari dei collegamenti delle aste tubolari. Per tali aste, compresse nello schema definitivo ma tese durante il sollevamento, sono state scelte **sezioni tubolari per ottimizzarne la sezione**, e i loro collegamenti in officina sono stati realizzati mediante **flange a contatto**. Tali unioni che lavorano molto bene per sollecitazioni di compressione, attraverso il trasferimento diretto delle sollecitazioni tra le superfici delle flange alle sezioni (le flange sono state lavorate in macchina al fine di garantire tale contatto), nel caso di sollecitazioni di trazione si innescano sollecitazioni flessionali nelle flange che ne hanno comportato l'incremento di spessore (si sono utilizzati spessori fino a 85mm) e l'aumento del numero e della sezione dei bulloni (si sono usati *bulloni classe 10.9 sino al M33*).

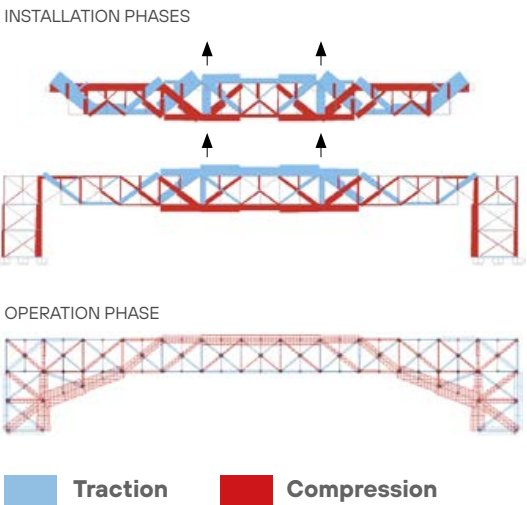
Alcune connessioni sono state studiate appositamente per permettere il collegamento del tetto alle colonne del portale, dopo il suo sollevamento, **collegamenti pensati appositamente per lavorazioni ed aggiustamenti da farsi in quota**. Queste connessioni sono state progettate al fine di permettere il sollevamento della copertura lasciando una luce libera di 200 mm poi colmata mediante particolari costruttivi speciali.



LE SOLLECITAZIONI INDOTTE NELLA STRUTTURA DURANTE LE OPERAZIONI DI MONTAGGIO SONO DIVERSE DA QUELLE IN ESERCIZIO PER LA PRESENZA DELLE PILE PROVVISORIE CHE PRODUCONO SCHEMI STATICI DIFFERENTI

▼ Portale principale - Sollecitazioni durante il sollevamento ed il collegamento alle colonne ed in basso durante l'esercizio.

Main portal - Stresses during lifting and connection to columns and at the bottom during operation.



▼ Fasi di montaggio del portale principale.

Main portal assembly stages.



THE STRESSES INDUCED IN THE STRUCTURE DURING ASSEMBLY OPERATIONS ARE DIFFERENT FROM THOSE IN OPERATION DUE TO THE PRESENCE OF THE TEMPORARY PILES, WHICH PRODUCE DIFFERENT STATIC PATTERNS

Door Truss Beam - Main Portal

The main portal with its **predominantly arched function in the final phase causes inversions in the stress signs of the rods during the lifting phases**. As a result of these inversions, particularly in rods that are usually tensioned, the choices made in the final design have been revised, reinforcing or increasing the chosen sections or bracing them where necessary to counteract the effects of instability.

Main Portal Frame Connections

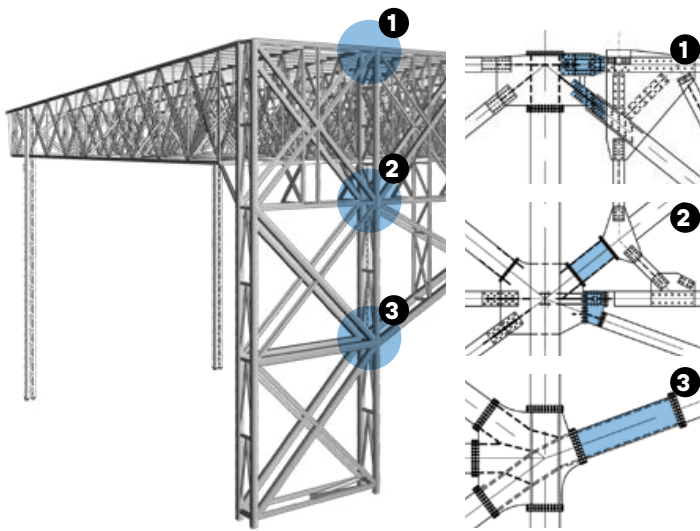
The actions induced by the assembly also entailed a complete check and strengthening of certain details of the connections of the tubular rods. For these rods, compressed in the final layout but tensioned during lifting, **tubular sections were chosen to optimise their cross-section**, and their connections in the workshop were made using **contact flanges**. These unions work very well for compressive stresses, through the direct transfer of stresses between the flange surfaces to the sections (the flanges were machined to ensure this contact), in the case of tensile stresses, flexural stresses are triggered in the flanges, which led to an increase in thickness (thicknesses of up to 85mm were used) and an increase in the number and cross-section of the bolts (class 10.9 bolts up to M33 were used).

Some connections have been specially designed to allow the roof to be connected to the portal columns after it has been raised, **connections designed specifically for work and adjustments to be made at height**. These connections have been designed to allow the roof to be raised, leaving a free span of 200 mm, which is then filled in with special construction details.



▼ Collegamenti studiati appositamente per le delicate operazioni di fine sollevamento.

Specially designed connections for delicate end-lifting operations.



Durante il montaggio le colonne hanno luce libera di inflessione doppia e sono soggette ad effetti P-Δ non trascurabili. I nodi di collegamento fra colonne principali e trave reticolare frontale sono stati studiati in funzione delle tolleranze necessarie per il montaggio, le dilatazioni termiche e gli spostamenti indotti dal vento.

During assembly, the columns have twice the deflection clearance and are subject to non-negligible P-Δ effects. The connection nodes between the main columns and the front truss beam have been designed according to the tolerances required for assembly, thermal expansion and wind-induced displacements.



5

Colonne posteriori

Le colonne posteriori, che nel progetto esecutivo sono state dimensionate per carichi puntuali e con **luce libera di 32,25 m**, in quanto stabilizzate nelle due direzioni in sommità dal collegamento con la trave di banchina e il controvento inferiore di catena, nella fasi montaggio hanno uno schema statico completamente differente per la luce libera di inflessione doppia e per gli effetti del secondo ordine non trascurabili indotti dai grandi spostamenti della testa delle colonne.

Le colonne sono state pertanto **dimensionate soprattutto per i carichi e i fenomeni di instabilità dei carichi delle fasi transitorie di montaggio**. Tale scelta è stata modificata rispetto al progetto di gara nel quale le tecniche ipotizzate di sollevamento prevedevano di “guidare” il tetto attraverso martinetti in appoggio sulle colonne che avevano anche la funzione di stabilizzarlo.

La scelta finale è stata quella, invece, di sollevare il tetto in una condizione di assoluta “libertà” dagli elementi verticali presenti, utilizzando cavi pretensionati per la stabilità del tetto, ove risultasse necessario.



▼ *Veduta aerea di cantiere in fase di scavo e gettata delle fondazioni.*
Aerial view of site during excavation and foundation casting.



◀ *Viste generali dell'area e installazione e avanzamento lavori delle colonne posteriori adiacenti all'area workshop.*
General views of the area and installation and progress of the rear columns adjacent to the workshop area.

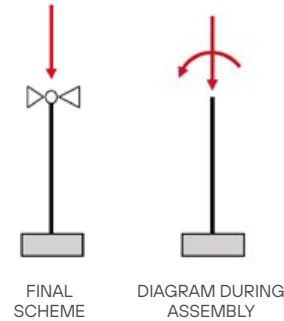


Rear columns

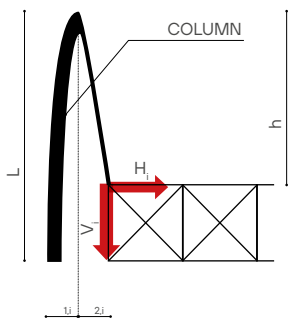
The rear columns, which in the executive design were dimensioned for point loads and with a **free span of 32.25 m**, as they were stabilised in the two directions at the top by the connection with the dock girder and the lower chain brace, in the erection phases have a completely different static scheme due to the double free span and the non-negligible second-order effects induced by the large displacements of the column heads.

The columns were therefore **dimensioned primarily for the loads and buckling phenomena of the transient assembly phases**.

This choice was modified with respect to the tender project in which the hypothesised lifting techniques involved “guiding” the roof by means of jacks resting on the columns, which also had the function of stabilising it. Instead, the final choice was to lift the roof in a condition of absolute “freedom” from the vertical elements present, using pre-tensioned cables for roof stability where necessary.



Colonne posteriori: schema lunghezza libera di calcolo
Rear columns: free length calculation scheme



Colonne posteriori: schema dell'effetto del secondo ordine
Rear columns: second-order effect diagram

6 Comportamento strutturale

Structural behaviour

Lo Smaller ed il Larger hangar, identici nell'impostazione strutturale, si differenziano per la lunghezza della trave principale e per il passo delle colonne posteriori, condizionate dalla posizione delle baie operative.

Per questo motivo il progetto ha richiesto necessariamente di **individuare e analizzare in maniera distinta le due strutture**, poichè, eccetto le travi secondarie trasversali, uguali per i due hangar, le restanti strutture sono state dimensionate ad hoc, distintamente per entrambi gli edifici.

Dal punto di vista strutturale, gli hangar si compongono dei seguenti elementi principali:

- Portale principale e catena pretensionata**
- 1 Colonne posteriori e trave di banchina
 - 2 Travi secondarie
 - 3 Portali di controvento

Il sistema resistente verticale (gravity system) è costituito dal **portale principale con funzionamento ad arco a spinta eliminata** situato nella parte anteriore dell'hangar, dalle **colonne posteriori che sorreggono la trave di banchina** e dalle travi secondarie che collegano il portale con la trave di banchina posteriore. Il sistema orizzontale (lateral system) è costituito essenzialmente dai **tre Portali di controvento**, presenti sui lati corti e sul lato posteriore dell'hangar e dal **controvento di catena**, presente su tutta la superficie inferiore di falda dell'hangar.

