



PORTA NUOVA GARIBALDI A MILANO

Analisi di un progetto strutturale complesso

Antonio Migliacci

Politecnico di Milano
migliacci@stru.polimi.it

Danilo Campagna

Alessandro Aronica

MSC Associati S.r.l. Milano
danilo.campagna@mscassociati.it
alessandro.aronica@mscassociati.it

SOMMARIO

Il presente lavoro vuole essere una sintesi descrittiva delle principali problematiche e delle soluzioni tecniche adottate nello sviluppo del progetto strutturale del comparto di Porta Nuova Garibaldi. Il progetto risulta essere, oltre che di importanza strategica per il pregio degli edifici in costruzione, un esempio concreto di applicazione delle diverse teorie inerenti alla progettazione delle strutture in cemento armato. Nel progetto, infatti, è sicuramente significativo l'utilizzo di calcestruzzi ad alte prestazioni e di miscele speciali per la realizzazione delle strutture portanti. Sicuramente risultano essere rilevanti anche le problematiche strutturali studiate per la realizzazione delle Torri in un territorio fortemente vincolato dalla presenza di infrastrutture e servizi preesistenti.

ABSTRACT

PORTA NUOVA GARIBALDI **An example of complex structural design**

This article summarizes the main issues and the technical solutions adopted in the development of the structural design of the Porta Nuova Garibaldi Project. The project proves to be both of strategic importance for the valuable buildings in construction and a concrete example of application of specific branches of the structural engineering for reinforced concrete. In fact in the design the use of high performance concrete and special mix designs for the load-bearing structures is extremely significant. Also the matters related to the construction of towers in an area strongly affected by existing infrastructures and services results to be of considerable interest.

PAROLE CHIAVE | KEYWORDS

torri, calcestruzzo, progetto strutturale, innovazione, tecnologia

buildings, concrete, structural design, innovation, technology

IL PROGETTO DI PORTA NUOVA GARIBALDI

L'area di Porta Nuova Garibaldi, che costituisce uno dei lotti del più vasto intervento di Porta Nuova a Milano, con l'apertura della piazza il 7 dicembre 2012 dedicata all'Architetto Gae Aulenti, è ad oggi quella del comparto completata. Questa area si estende tra Piazza Sigmund Freud, antistante la stazione ferroviaria di Milano Porta Garibaldi, e viale Melchiorre Gioia. La committente dell'intero comparto è costituita da Hines Italia SGR S.p.a. Fondo Porta Nuova Garibaldi che vede importanti investitori italiani e stranieri come Milano Assicurazioni, il fondo pensionistico TIAA-CREF. La costruzione dell'area Porta Nuova Garibaldi è stata affidata all'Impresa Colombo Costruzioni di Lecco che ha rivestito il ruolo di General Contractor dell'intervento.

1. Masterplan area Porta Nuova Garibaldi.



Il masterplan dell'area di Porta Nuova Garibaldi prevede la costruzione di un nuovo centro direzionale che ospiterà attività terziarie (50.485 m²), residenziali (15.000 m²), ricettive (15.000 m²), commerciali (10.000 m²) e manifestazioni espositive pubbliche (20.000 m²). Il quartiere si sviluppa su un doppio livello: una piazza posta a circa sei metri sopra al livello stradale che sarà collegata direttamente con il parco urbano e le funzioni terziarie e residenziali ed un "podio" che si sviluppa nei tre piani interrati al di sotto del piano piazza.

Attorno al "podio", che costituisce la suddetta piazza, sorgono tre Torri direzionali concepite dall'Architetto Cesar Pelli di cui la più alta, con la guglia, sfiora i 230 metri di altezza. Alle Torri si affiancano due edifici a destinazione uffici e commerciale progettati da +Arch. e l'Hotel Gilli da Studio Architetto Benati.

IL PROGETTO STRUTTURALE

Il progetto strutturale del comparto, a firma dell'Ing Danilo Campagna, è stato redatto da MSC Associati S.r.l. La supervisione strutturale alla progettazione è stata affidata al Prof. Antonio Migliacci, socio fondatore di MSC Associati S.r.l, infine il coordinamento delle attività progettuali è stato svolto dagli Ingg. Claudia Gregis, Alessandro Aronica e Andrea Sangalli.

La progettazione è durata più di tre anni, a causa delle difficoltà legate all'altezza degli edifici ed all'interferenza con i sottoservizi e le infrastrutture esistenti (gallerie del Passante ferroviario e della linea Milano Greco) e in via di realizzazione (galleria

linea MM5 e nuovo tunnel stradale "Porta Nuova"). La complessità e la delicatezza dell'intervento, in un'area così fortemente antropizzata, ha richiesto uno studio preventivo ed un monitoraggio continuo delle infrastrutture esistenti durante le fasi di costruzione delle tre Torri. Analogamente a quanto è avvenuto più in generale per l'intero intervento Porta Nuova, anche il progetto strutturale di Porta Nuova Garibaldi è stato sottoposto ai criteri di valutazione ambientale imposti dalla certificazione LEED (Leadership in Energy and Environmental Design). Dal punto di vista strutturale, la certificazione ambientale ha comportato l'impiego di calcestruzzi e armature caratterizzati da elevate quantità di materiale riciclato di post-consumo e di post-produzione industriale. Nello specifico, delle 12000 tonnellate di acciaio utilizzate per la costruzione delle Torri e dell'area podio ben 10200 tonnellate, pari a circa 85 %, sono state prodotte dal recupero di rottami ferrosi. Per quanto riguarda il calcestruzzo mediamente il 15% della pozzolana presente nei cementi è risultata essere materiale di risulta proveniente dall'industria siderurgica. Il progetto strutturale ha dedicato particolare attenzione alle specifiche tecniche, anche in relazione alla richiesta prequalifica per i calcestruzzi ad alte prestazioni previsti nel progetto.

Una delle scelte fondamentali che si è dovuto affrontare nelle fasi preliminari della progettazione è come si dovessero concepire le strutture portanti in modo da rendere realizzabile quella che, nello stadio primordiale, era puramente un'idea architettonica rappresentata dal masterplan dell'Architetto Cesar Pelli. Definire la tipologia dell'impianto strutturale e i relativi materiali è risultato essere una delle operazioni più delicate nell'iter della progettazione di un'opera così imponente. In questa fase ci si è trovati quindi a doversi confrontare con tutte le contingenze relative ad una piuttosto che ad un'altra opzione progettuale.

Per Porta Nuova Garibaldi è stata fatta una scelta ben precisa, ovvero quella di realizzare tre Torri la cui struttura portante fosse eseguita integralmente in cemento armato.

Tale decisione rappresenta il risultato di un complesso problema costituito da molteplici variabili di natura sia tecnica che economica e culturale.

Da prima si vuole sottolineare come la realizzazione di un'opera rilevante, quale il progetto in questione, voglia rispecchiare, per quanto riguarda la componente strutturale, la classica cultura scientifica del cemento armato propria della tradizione tecnica italiana. Questo aspetto, che nel suo profondo è legato sentimentalmente ad una determinata dottrina culturale, vede in pratica un più concreto riflesso economico. In tutto l'iter realizzativo, che va dalla progettazione fino alla costruzione, un maggior "know how" del materiale utilizzato si riflette direttamente in un minor costo legato alla progettazione ed alle maestranze di cantiere. In secondo luogo, attraverso opportune analisi economiche di "value engineering", si è dimostrato che, per le altezze delle tre Torri del complesso in oggetto, il costo delle strutture in calcestruzzo si è rivelato competitivo con quello relativo alle medesime edificate in acciaio. Infatti, in un'economia globale sempre più fluttuante, una maggior stabilità del prezzo delle materie prime è la miglior garanzia sulla stabilità dei budget disponibili nello sviluppo del progetto. In questa ottica l'adozione del calcestruzzo si è rivelata vantaggiosa dal punto di vista economico poiché la variazione dei costi di tale materiale, legata a fattori economici più nazionali che esteri, è risultata più contenuta.

Viceversa, la preferenza verso strutture in acciaio, sarebbe stata più rischiosa in quanto il costo di questa materia prima è invece più condizionato dai mercati internazionali.

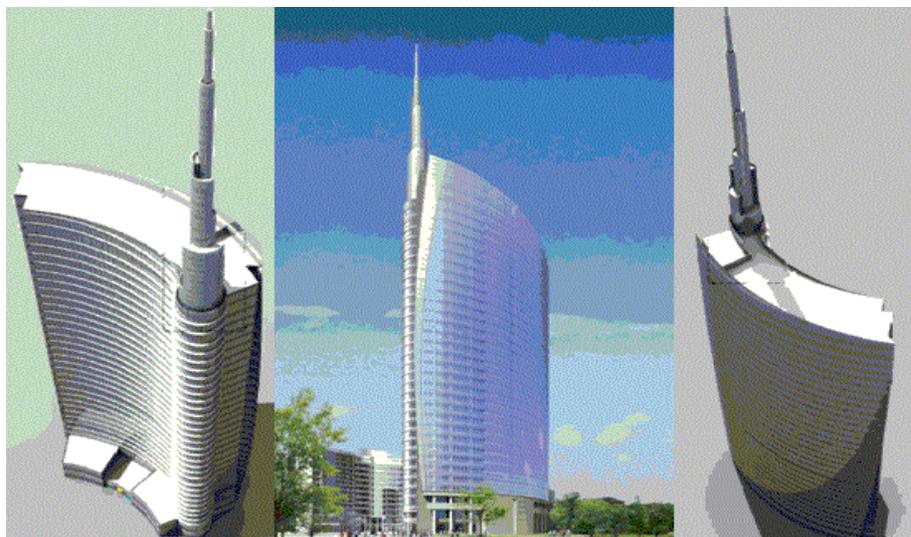
Definito lo schema ed i materiali costituenti le strutture portanti, in merito al progetto delle tre Torri, si è fatta inoltre una scelta sicuramente innovativa legata

all'utilizzo di calcestruzzi ad alte prestazioni. Porta Nuova Garibaldi è in realtà uno dei primi cantieri in Italia a prevedere l'impiego di calcestruzzi gettati in opera con resistenze superiori a quelle mediamente designate per questo materiale. Di fatto la scelta è stata agevolata anche dalla semplificazione della legislazione tecnica che ne regola l'utilizzo. Infatti con l'avvento delle nuove norme tecniche NCT2008, entrate in vigore in modo definitivo nel Luglio 2009, viene data la possibilità al progettista di avvalersi di calcestruzzi ad alte prestazioni, denominati HPC, le cui resistenze siano comprese tra $55 < R_{ck} < 85$ MPa, semplificando le procedure tecniche che ne disciplinano l'uso. Nella precedente normativa DM96 l'impiego di questi materiali era più difficoltoso in quanto occorreva un'autorizzazione esplicita del Servizio Tecnico Centrale del Ministero LL.PP. su parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Attualmente, già dall'emanazione delle NTC 2005, ripreso poi nelle NTC 2008, l'iter per l'utilizzo di calcestruzzi ad alte prestazioni tipo HPC è stato decisamente semplificato: per questo tipo di calcestruzzi secondo il punto 4.1 della NCT 2008 viene consentito l'utilizzo a patto che *"tutte le grandezze meccaniche e fisiche che hanno influenza sulla resistenza e durabilità del conglomerato siano accertate prima dell'inizio dei lavori tramite un'apposta sperimentazione preventiva e la produzione segua specifiche procedure per il controllo di qualità"*. Di fatto, con una procedura di prequalifica, è stato possibile l'impiego di questi calcestruzzi sicuramente più prestazionali rispetto a quelli usualmente utilizzati nei cantieri italiani.