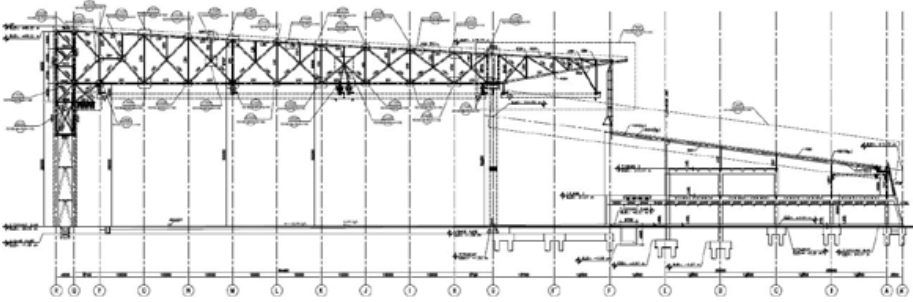
The Smaller and Larger hangars, identical in their structural layout, differ in the length of the main beam and the pitch of the rear columns, conditioned by the position of the operating bays.

For this reason, **the project necessarily required the two structures to be identified and analysed separately**, since, except for the secondary transverse beams, which are the same for both hangars, the remaining structures were dimensioned ad hoc, separately for both buildings.

From a structural point of view, the hangars are composed of the following main elements:

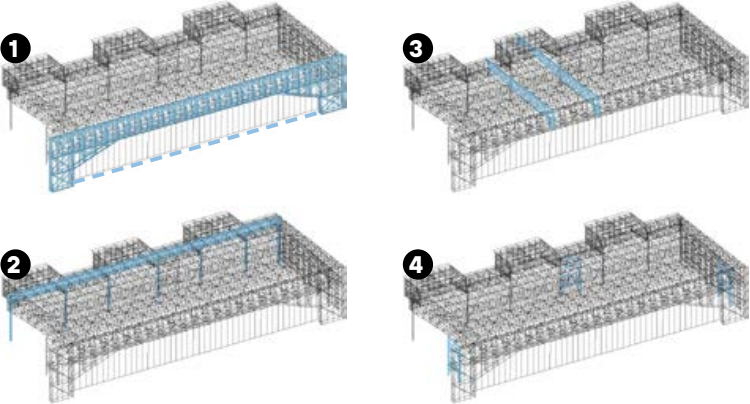
- 1 Main portal frame and tie-beam
- 2 Columns and truss on grid G
- 3 Secondary trusses
- 4 Vertical portal bracings

The vertical portal bracings (gravity system) consists of the **main portal with eliminated thrust arch operation** located at the front of the hangar, the **rear columns supporting the dock girder** and the secondary trusses connecting the portal with the rear dock girder. The horizontal system (lateral system) essentially consists of the **three upwind portals**, located on the short sides and the **rear side of the hangar**, and the chain upwind, which is present on the entire lower surface of the hangar.



▲ Archi principali con luce netta di 180 e 220 metri.
Main arches with a net span of 180 and 220 metres.

◀ Sezione trasversale estrapolata dalle tavole di disegno esecutive dell'Hangar e workshop.
Cross section extrapolated from the Hangar and workshop executive drawing boards.



◀ Larger Hangar: Portale Principale, Colonne posteriori con trave di banchina, Travi secondarie e Portali di controvento.
Larger Hangar: Main Portal, Rear Columns and truss, Secondary Trusses and Vertical portals bracings.

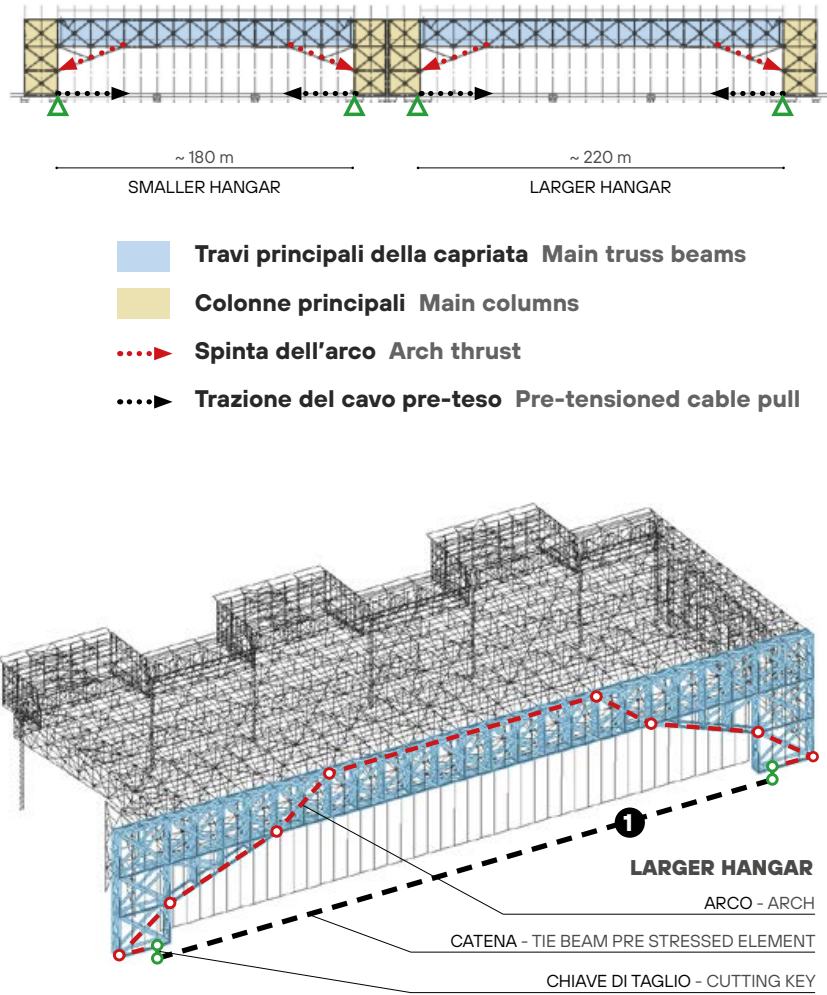
6.1 Il sistema resistente verticale

MAIN PORTAL FRAME E TIE-BEAM: I PORTALI PRINCIPALI

Il Portale principale, situato nella parte anteriore dell'hangar, ha un funzionamento strutturale misto: **a portale e ad arco a spinta eliminata**. Tale struttura reticolare è composta da due travi reticolari di altezza 16m e distanti 4 metri, collegate tra loro al fine di realizzare un **cassone rigido**, che permetta di ridistribuire i carichi verticali della copertura dalla parte interna dove si collegano le travi secondarie, all'insieme della travatura.

La scelta di avere una campata libera di 220x100metri ha comportato la risoluzione di particolari problematiche in termini di **azioni trasmesse alle fondazioni e di gestione delle dilatazioni termiche**. La spinta laterale indotta sulla fondazioni dal portale-arco raggiunge il valore massimo di circa 15000 kN, e viene eliminata mediante cavi metallici (catena) che collegano i due plinti presenti alle estremità, distanti 220m: in questo modo **i plinti stessi sono soggetti a una spinta orizzontale dovuta ai soli sovraccarichi variabili**, in quanto il tirante equilibra essenzialmente i carichi permanenti. La trazione nei cavi è indotta in più fasi, durante il rilascio della copertura successiva alla fase di sollevamento del tetto. La struttura in elevazione è collegata al plinto di fondazione mediante chiavi a taglio inghisate nel calcestruzzo. Il complesso sistema di collegamento della struttura in elevazione al plinto è riportato nel paragrafo successivo.

Per le aste del sistema ad arco, sono stati utilizzati profili tubolari della serie "Jumbo", con dimensioni variabili tra i 400x400x12mm ed i 800x800x60mm. Si sono scelti profili "Corus" ottenuti con processo di curvatura a caldo al fine di ridurre i residui plastici che si hanno con la sagomatura a freddo. L'approvvigionamento di queste particolari tipologie di sezioni ha richiesto una ricerca nel mercato mondiale: la fornitura è stata eseguita da una società giapponese.



▲ Portali principali, schema del funzionamento ad arco a spinta eliminata.
Main Gates, diagram of arch operation with thrust eliminated.

1 ▶ Tie beam larger hangar in fase di costruzione.
Tie beam larger hangar under construction.

The vertical resistant system

MAIN PORTAL FRAMES AND TIE-BEAM

The main portal frame, located at the front of the hangar, has a mixed structural operation: **portal and arch with eliminated thrust**. This truss structure is composed of two truss beams 16m high and 4m apart, connected to each other in order to create a **rigid box**, which allows the vertical loads of the roof to be redistributed from the inner part, where the secondary beams are connected, to the truss as a whole.

The decision to have a free span of 220x100 metres meant solving particular problems in terms of **actions transmitted to the foundations and the management of thermal expansion**. The lateral thrust induced on the foundations by the arch-gantry reaches a maximum value of about 15000 kN, and is eliminated by means of metal cables (chain) connecting the two plinths at the ends, 220m apart: in this way **the plinths themselves are subjected to a horizontal thrust due only to the variable**

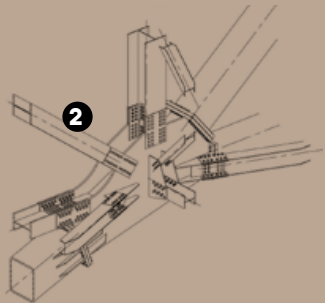
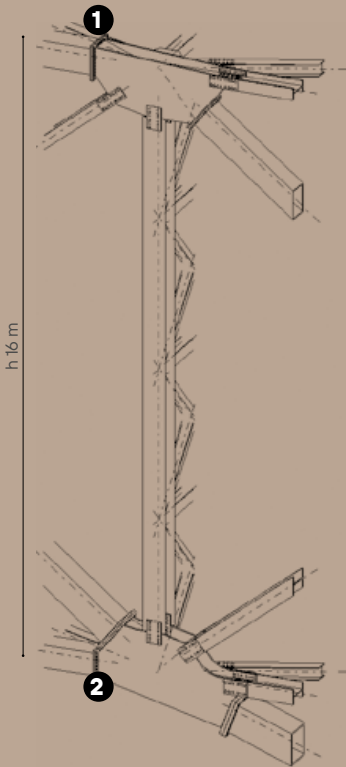
overloads, since the tie rod essentially balances the permanent loads. The tension in the cables is induced in several stages, during the release of the roof following the lifting phase of the roof. The elevated structure is connected to the foundation plinth by means of shear keys embedded in the concrete. The complex connection system of the elevating structure to the plinth is shown in the following paragraph.