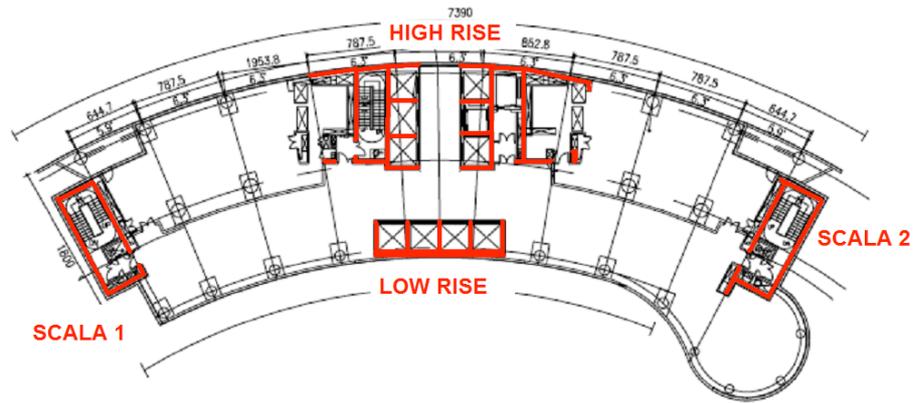
LE ANALISI ECONOMICHE PER LA SCELTA DEI CALCESTRUZZI

La scelta delle classi di calcestruzzo da utilizzare per i diversi elementi strutturali è stata ottimizzata attraverso uno studio realizzato in collaborazione con il CIS-E (Consorzio per Costruzioni dell'Ingegneria Strutturale in Europa) del Politecnico di Milano. Grazie a questo lavoro è stato possibile individuare, tra le varie possibili combinazioni tra i diversi elementi strutturali e le relative classi di resistenza dei calcestruzzi, quella più vantaggiosa dal punto di vista economico. In particolare le analisi di value-engineering sono state eseguite per la Torre A che rappresenta, per superfici di solaio e per la propria altezza, la Torre più importante dell'intervento di Porta Nuova Garibaldi. Questo edificio infatti conta 4 piani interrati e 32 fuori terra per un'altezza totale in copertura, misurata dal piano piazza, di oltre 150 m. Inoltre, in sommità della torre, è presente una guglia architettonica chiamata "Spire" che è realizzata da una struttura reticolare metallica.

2. Rendering Torre A.



3. Pianta piano
tipo Torre A.



Definito il layout preliminare delle strutture si sono analizzate le implicazioni tecnico-economiche legate all'utilizzo di calcestruzzi tradizionali o ad alte prestazioni, autocompattanti o meno. Si sono quindi valutati i costi della struttura (calcestruzzo, acciaio e casseforme) e la tempistica di costruzione (giorni necessari per la cassetta, posa armatura, getto e scassetta). Nella Tabella 1 si presentano quattro combinazioni di materiali impiegabili per la realizzazione degli elementi strutturali in c.a, selezionate tra tutte quelle esaminate durante l'iter progettuale e organizzate in ordine crescente di prestazioni. Il caso I ipotizza la realizzazione della torre senza impiegare i calcestruzzi HPC, i casi successivi considerano invece un impiego via via crescente di calcestruzzi HPC con l'obiettivo di minimizzare i volumi di getto e le sezioni degli elementi strutturali. Il calcestruzzo C60/75 selezionato è un HPC, di tipo SCC, con basso rapporto acqua/cemento (Φ 0,35), lavorabile per 120' e pompabile fino a 150 m di altezza. Nella Tabella 2 vengono riassunti il diametro delle colonne e lo spessore dei muri (minimo e massimo) associati ai quattro casi indagati, ottenuti ripetendo il dimensionamento degli elementi strutturali a parità di condizioni di verifica (nei confronti di resistenza e deformabilità).

Tabella 1.
Combinazioni di
classi di calcestruzzo
indagate.

Classe CA	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV
Colonne	C45/55	C60/75	C60/75	C60/75
Muri	C35/45	C35/45	C60/75	C60/75
Solai	C45/55	C45/55	C45/55	C60/75
Fondazioni	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37

Tabella 2.
Dimensioni degli
elementi verticali
nelle diverse
combinazioni
indagate.

Elemento [cm]	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV
Pilastrini Parco	80 ÷ 125	60 ÷ 110	50 ÷ 110	50 ÷ 110
Pilastrini Spina	60 ÷ 150	60 ÷ 135	55 ÷ 130	55 ÷ 125
Pilastrini Piazza	60 ÷ 140	60 ÷ 100	50 ÷ 120	50 ÷ 120
Pilastrini Spire	55 ÷ 100	45 ÷ 85	45 ÷ 85	45 ÷ 85
Muri Sinistra	30 ÷ 60	30 ÷ 60	30 ÷ 40	30 ÷ 40
Muri Destra	30 ÷ 60	30 ÷ 60	30 ÷ 40	30 ÷ 40
Muri Low-rise	20 ÷ 50	20 ÷ 50	20 ÷ 30	20 ÷ 30
Muri High-rise	30 ÷ 80	30 ÷ 80	30 ÷ 60	30 ÷ 55

L'impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni ha consentito quindi di ottenere elementi strutturali di minori dimensioni, permettendo così di aumentare la superficie utile in relazione alla superficie totale di piano (un aumento di 103 m² per

le colonne e 617 m² per i muri sull'intera torre A). Inoltre si fa notare che l'utilizzo di calcestruzzo HPC, grazie alla maggiore resistenza a breve termine, consente una rimozione dei casseri in tempi brevi rendendo vantaggiosa la costruzione dei nuclei con la tecnica dei casseri autosollevanti, che ben si presta anche all'utilizzo di calcestruzzi SCC.

Nel caso IV si è considerata tutta la struttura in elevazione realizzata in calcestruzzo HPC. Questa soluzione consente di ridurre il volume di getto dei solai (920 m³ in meno sull'intero edificio) diminuendone lo spessore di circa 2,5 cm a parità di deformabilità flessionale e resistenza al punzonamento. Tale riduzione comporta però un aumento di armatura flessionale (circa 50 t complessivamente). Inoltre, lo spessore inferiore dei solai in HPC garantisce solo un modesto decremento dei carichi agenti sulla struttura, non consentendo una riduzione delle sezioni degli elementi verticali.

Ai fini della scelta della migliore combinazione di calcestruzzi da impiegare è stata quindi condotta un'analisi del costo di costruzione, basata sui valori di mercato del 2007, data in cui è stato effettuato lo studio comparativo, tenendo conto dei costi dei materiali, della cassetta, della manodopera e della variazione economica legata al mutamento della superficie calpestabile. L'aumento della superficie calpestabile, infatti, permette un aumento di valore del costruito a pari superficie totale edificata, vantaggio non trascurabile essendo elevato il numero di piani dell'edificio e la zona di pregio dell'immobile stesso. Si è anche tenuto conto dell'influenza sulla tempistica del cantiere, e dei suoi risvolti economici, in relazione alla possibilità di scasseratura in tempi brevi dei calcestruzzi HPC e SCC. I prezzi del calcestruzzo utilizzati per l'analisi economica sono riportati nella Tabella 3. Il costo di pompaggio considerato è 6 euro/m³ più una quota fissa di 160 euro. La manodopera per la posa del calcestruzzo ha un'incidenza di 15 euro/m³. Il costo dell'acciaio d'armatura è 1,17 euro/kg, comprensivo di messa in opera, mentre la cassetta incide per 38,5 euro/m² nel caso di calcestruzzo non autocompattante. Per calcestruzzo autocompattante si ha un onere aggiuntivo legato alla sigillatura dei casseri valutabile in una persona/giorno ogni 150 m², allo stesso tempo si può stimare una riduzione a metà della tempistica del getto e a 1/5 della relativa manodopera. Da queste considerazioni scaturisce la valutazione economica riportata in Tabella 4.

Tabella 3. Costo unitario dei cls considerati (euro/m³)

Calcestruzzo	C30/37	C35/45	C45/55	C60/75
Non SCC	72	78	105	155
SCC	82	87	113	163

Tabella 4. Costo complessivo della torre (keuro)

Calcestruzzo	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV
Non SCC	11906	11835	11863	12238
SCC	12164	12066	11971	12439

Le configurazioni più vantaggiose risultano la III e la II, rispettivamente per l'impiego di calcestruzzi autocompattanti e non, anche se con piccole differenze, mentre la soluzione più costosa è sempre la IV. Risulta quindi conveniente usare calcestruzzi HPC per i pilastri e per i muri, mentre non si notano grandi vantaggi impiegando calcestruzzo C60/75 per gli impalcati. A valle di questa analisi economica, tenendo conto anche di alcune implicazioni tecniche, si è scelto di realizzare la Torre A con l'assortimento di calcestruzzi del caso II nella versione SCC.

I CALCESTRUZZI UTILIZZATI NEL PROGETTO DELLE TORRI

Lo studio comparativo svolto ha quindi permesso di individuare la soluzione più competitiva dal punto di vista economico per la scelta delle diverse classi di resistenza dei calcestruzzi. Nel progetto delle Torri si sono definiti pertanto i calcestruzzi di seguito elencati.

Per le platee di fondazione, di spessori variabili da 1,8 a 2,5 m, sono stati utilizzati calcestruzzi C30/37. In particolare, la fondazione della Torre A è stata impostata su diaframmi profondi oltre 40 m, chiamati "barrette", di classe C30/37 posizionati planimetricamente in corrispondenza delle strutture verticali. La fondazione della Torre C è stata invece impostata su pali di diametro di 80/100 cm profondi da 23 a 64 m di classe di resistenza C25/30.

I pilastri, di sezione variabile da 160 x 160 cm a 45 cm di diametro, sono di classe C35/45 nei piani interrati e C60/75 nei piani fuori terra. La differenziazione delle classi di resistenza lungo l'altezza è stata intrapresa per evitare problemi tensionali di interfaccia tra calcestruzzi molto diversi all'imposta sulla fondazione. Per le torri A e B i muri di controvento, di spessore tra i 20 e i 90 cm a seconda dell'elemento e della quota altimetrica, sono di classe C35/45 ad eccezione dei tronchi tra il piano terra ed il piano secondo della Torre A che, a causa di una riduzione della sezione legata al layout architettonico, sono stati previsti in classe di resistenza C45/55.

Per la Torre C, a causa dei problemi legati al peso di un controvento impostato sulle gallerie del passante ferroviario, si è utilizzato, per questo controvento, un calcestruzzo alleggerito di tipo LC35/38 con peso specifico di 1900 daN/m³. Per limitare lo squilibrio delle rigidzze flessionali con gli altri controventi della Torre, questi ultimi sono stati realizzati con calcestruzzi ordinari di classe C30/37. Per le tre Torri i solai sono costituiti da piastre bidirezionali in cemento armato pieno di classe C45/55 e sono di altezza pari a 22,5 cm nei piani a destinazione uffici e pari a 25 cm nei piani a destinazione commerciale e tecnica. Al fine di limitare i fenomeni di punzonamento in prossimità delle colonne sono stati previsti dei capitelli di spessore aggiuntivo pari a 22,5 cm. La Spire posizionata sulla copertura della Torre A è stata invece progettata come struttura reticolare con acciaio di tipo S355JR.

LA PREQUALIFICA DEI CALCESTRUZZI

Fissate le classi di resistenza dei vari calcestruzzi previsti in progetto, in particolare per quelli ad alte prestazioni HPC, si sono dovute definire le caratteristiche necessarie per la prequalifica del materiale e del fornitore.

In tali requisiti, riportati nelle specifiche tecniche del progetto, si è dovuto fornire una chiara evidenza della qualità dei calcestruzzi prescritti nel progetto. Questa "qualità" è stata caratterizzata attraverso la definizione delle proprietà intrinseche del conglomerato cementizio (resistenza, modulo elastico, densità, viscosità, consistenza, lavorabilità ecc..) per le diverse miscele in progetto, con particolare riguardo agli aspetti legati alla produzione, al trasporto e alla messa in opera in cantiere.

Di fatto, nelle specifiche allegate al progetto, si è dovuta definire l'intera filiera di produzione del calcestruzzo non limitandosi al solo requisito prestazionale legato, in modo riduttivo, alla resistenza cubica caratteristica (Rck). Nella prequalifica si sono definite in maniera chiara ed esaustiva le caratteristiche fisico-chimiche dei materiali e ciò ha richiesto il supporto di tecnici qualificati, quali i tecnologi del calcestruzzo. Queste figure sono risultate fondamentali già nella fase preliminare e definitiva del progetto al fine di individuare compiutamente le classi e le caratteristiche dei calcestruzzi utilizzati nel progetto strutturale.

Per il complesso di Porta Nuova Garibaldi si è avuto un prezioso contributo scientifico dalla società Enco srl che ha messo a punto le miscele dei conglomerati cementizi, poi confezionati dalla Holcim, con opportuni additivi della Tecnochem Italiana.

La decisione legata all'utilizzo di calcestruzzi prestazionali è risultata una scelta progettuale sicuramente innovativa in quanto si è sdoganato molto del bagaglio tecnico accumulato nell'ambiente della ricerca universitaria. La necessità di produrre volumi di calcestruzzo notevolmente superiori a quelli tipicamente prodotti nel campo sperimentale, ha evidenziato le criticità tecniche legate a questi processi produttivi. La competenza dei tecnologi coinvolti ha saputo risolvere tali problematiche, dando concretezza ad una produzione più intensiva e tecnologicamente mirata di questi conglomerati.

Per il cantiere di Porta Nuova Garibaldi è stata allestita una centrale di betonaggio appositamente dedicata in grado di confezionare autonomamente tutte le miscele previste nel progetto strutturale.

Oltre ad affrontare le problematiche legate alla resistenza, si è poi affrontato il problema connesso alla lavorabilità delle miscele in funzione della tipologia dei getti.

Particolare attenzione è stata posta sulla fluidità delle miscele in modo da garantire soprattutto la corretta costipazione in elementi strutturali fortemente armati.