For the posts of the arch system, tubular profiles of the "Jumbo" series were used, with dimensions varying between 400x400x12mm and 800x800x60mm. "Corus" profiles were chosen, obtained by a hot bending process in order to reduce the plastic residues that occur with cold shaping. The procurement of these particular types of sections required research in the world market: the supply was carried out by a Japanese company.



IL DIMENSIONAMENTO DELLE CONNESSIONI PIÙ COMPLESSE È STATO SVILUPPATO IN PARALLELO TRA MODELLI 3D E ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI, PORTANDO A SOLUZIONI OTTIMALI SIA DAL PUNTO DI VISTA STATICO, SIA DA QUELLO COSTRUTTIVO E DI MONTAGGIO.

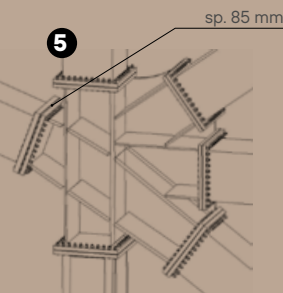
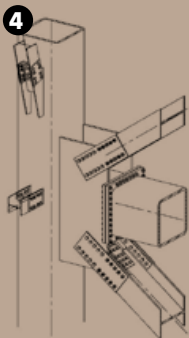
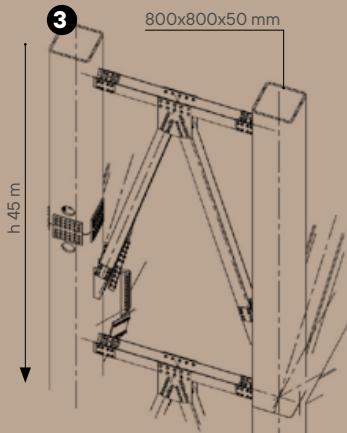
LO STUDIO DELLE CONNESSIONI IN FUNZIONE DELLE ESIGENZE DI MONTAGGIO HA PERMESSO DI RIDURRE I TEMPI DI MONTAGGIO A TERRA DELLE STRUTTURE A FRONTE DELL'ENORME QUANTITÀ DI MATERIALE.



◀ Fasi di montaggio della trave principale della capriata.
Assembly stages of the main truss beam.

THE DIMENSIONING OF THE CONNECTIONS MORE COMPLEX WAS DEVELOPED IN PARALLEL BETWEEN 3D MODELS USING AND FINITE ELEMENT ANALYSIS, LEADING TO OPTIMAL SOLUTIONS FROM BOTH THE STATIC POINT OF VIEW, THAT OF CONSTRUCTION AND ASSEMBLY.

THE STUDY OF THE CONNECTIONS ACCORDING TO THE MOUNTING NEEDS HAS ALLOWED REDUCED TIME OF ASSEMBLY TO THE GROUND OF THE STRUCTURES WHEN COMPARED WITH THE HUGE AMOUNT OF MATERIAL.



▲ Fasi di montaggio di una colonna del portale principale.
Assembly stages of a main portal column.

◀ Schema di assemblaggio del nodo più sollecitato dell'intera colonna.
Assembly diagram of the most stressed node of the entire column.

6.1

Il sistema base portale

Il sistema Base Portale, inteso come **insieme di dispositivi atti alla trasmissione dei carichi alle fondazioni**, è una delle zone più complesse dell'Aircraft Maintenance Hangar, sia per gli elevati carichi trasmessi che per le diverse necessità legate alle fasi di sollevamento e manutenzione: con *sistema* si intende un complesso articolato e coeso di componenti strutturali specifiche progettate per necessità ed esigenze prestazionali particolari. Lo sviluppo di questa parte della struttura ha comportato necessariamente l'**interscambio continuo di informazioni con il costruttore e con gli altri specialisti e consulenti** per le verifiche di costruibilità sia della parte di acciaio che della parte in calcestruzzo.

La progettazione del sistema base portale ha presupposto la conoscenza approfondita delle fasi di montaggio, della fase operativa e delle fasi di manutenzione.

• **Fasi di montaggio:** durante la sequenza di sollevamento della copertura le quattro colonne che costituiscono la base del portale e che vengono utilizzate come punti di sollevamento, richiedono la possibilità di gestire spostamenti longitudinali di $\pm 120\text{mm}$ e spostamenti trasversali di $\pm 70\text{mm}$ sotto carico (valori comprensivi di imprecisioni di esecuzione delle opere di fondazione e spostamenti richiesti per il sollevamento della struttura). Date le dimensioni rilevanti è stato inoltre richiesto dal costruttore che, durante il sollevamento, si potesse far ruotare le colonne principali al fine di far coincidere la copertura con le colonne stesse. La non trascurabile entità degli spostamenti è anche ovviamente direttamente proporzionale con le tolleranze costruttive previste per luci così elevate.

• **Fase operativa:** durante la fase operativa il sistema Base Portale deve essere

in grado di permettere il comportamento "arco-tirante" descritto precedentemente;

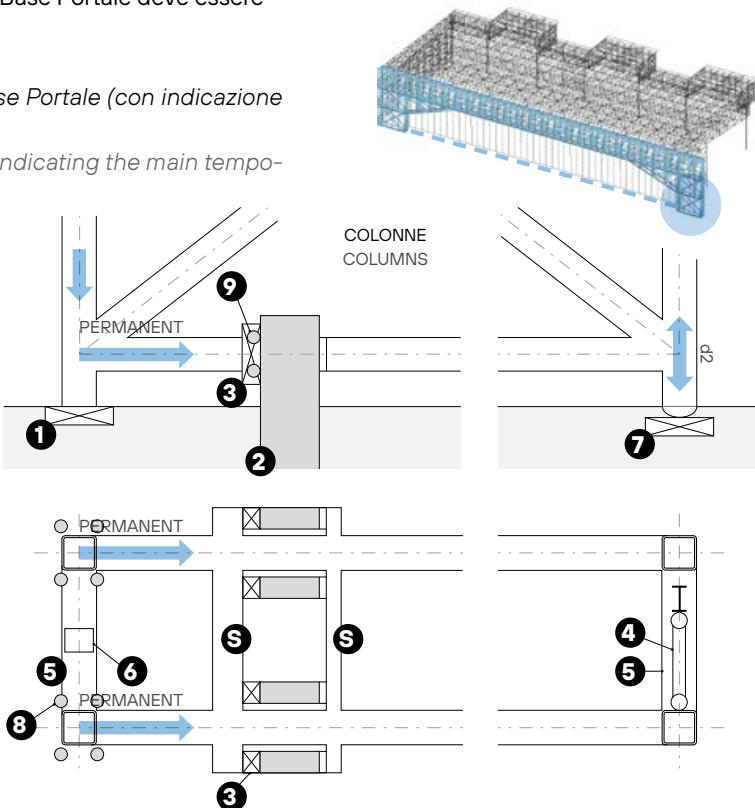
• **Fasi di manutenzione:** la presenza di un numero considerevole di dispositivi di appoggio ha reso necessaria, data la dimensione e l'importanza dell'opera, la predisposizione per la loro manutenzione e/o sostituzione. Il sistema Base Portale deve quindi essere in grado di permettere il sollevamento e/o traslazione della struttura degli hangars in configurazione finale.

Di importanza fondamentale è stato il processo di traduzione da progettazione a realtà dello schema teorico assunto per soddisfare tutte le necessità sopra elencate.

▼ *Elenco schematico di tutte le componenti del sistema Base Portale (con indicazione dei principali dispositivi provvisori)*

Schematic list of all components of the Portal Base System (indicating the main temporary devices)

- (1) APPARECCHI D'APPOGGIO BI-DIREZIONALI SOTTO COLONNE BI-DIRECTIONAL SLIDING BEARING (SLIDING DIRECTION: X,Z)
- (2) BARRE DI TAGLIO PRINCIPALI IMMERSE NEL CALCESTRUZZO SHEAR KEY EMBED IN THE CONCRETE PILECAP
- (S) ELEMENTI DI CONTRASTO TRASMISSIONE DELLE SOLLECITAZIONI ALLE BARRE DI TAGLIO STEEL ELEMENT TRANSFERRING THE HORIZONTAL REACTION OF THE DOOR TRUSS TO THE SHEAR KEY
- (3) APPARECCHI D'APPOGGIO BI-DIREZIONALI SU BARRE DI TAGLIO SLIDING BEARING (SLIDING DIRECTION: Y)
- (4) BIELLA SFERICA SPHERICAL HINGED CONNECTION
- (5) ELEMENTI DI CONNESSIONE TRA STELI INTERNI ED ESTERNI ELEMENT CONNECTING THE OUTER AND INNER SIDES OF PORTAL FRAME
- (6) RISCONTRO TRASVERSALE SUPPORT IN Z DIRECTION ONLY
- (7) APPARECCHI D'APPOGGIO DI-DIREZIONALI PROVVISORI SLIDING BEARING USED FOR ERECTION PHASE ONLY
- (8*) MARTINETTI DI MANUTENZIONE DEGLI APPARECCHI D'APPOGGIO SOTTO COLONNE HYDRAULIC JACK FOR THE MAINTENANCE OF SLIDING BEARINGS, ACTING IN Y DIRECTION
- (9*) MARTINETTI PERLA MANUTENZIONE DEGLI APPARECCHI D'APPOGGIO SU BARRE DI TAGLIO HYDRAULIC JACK FOR THE MAINTENANCE OF SLIDING BEARINGS, ACTING IN X DIRECTION



The base-portal system

The Portal Base System, understood as a **set of devices for transmitting loads to the foundations**, is one of the most complex areas of the Aircraft Maintenance Hangar, both for the high loads transmitted and for the different needs connected to the lifting and maintenance phases: by "system" we mean an articulated and cohesive complex of specific structural components designed for particular needs and performance requirements. The development of this part of the structure necessarily involved the **continuous exchange of information with the builder and other specialists and consultants** for the constructability checks of both the steel and concrete parts.