La scelta di calcestruzzi autolivellanti tipo SCC (Self Compacting Concrete) è risultata essere garanzia di una maggior durabilità. Infatti la forte riduzione di possibili segregazioni degli inerti, che comprometterebbe la durabilità delle barre di armatura, si riflette in una migliore garanzia sulla realizzazione delle strutture gettate in opera. Questa proprietà è stata congiuntamente valutata con la necessità di studiare miscele "pompabili" a quote rilevanti per le operazioni di getto di elementi fino a 150 metri di altezza. Vista la complessità logistica del cantiere è stata inoltre perfezionata una serie di miscele al fine di ottenere una lavorabilità superiore ai 120 minuti. Tutte queste necessità hanno portato alla realizzazione di opportune miscele, contraddistinte da specifici additivi, che ne conferiscono le caratteristiche richieste.

CALORE DI IDRATAZIONE DELLE PLATEE MASSIVE DELLE TORRI

Lo sviluppo del calore di idratazione, tipico dei getti massivi delle fondazioni, è stata una delle problematiche affrontata durante il corso della progettazione strutturale. Per tali elementi, queste problematiche, si sono manifestate in maniera più accentuata per la nascita di gradienti termici maggiori dovuti alle differenze di temperatura tra il centro della platea e la parte corticale più esterna.

Tale differenza si traduce nella nascita di trazioni all'estradosso di valore non trascurabile, specialmente nei primi giorni del getto quando il conglomerato non ha ancora raggiunto la sua piena resistenza caratteristica e risulta quindi caratterizzato da valori di resistenze a trazioni decisamente inferiori rispetto a quelle di progetto riscontrabili a 28 giorni.

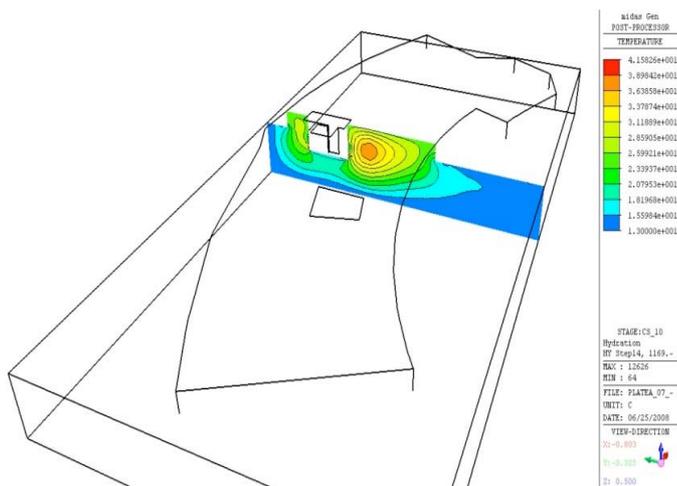
Risulta interessante sottolineare che, nella redazione delle specifiche tecniche di progetto, prima ancora di realizzare opportune sperimentazioni appositamente dedicate (possibili solo dopo aver individuato il fornitore ufficiale dei calcestruzzi), sono state definite le caratteristiche termo-meccaniche delle miscele per la realizzazione dei getti massivi di fondazione delle Torri.

Successivamente, dopo aver individuato il fornitore dei calcestruzzi, a seguito di opportuna gara d'appalto svolta utilizzando le specifiche come capitolato tecnico prestazionale, sono stati eseguiti specifici studi per realizzare le miscele previste in progetto. In particolare sono state realizzate delle analisi termoelastiche attraverso simulazioni tridimensionali realizzate con gli elementi finiti ed indagini sperimentali

condotte su un campione in scala reale rappresentativo di una porzione delle platee fondazionali.

Per quanto riguarda le simulazioni numeriche queste sono state svolte attraverso analisi ad elementi finiti, eseguite da Enco s.r.l., che hanno definito un continuo solido rappresentante le fondazioni su barrette della Torre A. Queste analisi hanno simulato l'esecuzione per fasi dei getti, considerando sia la produzione specifica di calore dei getti nel tempo sia le condizioni al contorno in termini di temperatura. In particolare per l'intradosso della platea è stato assunto una condizione termica di "serbatoio di calore" a temperatura costante mentre la temperatura dell'estradosso è stata assunta ciclicamente variabile simulando la variazione della temperatura tra il giorno e la notte.

4. Temperature all'interno della Platea.



Per quanto riguarda la sperimentazione su modello in scala reale si è realizzato un campione di prova, delle dimensioni in pianta di 4 x 4 m, altezza 2,2 m, armato con 6 strati incrociati di Φ 26 all'intradosso ed all'estradosso, rappresentante verosimilmente una porzione tipica delle platea della Torre A. Per simulare l'adiabaticità membranale del getto reale sono stati inseriti dei pannelli di materiale termoisolante di spessore pari a 10 cm sui casseri perimetrali del campione di prova. Il monitoraggio temporale dello sviluppo del calore, dovuto alla maturazione del conglomerato cementizio, è stato eseguito mediante adeguata strumentazione. Nello specifico sono stati inseriti all'interno del getto di prova una serie di termocoppie a diverse altezze di getto e due "Logger" con frequenza di lettura ogni 15 minuti che hanno permesso di registrare i gradienti termici nell'arco del tempo. Dopo circa un mese dal getto il campione prova è stato sollevato per verificare il grado di costipazione del calcestruzzo al di sotto delle armature inferiori. I risultati ottenuti dalla simulazione numerica e dalla sperimentazione su modello reale di prova sono stati fondamentali per definire il mix design delle miscele poi utilizzate per le platea delle Torri. In particolare si è arrivati alla conclusione di frazionare in due semigetti gli spessori delle platee proprio per evitare gradienti termici troppo elevati. Sono state quindi inserite nella parte corticale del primo semigetto delle armature atte ad eliminare il rischio fessurazioni nella zona di estradosso. La notevole fluidità del calcestruzzo utilizzato, compresa tra le classi S5 ed SCC, richiesta per garantire un ottimo grado di costipazione tra le barre di armature, ha creato un problema indiretto relativamente al fatto che la superficie di estradosso del semi getto completato si è presentata molto liscia. Al fine di evitare una riduzione dell'aderenza con il getto superiore di seconda fase si è provveduto a

migliorare il "grip" della ripresa irruvidendo artificialmente, poche ore dopo il getto, la superficie di estradosso del getto di prima fase.

Gli studi condotti hanno quindi permesso di individuare i più idonei mix design per i calcestruzzi e gli accorgimenti realizzativi per evitare la nascita di fessurazioni corticali sull'estradosso dei getti, ciò al fine di garantire la durabilità della struttura progettata mediante una corretta protezione delle armature superiori.

PRINCIPALI PROBLEMATICHE STRUTTURALI ANALIZZATE

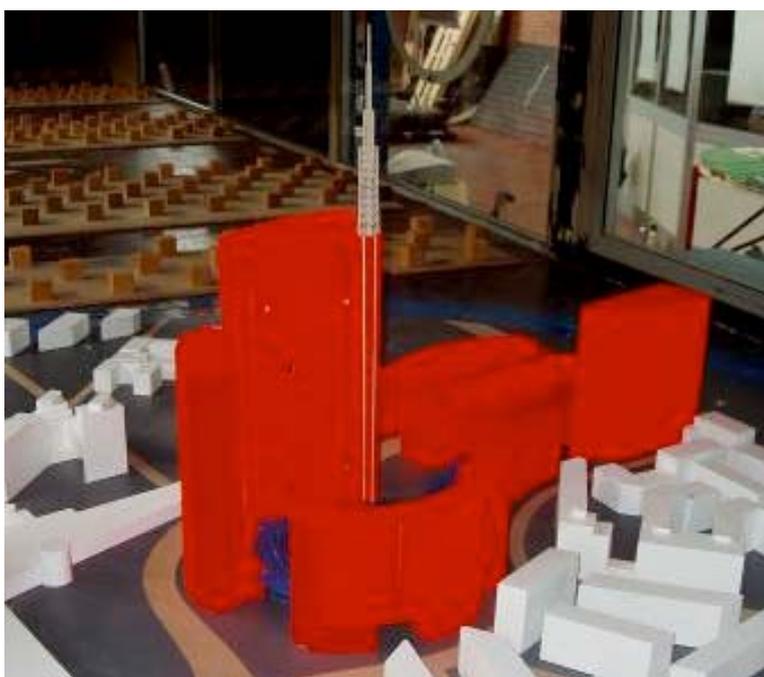
Dal punto di vista generale il progetto di Porta Nuova Garibaldi è risultato essere tecnicamente articolato, in quanto si sono dovute affrontare delicate problematiche strutturali legate al fatto di realizzare un complesso di grandi dimensioni in un territorio fortemente antropizzato, dove la presenza di infrastrutture e sottoservizi ha condizionato fortemente molte scelte progettuali. Uno degli aspetti più interessanti della progettazione è stato quello legato alle analisi svolte sulla Torre A relativamente alla definizione dei carichi eolici di progetto ed alle interazioni con l'adiacente manufatto del nuovo Tunnel di Porta Nuova.

Vista la considerevole altezza dell'edificio, pari a 140 m misurati sulla copertura del piano 32° e 225 m sulla sommità della guglia, le analisi legate all'equilibrio delle forzanti orizzontali ha rappresentato una delle discipline di ingegneria più difficili, sia per la complessità legata alla definizione delle forzanti, sia per il modo in cui viene raggiunto l'equilibrio interno e con i vincoli a terra.

Le sollecitazioni orizzontali principali, al fine del dimensionamento delle strutture di controvento, sono risultate essere quelle eoliche. Per la Torre A di Porta Nuova Garibaldi l'analisi di queste sollecitazioni è stata eseguita mediante una campagna sperimentale presso i laboratori del CRIACIV di Prato (Università di Firenze), che ospita la prima galleria del vento costruita in Italia per l'analisi dei fenomeni aerodinamici sugli edifici. Queste analisi sono state eseguite in collaborazione con l'Ing. Pietro Crespi e la società Amis di Milano.

Per questo studio è stato realizzato un modello rigido in scala 1:350 della Torre A e degli edifici limitrofi, montati su una piattaforma girevole del diametro di 2 m, simulando quindi un'area di indagine di 700 m di diametro intorno alla Torre.

5. Modello provato in galleria del vento.



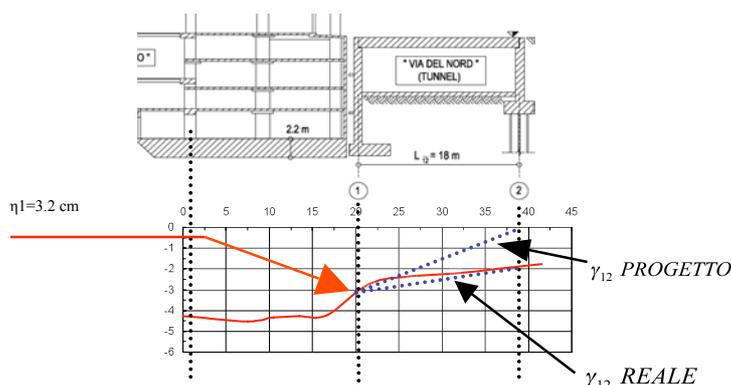
La particolarità del test condotto consiste nel aver riprodotto lo strato limite del vento ovvero, attraverso la regolazione dell'altezza di particolari "box" in legno collocati prima del modello, si è riusciti a ricreare l'andamento variabile delle velocità del vento in funzione dell'altezza dal suolo, riuscendo quindi a simulare la rugosità specifica dell'area.

Il modello della Torre A è stato monitorato attraverso 140 sensori (trasduttori di pressione di tipo piezoelettrico) distribuiti sulla superficie esterna dell'edificio che hanno permesso di rilevare puntualmente le pressioni esercitate dal vento sulla Torre. Alla base della Torre è stata inserita anche una bilancia aerodinamica a 5 componenti che ha reso possibile acquisire le forze ed i momenti globali al piede della Torre dovuti all'azione del vento incidente (reazioni vincolari alla base). La presenza degli edifici limitrofi nel modello sottoposto al test ha quindi permesso di valutare le interferenze che questi ultimi offrono alla fluidodinamica del vento sulla Torre A. Inoltre la piattaforma girevole su cui è stato montato l'intero modello ha consentito di investigare la distribuzione delle pressioni del vento in relazione dell'angolo di incidenza tra il vento e la Torre. Nel test condotto si sono analizzate 16 diverse orientazioni del vento, indagando settori dell'angolo giro ogni 22,5°. Questo tipo di campagna sperimentale ha permesso quindi di definire con accuratezza le pressioni del vento agenti sulle facciate della Torre A.

In secondo luogo, oltre a tutti gli aspetti legati alle progettazione delle strutture fuori terra, si è dovuto studiare l'interazione tra le fondazioni della Torre A e l'adiacente tunnel di Porta Nuova, realizzato prima della costruzione della Torre stessa. In particolare si sono analizzate le distorsioni angolari impresse al tunnel dovute alla realizzazione successiva della Torre. L'elevato peso dell'edificio, superiore alle 100.000 tonnellate, ha creato infatti dei cedimenti differenziali sulle strutture verticali del tunnel che si sono tradotti in distorsioni angolari dell'impalcato di copertura. In questo caso il problema più complesso è stato quello di individuare un sistema di fondazioni della Torre sufficientemente rigido per limitare gli spostamenti differenziali superficiali e garantire la sicurezza statica e la funzionalità in esercizio del tunnel.