The design of the basic portal system presupposed in-depth knowledge of the assembly, operational and maintenance phases.

• **Assembly phases:** during the lifting sequence of the roof, the four columns that make up the base of the portal and that are used as lifting points, require the possibility of managing longitudinal displacements of $\pm 120\text{mm}$ and transversal displacements of $\pm 70\text{mm}$ under load (values inclusive of inaccuracies in the execution of the foundation works and displacements required for lifting the structure). Given the considerable dimensions, it was also requested by the builder that, during lifting, the main columns could be rotated in order to make the roof coincide with the columns themselves. The not inconsiderable amount of displacement is also obviously directly proportional to the construction tolerances required for such large spans;

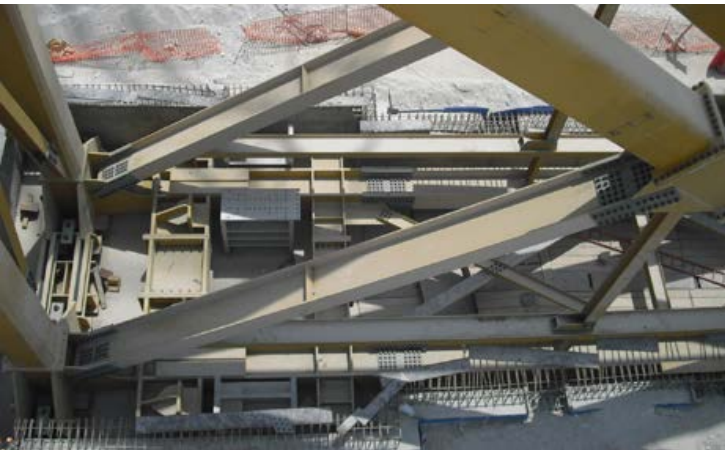
• **Operational phase:** during the operational phase the portal base system must be able to allow the "arch-tightening" behaviour described above;

• **Maintenance phase:** the presence of a considerable number of support devices made it necessary, given the size and importance of the work, to prepare for their maintenance and/or replacement. The Base Portal system must therefore be able to allow the lifting and/or translation of the hangars structure in its final configuration.

Of fundamental importance was the process of translation from design to reality of the theoretical scheme assumed to satisfy all the needs listed above.

▼ *Fasi costruttive delle fondazioni e delle chiavi a taglio inghisate e successiva installazione del portale principale (fondazione centrale).*

Construction phases of the foundations and shear keys grouted and subsequent installation of the main portal (central foundation).



6.1

Il sistema base portale

Il ritegno teorico di **CERNIERA FISSA NELLE GAMBE INTERNE** è stato ottenuto facendo lavorare assieme quattro differenti ma compatibili sistemi di vincolo: appoggio colonna interna con ritegni trasversali, trave di contrasto principale, sistema di barre di taglio principali e trave di contrasto secondaria.

1 Appoggio colonna interna con ritegni trasversali: alla base di ogni singola gamba interna sono stati previsti alloggiamenti dove poter sistemare provvisoriamente 4 martinetti dalla massima portata 5,120 kN l'uno per le fasi di manutenzione degli appoggi (la funzione è quella di sollevare l'hangar, in condizione operativa, per permettere la sostituzione degli apparecchi di appoggio sotto le colonne interne). I carichi trasversali vengono trasmessi alle fondazioni mediante appositi contrasti, anch'essi studiati per specifiche esigenze di aggiustaggio durante le fasi di sollevamento: questi tacchi a taglio sono fissati alle fondazioni tramite l'utilizzo di tirafondi. Gli apparecchi di appoggio sono del tipo "free sliding bearing".

2 Sistema barre di taglio principali; ogni singola barra di taglio principale è stata calcolata al fine di trasmettere 7,600kN alle fondazioni (considerando che per ogni colonna ci sono 4 barre di taglio, alle fondazioni si trasmettono circa 30,400 kN di taglio longitudinale per colonna), valutando un'eccentricità della forza di circa 1.5m. Nel dimensionamento di queste barre di taglio si sono considerate eccentricità trasversali fino a 80mm causate da difetti di costruzione e motivi di montaggio che portano a non trascurabili effetti torcenti sulle barre stesse. Gli apparecchi di appoggio sono del tipo "free sliding bearing".

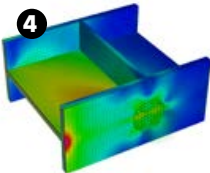
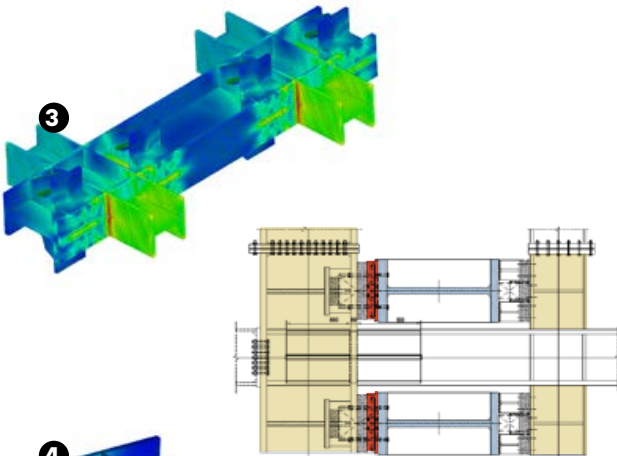
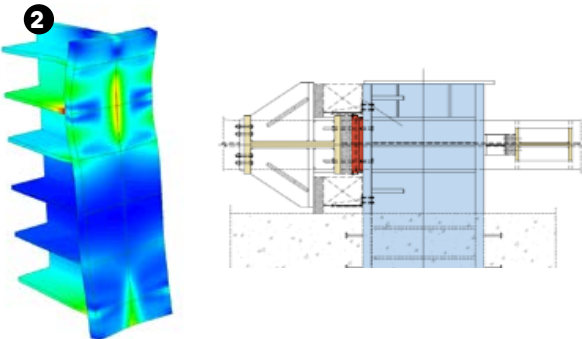
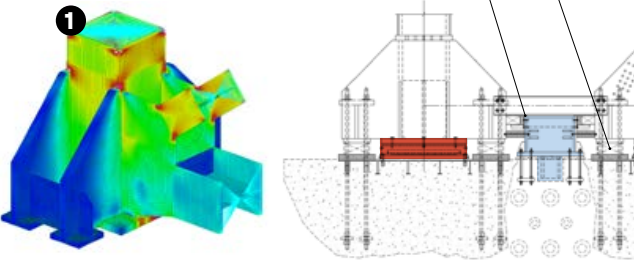
3 Trave di contrasto principale: al fine di assicurare il contatto tra le barre di taglio immerse nel calcestruzzo dei plinti e il sistema Base Portale, è stata progettata una trave di contrasto principale. Il necessario contatto tra la trave di contrasto e gli apparecchi di appoggio disposti verticalmente sulle barre di taglio è garantito da specifici elementi composti da Emaco che permettono la completa chiusura del gap tra i vari elementi. I giunti scorrevoli nei punti di contrasto prevedono la predisposizione per l'alloggiamento di martinetti (dalla massima portata di 3,920kN l'uno) che permettono il rilevamento dei carichi sulle fondazioni (funzionando così da vere e proprie celle di carico) durante la delicata fase di rilascio dei pesi propri, gli aggiustamenti geometrici richiesti sotto carico e la sostituzione degli apparecchi d'appoggio posti sulle barre di taglio.

4 Trave di contrasto secondaria; per motivi essenzialmente di sollevamento un elemento di contrasto secondario, con apposti alloggiamenti provvisori per martinetti, è stato progettato.

DATA LA COMPLESSITÀ DELLA GEOMETRIA, I VARI ELEMENTI PRINCIPALI CON FUNZIONE DI TRASMISSIONE DEL CARICO, SONO STATI PRIMA DIMENSIONATI CON CALCOLO MANUALE E POI TESTATI MEDIANTE MODELLAZIONE FEM AGLI ELEMENTI FINITI.

MARTINETTI PER LA SOSTITUZIONE DEGLI APPOGGI
JACKS FOR REPLACING BEARINGS

CHIAVE A TAGLIO PER IL VINCOLO TRASVERSALE
SHEAR KEY FOR TRANSVERSE RESTRAINT



▲ Base Portale: modellazione FEM particolare costruttivo.