La soluzione più idonea è stata identificata in un sistema fondazionale indiretto costituito da una platea in calcestruzzo impostata su diaframmi di grandi dimensioni (sezione 1,20 x 2,5 m, e con lunghezza superiore ai 40 m) chiamati "barrette" che hanno permesso di trasferire in profondità i carichi della Torre, limitando i cedimenti verticali superficiali. In questo modo si sono ridotti, rispetto alla soluzione di fondazioni di tipo diretto, anche i cedimenti differenziali verticali sulle strutture del tunnel e quindi le distorsioni angolari conseguenti. Il collaudo statico di tali "barrette" ha richiesto l'applicazione del metodo a celle Osterberg per via dell'elevato carico verticale di esercizio.

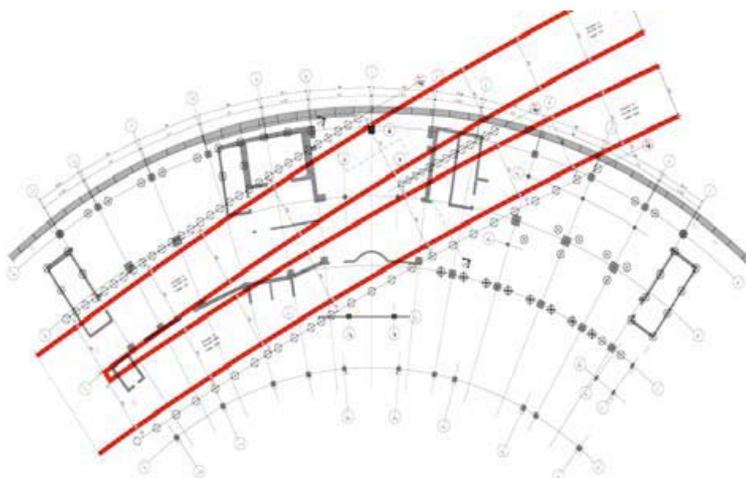
6. Andamento dei cedimenti differenziali.



Le tematiche legate all'altezza della Torre A e alle sue fondazioni non sono state le uniche che hanno contraddistinto la progettazione strutturale di Porta Nuova Garibaldi. Sicuramente il progetto strutturale della Torre C ha rappresentato un altro comparto in cui si sono dovute valutare attentamente specifiche problematiche progettuali. Delle tre Torri in progetto, la Torre C, è quella di minor altezza; questo edificio infatti conta 3 piani interrati e 12 fuori terra raggiungendo un'altezza totale, calcolata dallo spiccato di fondazione, di circa 70 m. Le principali problematiche strutturali non si sono riscontrate dunque per l'altezza della Torre, ma bensì per le interferenze in fondazione con le infrastrutture esistenti.

In particolare la Torre C è stata ubicata sul tracciato delle gallerie ferroviarie del passante ferroviario nella tratta Garibaldi - Repubblica.

7a. Sovrapposizione Torre C – Passante ferroviario.

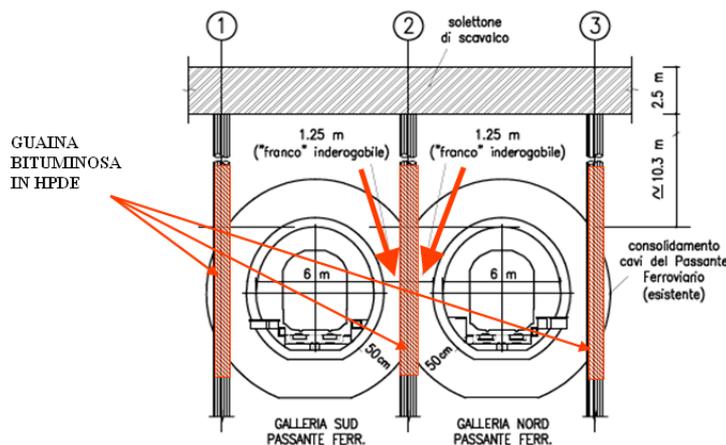


La sovrapposizione planimetrica tra le strutture della Torre e della galleria nord e sud del passante è praticamente totale come illustrato nella figura 7.

Le analisi preliminari hanno dimostrato che un sistema fondazionale di tipo diretto, quale una fondazione a platea, non sarebbe stato possibile in quanto il peso della Torre sarebbe stato trasferito direttamente sulle gallerie del Passante generando sulle stesse stati tensionali inaccettabili. Infatti le gallerie ferroviarie si trovano solamente 11 m al di sotto della quota di imposta delle Torre C e questa circostanza ha posto un delicato problema sulla definizione del sistema fondazionale dell'edificio.

La scelta progettuale adottata è stata quella di fondazioni indirette al fine di trasferire il carico verticale della Torre al di sotto della quota di imposta delle gallerie. Con questa soluzione progettuale si sono limitati gli stati tensionali aggiuntivi che, in questa configurazione, sono risultati compatibili con la statica in esercizio delle gallerie.

7b. Sezione sulle gallerie ferroviarie.

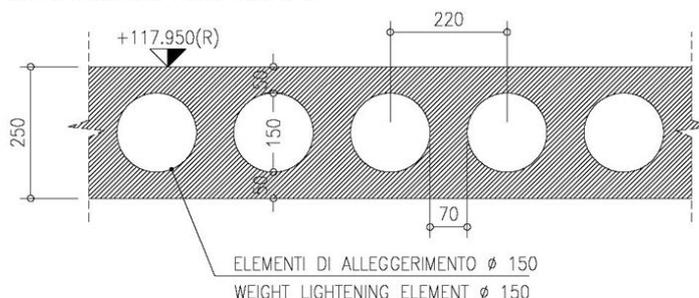


Il sistema di fondazioni è stato realizzato da tre palificate, eseguite a lato delle gallerie, che costituiscono tre allineamenti di appoggio continuo delle platea. In questa condizione statica di progetto la platea non è risultata più essere un elemento di fondazione ma bensì un impalcato che, appoggiato sugli allineamenti di pali, è stato progettato per sorreggere la Torre sovrastante. Questa struttura di fatto ha definito "un ponte interrato" a scavalco delle gallerie le cui pile, costituite dai pali, scaricano i carichi verticali al di sotto della quota di imposta dei tunnel ferroviari, anche grazie alla forte riduzione dell'attrito laterale tramite la predisposizione di un'interfaccia in guaina bituminosa di HPDE.