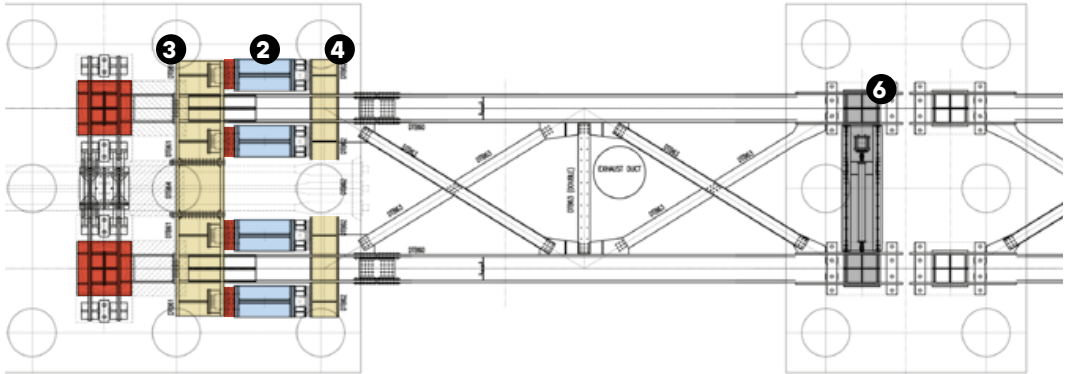
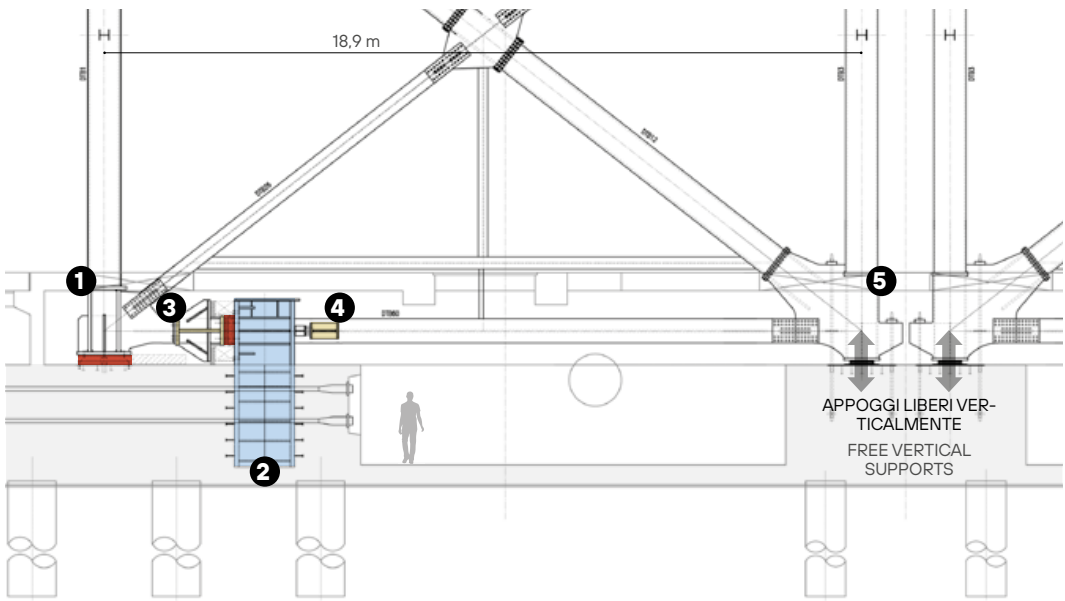
Base-portal system: construction detail FEM modelling..

Chiave a taglio Shear Key

Sistema di barre di contrasto Contrast bar system

Appoggi rotazionali Rotational bearings

Vincolo trasversale per il montaggio Transverse constraint for assembly



The theoretical **FIXED HINGE RESTRAINT IN THE INNER LEGS** was achieved by working together four different but compatible restraint systems: inner column support with transverse restraints, main contrast beam, main shear bar system and secondary contrast beam.

1 Internal column support with transversal restraints: at the base of each internal leg, housings have been provided where 4 jacks with a maximum capacity of 5,120 kN each can be temporarily accommodated for the maintenance phases of the supports (the function is to raise the hangar, in operational condition, to allow the replacement of the support devices under the internal columns). Transverse loads are transmitted to the foundations by means of special contrasts, which are also designed for specific adjustment needs during the lifting phases: these shear heels are fixed to the foundations by means of anchor bolts. The support devices are of the "free sliding bearing" type.

2 Main shear bar system; each single main shear bar was calculated in order to transmit 7,600kN to the foundations (considering that for each column there are 4 shear bars, approximately 30,400 kN of longitudinal shear per column is transmitted to the foundations), estimating a force eccentricity

of approximately 1.5m. In the dimensioning of these shear bars, transverse eccentricities of up to 80mm caused by construction defects and assembly reasons were taken into account, leading to non-negligible torsional effects on the bars themselves. The bearing devices are of the "free sliding bearing" type.

3 Main contrast beam: In order to ensure contact between the shear bars immersed in the concrete of the plinths and the portal base system, a main contrast beam was specially designed. The necessary contact between the contrast beam and the vertically arranged support fixtures on the shear bars is ensured by specific Emaco compound elements that allow the gap between the elements to be completely closed. The sliding joints at the points of contrast provide for the housing of jacks (with a maximum capacity of 3.920kN each) that allow the detection of loads on the foundations (thus functioning as real load cells) during the delicate phase of releasing the self-weights, the geometric adjustments required under load and the replacement of the support devices placed on the shear bars.

4 Secondary contrast beam; for essentially lifting reasons, a secondary contrast beam with temporary jack housings was designed.

6.1

The base-portal system

Il ritegno teorico di **CERNIERA MOBILE** è stato ottenuto ideando un sistema di vincolo formato da barre di taglio e da cerniere radiali sferiche.

5 **Nodo base colonna;** durante le fasi di sollevamento la quattro gambe (comprese anche le gambe esterne che durante la fase operativa sono libere di spostarsi verticalmente) hanno la funzione di colonne. Per le necessità specifiche dettate dal sollevamento le colonne esterne, durante alcune fasi transitorie quindi, appoggiano a terra e sono soggette ad azioni di trazione. Si sono pertanto previsti degli appoggi scorrevoli provvisori che, assieme a tirafondi che verranno successivamente rimossi, forniscono il corretto grado di vincolo necessario per ogni singola fase transitoria.

Barra di taglio e cerniera radiale sferica; la trasmissione dei carichi trasversali avviene tramite un sistema di accoppiamento biella-dispositivi di cerniera radiale sferica che fornisce i gradi di libertà richiesti per la configurazione finale. Anche in questo caso le cerniere sferiche utilizzate sono in grado di permettere tutti gli spostamenti richiesti. La barra di taglio è stata inoltre studiata per fornire il necessario contrasto ed alloggiamento per martinetti provvisori necessari per gli spostamenti durante le fasi di sollevamento ed accoppiamento della copertura.

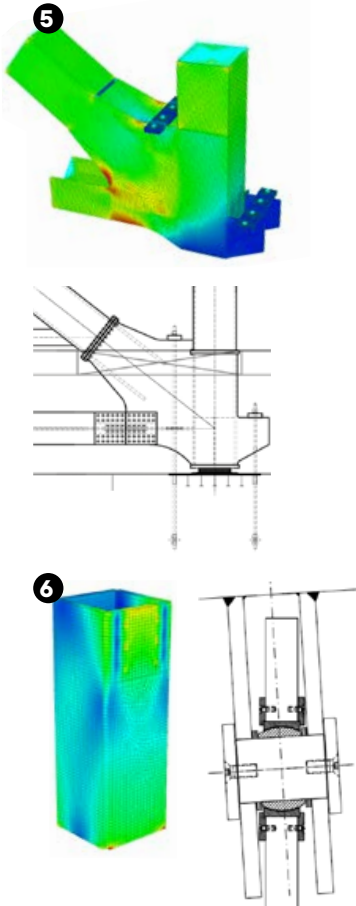
Un sistema di controventi, infine, è stato inserito al fine di irrigidire il sistema complessivo Base Portale evitando così di avere spostamenti relativi tra il filo interno ed esterno delle colonne. Tutta la progettazione è stata eseguita sia per la fase operativa sia per le fasi di sollevamento e manutenzione: per ogni fase le analisi sono state svolte separatamente.

Theoretical **HINGE RESTRAINT** was achieved by designing a restraint system consisting of shear bars and spherical radial hinges.

5 **Column base node;** during the lifting phases, the four legs (including the outer legs that are free to move vertically during the operational phase) act as columns. For the specific needs dictated by the lifting operation, the outer columns, during certain transitional phases therefore, rest on the ground and are subject to tractive actions. Provisional sliding supports have therefore been provided which, together with anchor bolts that will later be removed, provide the correct degree of restraint required for each transitional phase.

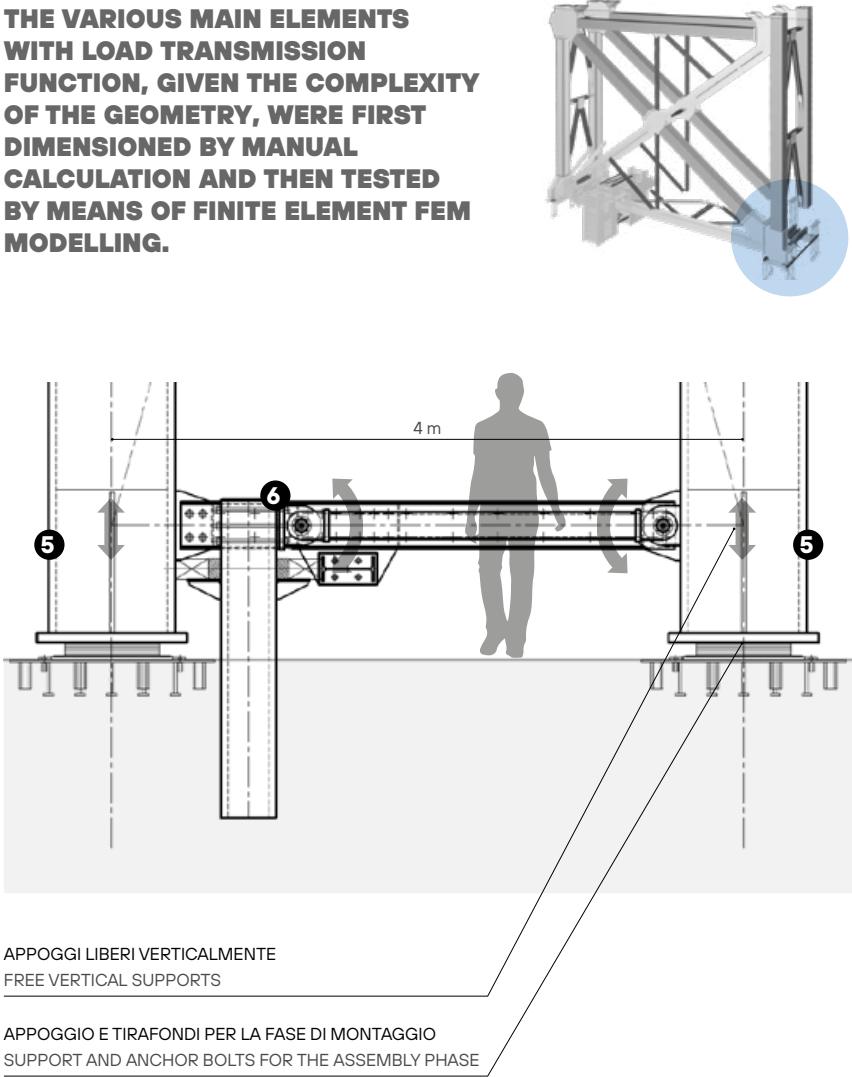
6 **Shear bar and spherical radial hinge;** transverse loads are transmitted via a connecting rod-spherical radial hinge coupling system that provides the required degrees of freedom for the final configuration. Again, the spherical hinges used are capable of allowing all the required displacements. The shear bar is also designed to provide the necessary contrast and housing for temporary jacks required for movement during the lifting and coupling phases of the roof.

Finally, a bracing system was inserted in order to stiffen the overall Base Portal system, thus avoiding relative displacements between the inner and outer edges of the columns. The entire design was carried out for both the operational phase and the lifting and maintenance phases: for each phase the analyses were carried out separately.



▲ Particolari costruttivi FEM del nodo e della barra di taglio trasversale provvisoria per il montaggio.
FEM construction details of the node and temporary transverse shear bar for assembly.

THE VARIOUS MAIN ELEMENTS WITH LOAD TRANSMISSION FUNCTION, GIVEN THE COMPLEXITY OF THE GEOMETRY, WERE FIRST DIMENSIONED BY MANUAL CALCULATION AND THEN TESTED BY MEANS OF FINITE ELEMENT FEM MODELLING.



► Fasi di montaggio a terra dell'arcata principale e rapporto dimensionale tra un nodo e un tecnico Incide: le dimensioni strutturali sono straordinariamente grandi.
Ground assembly stages of the main arch and dimensional relationship between a node and a technocratic Incide: structural dimensions are extraordinarily large.





◀ Il portale del Large Hangar ha una luce libera da colonne di circa 220m. In basso intonacatura dei muri del workshop in corrispondenza delle colonne posteriori.
The portal of the Large Hangar has a column-free span of approximately 220m. Below plastering of the workshop walls at the rear columns.



▲ Fasi avanzate di installazione dei portali ed inizio dell'installazione delle pannellature di facciata dello Smaller Hangar.
Advanced stages of installation of the portals and beginning of the installation of the facade panels of the Smaller Hangar.

6.1

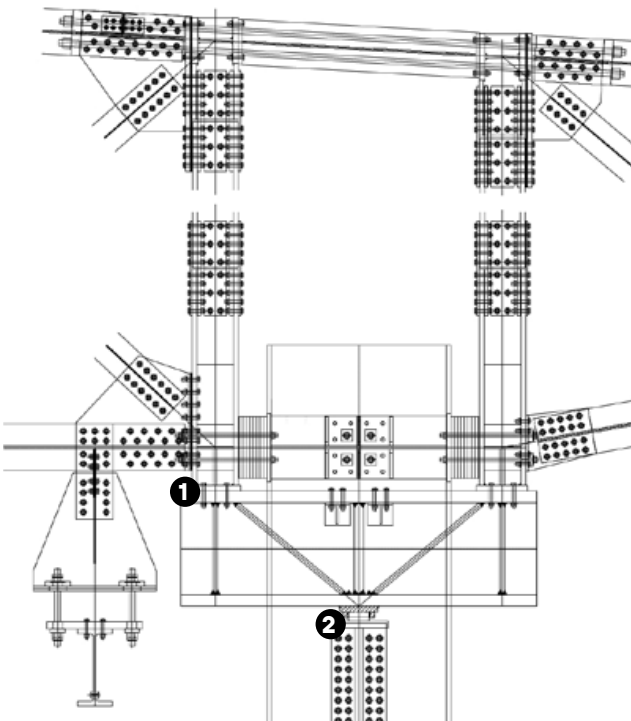
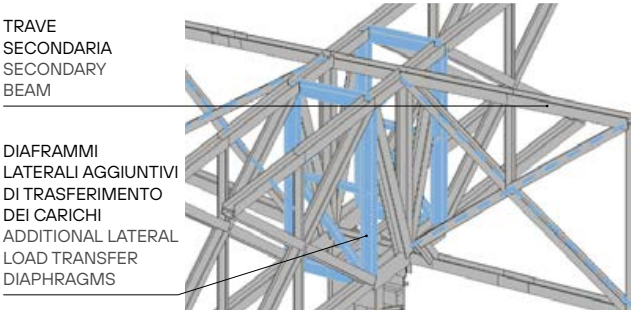
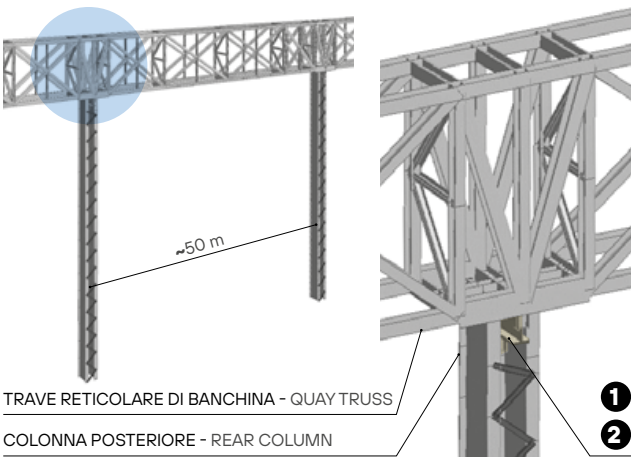
Colonne posteriori e trave banchina

La trave reticolare posteriore è la trave principale che sostiene le secondarie dalla parte opposta al portale. Tale elemento si comporta come una **trave continua su più appoggi** con passo di circa 50m. I carichi verticali sono trasmessi alla trave di banchina e alle colonne posteriori con vicolo a cerniera, realizzato con **elementi sagomati a calotta sferica**, per rendere il vincolo reale il più possibile aderente a quello ideale. Il vincolo a cerniera è realizzato nel centro della colonna e le due pareti della trave reticolare di banchina sono ad esso collegate mediante un elemento trasversale che garantisce la uguale trasmissione del carico su entrambi i lati. I dettagli del sistema di connessione con le colonne sono stati studiati accuratamente mediante modellazioni agli elementi finiti.

La trave di banchina, costituita dall'accoppiamento di due reticolari piane collegate con tracciature inferiori e superiori posti a livello delle briglie presenta in corrispondenza delle reticolari secondarie diaframmi reticolari interni nel piano normale a quello di giacitura delle aste.

In corrispondenza della **colonna**, essendo essa interna alla superficie di copertura ed essendo essa **già in posizione al momento del sollevamento del tetto**, non vi possono essere elementi strutturali in una zona tutta attorno alla stessa di dimensioni 2.5x4m. I supporti per il sollevamento sono ancorati al livello inferiore delle reticolari del tetto e della banchina, inducendo nella struttura sollecitazioni importanti. Nella zona delle colonna quindi i profili delle aste sono stati sostituiti da piatti opportunamente sagomati e saldati in officina. Il dimensionamento di questi elementi è stato eseguito con l'ausilio di modellazioni agli elementi finiti in grado di cogliere eventuali picchi tensionali non rilevabili dal solo calcolo "manuale".

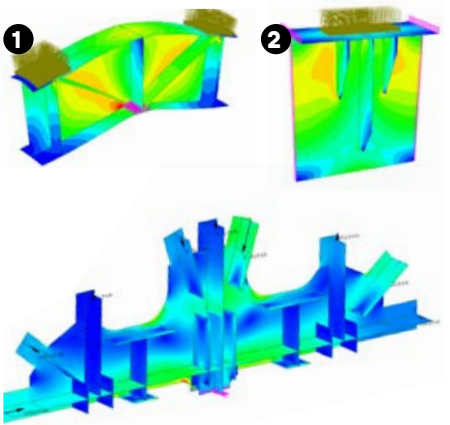
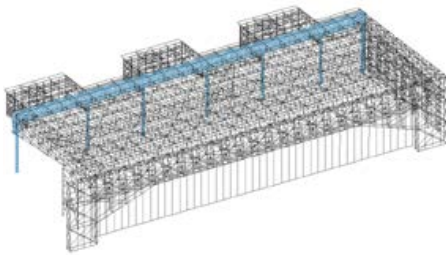
Per lo stesso motivo, la **connessione tra le secondarie e la trave di banchina sulle colonne** risulta caratterizzata dalla mancanza di diagonali in asse alle colonne. Ciò è stato necessario per consentire il sollevamento della trave (assieme al resto della copertura) e la successiva posa sulle colonne stesse: la reticolare "scorre" all'interno di queste ultime e viene fissata solo in seconda fase. Per ovviare a questo si sono interposti due diaframmi laterali in modo da bypassare gli sforzi.



► Incrocio della trave secondaria con la colonna e diaframmi laterali aggiuntivi e modelli FEM dei nodi.

Crossing of the secondary beam with the column and additional lateral diaphragms and FEM models of the nodes.

Rear columns and quay beam



▲ Modelli FEM dei diaframmi laterali aggiuntivi di ripartizione dei carichi e del piatto di nodo di larghezza 5800mm.

FEM models of additional lateral diaphragms for load distribution and knot plate width 5800mm.

▼ Trave reticolare posteriore in fase di installazione e colonne portanti posteriori dopo il montaggio della copertura.

Rear truss during installation and rear supporting columns after roof assembly.



The rear truss is the main beam that supports the secondary ones on the side opposite the portal. This element behaves as a **continuous beam on several supports** with a pitch of approximately 50m. The vertical loads are transmitted to the dock girder and to the rear columns with a hinged alley, realised **with spherical cap shaped elements**, in order to make the real constraint as close as possible to the ideal one. The hinged restraint is realised in the centre of the column and the two walls of the dockside truss are connected to it by means of a transverse element that guarantees equal load transmission on both sides.

The details of the column connection system were carefully studied by means of finite element modelling.

The dock girder, consisting of the coupling of two flat trusses connected with lower and upper webs placed at the level of the weirs, has internal truss diaphragms in the plane normal to that of the lying of the columns.

In correspondence with the **column**, since it is internal to the roof surface and is **already in position when the roof is raised**, there can be no structural elements in an area all around the column measuring 2.5x4m. The lifting supports are anchored to the lower levels of the roof and pier trusses, inducing significant stresses in the structure. In the column area, therefore, the rod profiles were replaced by suitably shaped plates welded in the workshop. The dimensioning of these elements was carried out with the aid of finite element modelling capable of capturing any stress peaks that could not be detected by 'manual' calculation alone.