Nel complesso iter progettuale l'elemento discriminante è stato sicuramente la deformabilità della platea, in quanto eccessivi spostamenti verticali nella sua parte centrale avrebbero potuto comprimere il terreno al di sopra delle gallerie riportando sulle stesse il peso della Torre. Questa situazione avrebbe quindi reso inefficiente il sistema fondazionale indiretto in progetto.

La deformabilità flessionale della platea è stata un elemento dominante nella progettazione strutturale. In particolare, al fine di limitare i pesi della platea mantenendo contestualmente un'elevata rigidità sezionale, si è optato per realizzare una sezione di altezza pari a 2,5 m alleggerita con appositi elementi metallici come illustrato nella figura 8.

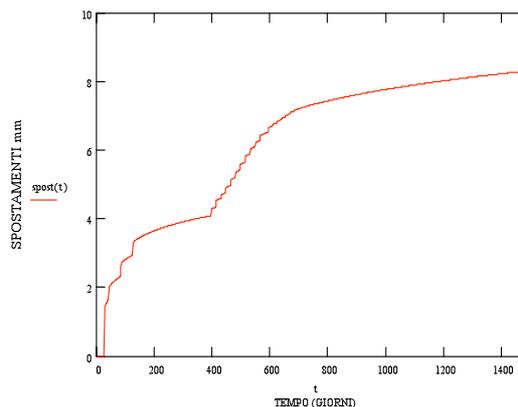
8. Particolare della sezione della platea fondazionale.



Definite le caratteristiche strutturali è stata effettuata un'analisi di costruzione per fasi attraverso un'applicazione progressiva dei carichi sulla platea simulando quindi la costruzione nel tempo della Torre C. Questa successione temporale dell'applicazione dei carichi ha permesso di valutare lo spostamento nel punto di maggior deformabilità considerando gli effetti differiti nel tempo legati al fluage del calcestruzzo della platea. In particolare è stata utilizzata la funzione di viscosità presente nel CEB FIP MODEL CODE 90 che ha consentito di definire l'evoluzione temporale dello spostamento flessionale della platea in relazione alle caratteristiche reologiche del calcestruzzo e all'evoluzione temporale dell'applicazione dei carichi (costruzione per fasi successive dei piani della Torre).

L'andamento temporale degli spostamenti nel punto di maggior deformabilità della platea è rappresentato nel grafico rappresentato nella figura 9.

9. Spostamenti elasto-viscosi della platea.



Allo spostamento flessionale della platea è stato sommato quello di progetto calcolato sulla testa dei pali, legato alla deformabilità longitudinale degli stessi ed alla deformazione del sistema palo - terreno. Questo spostamento globale è risultato quindi essere l'abbassamento verticale globale massimo nel punto di maggior deformazione della platea.

Al fine di escludere interazioni tra il terreno sovrastante le gallerie e l'intradosso della platea sotto il magrone di fondazione è stato inserito uno strato altamente deformabile costituito da sabbia e polistirolo.

10. Particolare della fase di realizzazione della platea.



CONCLUSIONI

Il progetto di Porta nuova Garibaldi si è prefigurato quindi come un cantiere innovativo relativamente all'utilizzo dei calcestruzzi di nuova generazione. Questi conglomerati cementizi sono stati caratterizzati non solo da resistenze superiori a quelle tradizionali, ma anche da particolari proprietà specifiche quali l'elevata lavorabilità e bassi calori di idratazione. Sicuramente la parte innovativa è correlata anche ai molteplici aspetti di costruzione legati alle considerevole altezze degli edifici. In particolare si evidenziano i sistemi "self climbing", caratteristici dei casseri autosollevanti, utilizzati per la realizzazione dei muri di controvento piuttosto che particolari sistemi di cassetatura utilizzati per la realizzazione dei solai.

Uno degli aspetti significativi, legato alla progettazione strutturale di Porta Nuova Garibaldi, è stato l'accurato studio preventivo svolto, dedicato alla progettazione strutturale, alla scelta dei materiali ed alla definizione delle fasi cantieristiche per la realizzazione delle Torri.

Sicuramente il "know-how" sviluppato durante la cantierizzazione di questo lotto immobiliare è stato di fondamentale ausilio ai successivi cantieri, nell'ambito dello stesso P.I.I., dei comparti Isola e Varesine.

Non ultimo, va ricordato che le attività dei professionisti incaricati dei collaudi statici degli edifici in costruzione nelle diverse aree del progetto Porta Nuova, sono coordinate dal Prof. Migliacci con la collaborazione della Soc. AMI Consulting s.r.l. di Milano. Ciò al fine di omogeneizzare le operazioni di collaudo, in particolare le prove sui materiali in opera e le prove di carico, vista la particolare complessità e le varietà delle soluzioni adottate nelle diverse aree, facenti però parte di un progetto unitario nella sua concezione e per la sua finalità.

La conclusione dei lavori strutturali è stata assunta il 15 Ottobre 2011 quando, con una spettacolare operazione di montaggio, è stata completata l'installazione della

guglia "Spire" tramite sollevamento con elicottero (video sul sito di MSC Associati S.r.l. - www.msccassociati.it/lavori_comuff.htm)

Sicuramente Porta Nuova sta fornendo una nuova immagine alla città di Milano che si presenterà con un nuovo volto per l'appuntamento internazionale dell'Expo del 2015.

11. Particolare della fase di completamento della Torre A.



BIBLIOGRAFIA | REFERENCES

- [1] Norme Tecniche per le costruzioni NTC 2005 – 14/09/2005.
- [2] Norme Tecniche per le costruzioni NTC 2008 – 14/01/2008.
- [3] Istruzioni per l'applicazione delle NTC 2008 – 02/02/2009.
- [4] CEB FIP Model Code 90.
- [5] UNI EN 1990:2006 : Eurocodice 0 – Criteri generali di progettazione strutturale.
- [6] UNI EN 1991-1-1:2004 : Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture – Parte 1-1:- Azioni in generale.
- [7] UNI EN 1992-1-1:2005 : Eurocodice 2 – Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1-1-: Regole generali e regole per gli edifici.
- [8] UNI EN 1993-1-1:2005 : Eurocodice 3 – Progettazione delle strutture di acciaio – Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici.
- [9] UNI EN 1998-1:2005 : Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici.
- [10] UNI EN 2006-1:2006 e UNI 11104:2004.