For the same reason, the **connection between the secondaries and the pier beam on the columns** is characterised by the lack of diagonals in the axis of the columns. This was necessary in order to allow the beam to be lifted (together with the rest of the roof) and then laid on the columns themselves: the lattice "slides" inside the columns and is only fixed in the second phase. To overcome this, two lateral diaphragms were interposed in order to bypass the stresses.



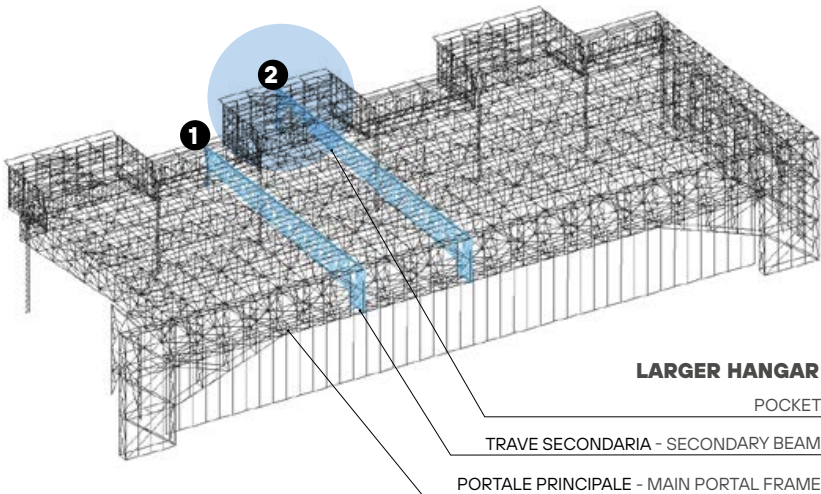
6.1

Travi secondarie

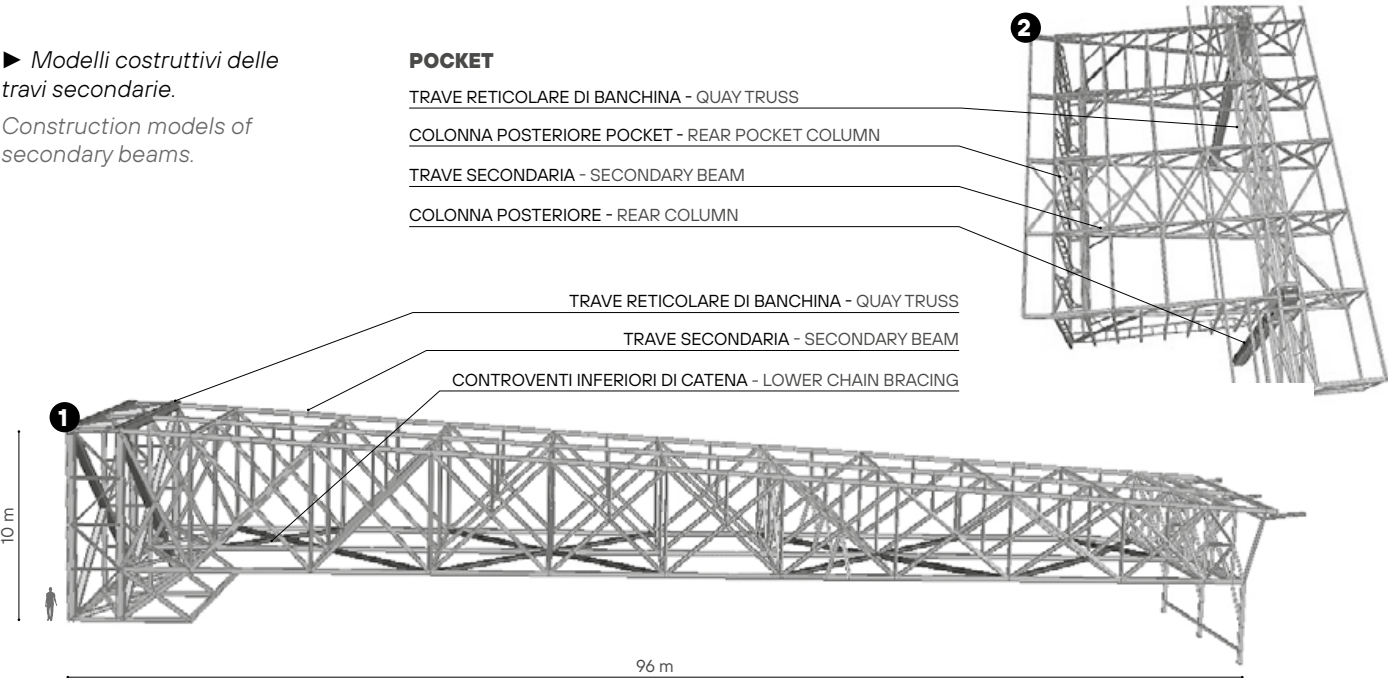
Le travi secondarie sono essenzialmente travi sostenute in due. Nella parte anteriore dell'hangar sono collegate al portale principale alla quale sono rigidamente collegate, mentre nella parte posteriore sono appoggiate sulle colonne con vincolo a cerniera, come spiegato nel paragrafo precedente.

Fondamentalmente esistono due tipologie di travi secondarie:

- 1 la prima parte dal portale principale fino a raggiungere la trave reticolare di banchina;
- 2 la seconda comprende la prima con un'ulteriore trave che parte dalla reticolare di banchina fino ad incontrare le colonne posteriori delle zone Pocket.



► *Modelli costruttivi delle travi secondarie.*
Construction models of secondary beams.



Secondary beams

Secondary beams are essentially beams supported in two. In the front part of the hangar they are connected to the main gantry to which they are rigidly attached, while in the rear part they are supported on the hinged columns, as explained in the previous paragraph.

Basically, there are two types of secondary beams:

- 1 the first starts from the main portal until it reaches the dockside lattice girder;
- 2 the second comprises the first with an additional beam starting from the dockside lattice until it meets the rear columns of the Pocket areas.



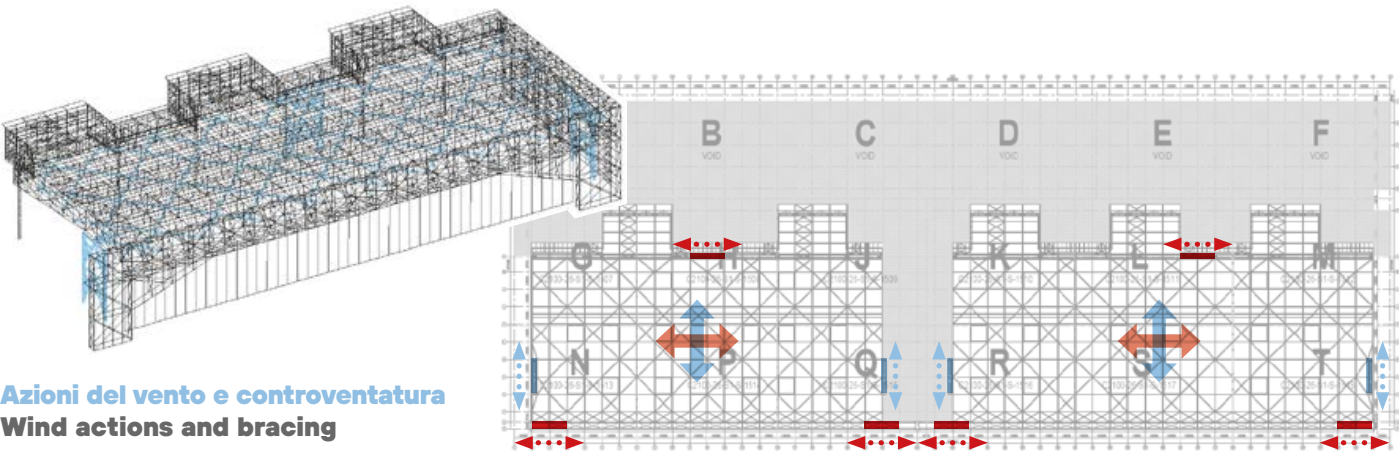
▲ Nella copertura sono alloggiati 18 lucernari (skylights) della dimensione di 10x10x10m circa (1000m³).
The roof houses 18 skylights measuring approximately 10x10x10m (1000m³).

► *Larger Hangar: travi secondarie in fase di montaggio.*
Larger Hangar: secondary beams being assembled.

6.2 Il sistema resistente orizzontale

Il sistema resistente orizzontale è costituito dai **tre portali** presenti sulla parte posteriore dell'hangar e sui lati corti dello stesso e dal **controventamento orizzontale** presente sul piano di catena delle travi reticolari secondarie. I portali di controvento, alti 32.25m e larghi fino a 30m, non trasmettono carichi verticali.

Per far sì che le reticolari laterali del tetto siano libere di deformarsi, è stato studiato un **sistema di bielle con cerniera sferica** in grado di trasmettere al controvento circa 3000 kN di sforzo orizzontale e nessuno sforzo verticale.



- Portali trasversali di controvento

Resistenza al vento

Azioni trasversali del vento
- Crosswind portals

Wind resistance

Transverse wind actions
- Controventatura longitudinale

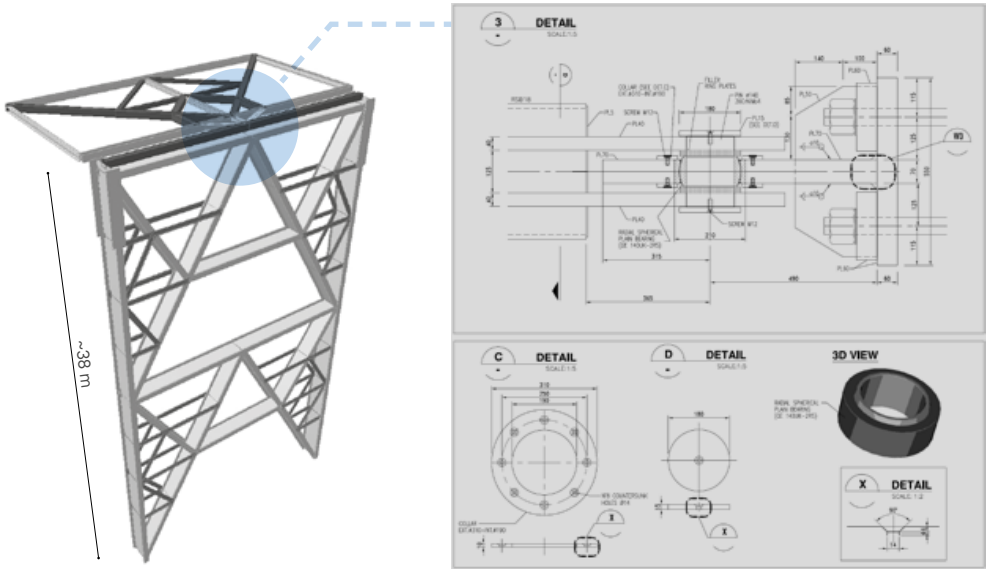
Resistenza al vento

Azioni longitudinali vento
- Longitudinal bracing

Wind resistance

Longitudinal wind actions

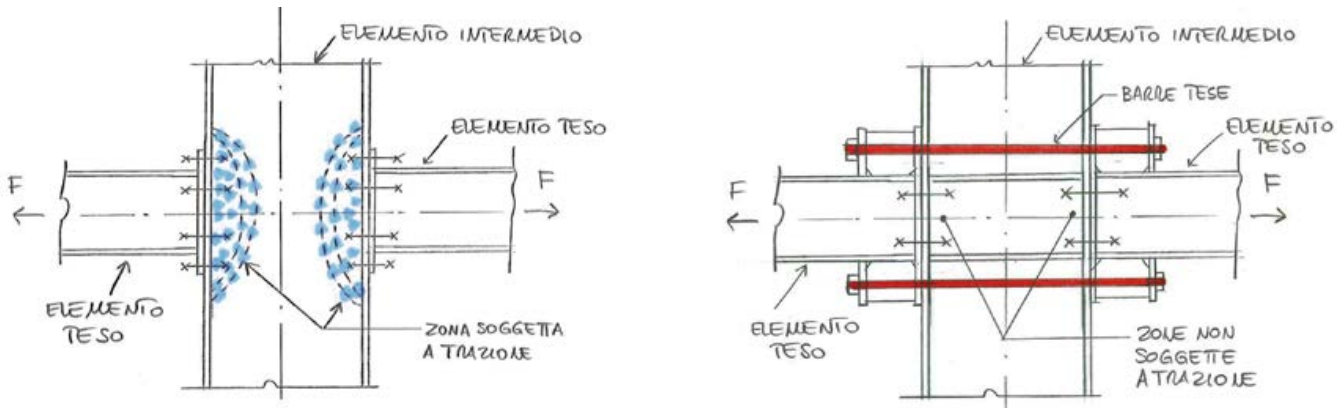
► Controvento laterale e particolare della cerniera sferica di collegamento delle bielle.
Side bracing and detail of the ball hinge connecting the connecting rods.



The horizontal resisting system

The horizontal resisting system consists of the **three portals** present on the rear part of the hangar and on the short sides of the same, and the horizontal bracing present on the chain plane of the secondary trusses. The bracing portals, 32.25m high and up to 30m wide, do not transmit vertical loads.

To ensure that the lateral trusses of the roof are free to deform, a **system of connecting rods with a spherical hinge** was designed to transmit approximately 3000 kN of horizontal stress and no vertical stress to the bracing.



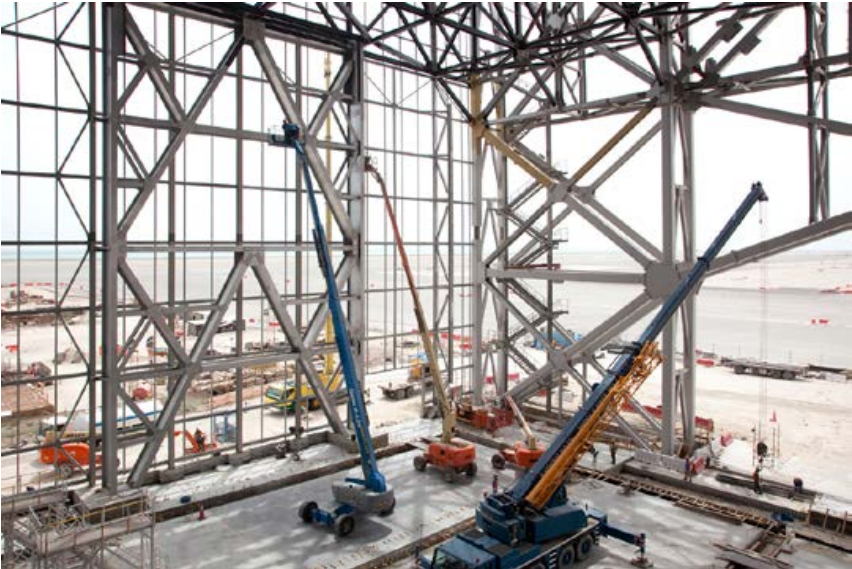
▼ Fasi di montaggio del sistema di controventamento e stabilità orizzantele: controventi posteriore e laterale del larger Hangar.
Installation phases of the bracing and horizontal stability system: rear and side bracing of the larger Hangar.



It is worth mentioning the use of **high-strength bars** in the connection of the connecting rods at the top of the bracing portals to the striker connected to the main structure.

This system has also been used in other connections and always in order to avoid high tensile stresses in the elements between two tensioned elements. The rods are usually 'pretensioned' so that the continuity of the structure is not lost and problems of lability occur once subjected to the expected tensile stress in service.

▲ Schema di funzionamento delle barre ad alta resistenza per bypassare gli sforzi di trazione.
Functional diagram of high-strength bars to bypass tensile stresses.



7 Descrizione strutturale del blocco workshop

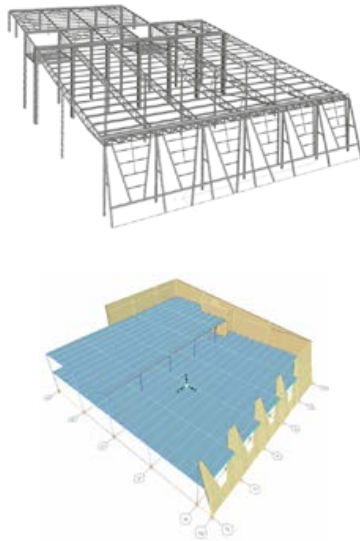
Quasi 50'000 m² della superficie complessiva della copertura fanno parte della struttura del Workshop, che ospita tutte le **attività complementari a quella di manutenzione** vera e propria dei velivoli. Esso comprende: aree di officina specializzate per la manutenzione di motori, avionica, ruote e freni, strutture, officina per la verniciatura, cambusa, sistemi di intrattenimento in volo e attrezzature di sicurezza.

La struttura del workshop è realizzata in cemento armato nella parte inferiore, dalle fondazioni al solaio sotto alla copertura, mentre **l'intera struttura del tetto e parte della facciata sono realizzate in acciaio**. Fra le particolarità della struttura metallica c'è quella di avere dei pozzi di luce in copertura di dimensioni 10x10m, e di avere la facciata inclinata a moduli triangolari che fungono anche da controventamento orizzontale.

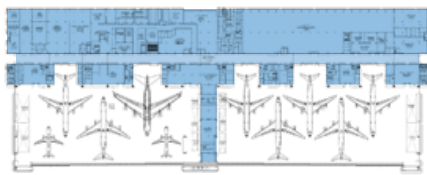


▲ *Struttura del Workshop ad opera conclusa ed a destra in fase di costruzione.*
Workshop structure when completed and right under construction.

◀ *Modelli FEM della struttura in cemento armato e della copertura in acciaio.*
3D FEM models of the reinforced concrete structure and steel roof.



Structural description of the workshop area



Almost 50'000 m² of the total roof area is part of the Workshop structure, which housed all the **complementary activities to the actual aircraft maintenance**. It includes: specialised workshop areas for the maintenance of engines, avionics, wheels and brakes, structures, paint shop, galley, in-flight entertainment systems and safety equipment.

The structure of the workshop is made of reinforced concrete in the lower part, from the foundations to the floor under the roof, while the **entire roof structure and part of the façade are made of steel**. Among the special features of the metal structure is that it has light wells in the roof measuring 10x10m, and has a sloping façade with triangular modules that also act as horizontal bracing.



▲ *Viste degli impianti elettrici e meccanici presenti nelle zone adibite nel blocco workshop.*

Views of the electrical and mechanical installations in the workshop block.

► *Viste interne dell'area workshop a lavori terminati.*

Interior views of the workshop area after completion of the work.





UNI EN ISO 9001:2015
TUV CERTIFICATION n° 50 100 16960 Rev.001
UNI EN ISO 14001:2015
TUV CERTIFICATION n° 50 100 17045
UNI ISO 45001:2018
TUV CERTIFICATION n° 50 100 17044

www.incide.it

Graphic design:
Tommaso Calore designer

Photo:
Incide Engineering

Thanks to:
Cimolai Spa

incide engineering



HeadQuarter

Incide Engineering s.r.l.
Via S.Francesco, 91
35121 Padova - Italy
t. +39 049 8774150
f. +39 049 8774836
incide@incide.it

Registered office:

Via Armistizio, 13
35142 Padova - Italy
P.I. e C.F. 03340490279
Registro Imprese Padova n.03340490279
R.E.A. PD - 329557 - Cap. Soc. €500'000

Certifications:

ISO9001:2015 - IMQ CERT N. SQ052065



Paris, France

Incide Ingénierie sàrl
france@incideengineering.com



Lugano, Switzerland

Incide Engineering sàrl
suisse@incideengineering.com



Rabat, Morocco

Incide Maroc sàrl
maroc@incideengineering.com

Follow us on:



UNI EN ISO 9001:2015
TÜV CERTIFICATION n° 50 100 16960 Rev.001
UNI EN ISO 14001:2015
TÜV CERTIFICATION n° 50 100 17045
UNI ISO 45001:2018
TÜV CERTIFICATION n° 50 100 17044



www.incide.it