

# Non solo high tech

Inconfondibile il segno della scuola inglese nelle due torri del WTC: un doppio involucro vetro/brise soleil cela una struttura mista - pilastri in acciaio-cls e solai a cavi post tesi - realizzata utilizzando l'HPC, ultima frontiera dell'innovazione tecnologica dei materiali

Giuliana Iannaccone\*

**I**l World Trade Center San Marino è la prima realizzazione di Norman Foster su territorio italiano. Opera Prima è, infatti, l'originaria denominazione del WTC, prima che, nel 1999, si concretizzasse l'ipotesi di far rientrare l'intero complesso nell'importante circuito internazionale che comprende oltre trecento WTC in 92 paesi. L'idea di costruire un centro d'affari risale al 1996, quando fu acquisito dal committente un ampio lotto a Dogana Bassa, nella Repubblica di San Marino, al confine con l'Italia, una posizione sicuramente strategica e di ampia visibilità. Per questo motivo si decise di affidare il progetto del nuovo edificio ad un progettista del calibro di Norman Foster, da quarant'anni protagonista

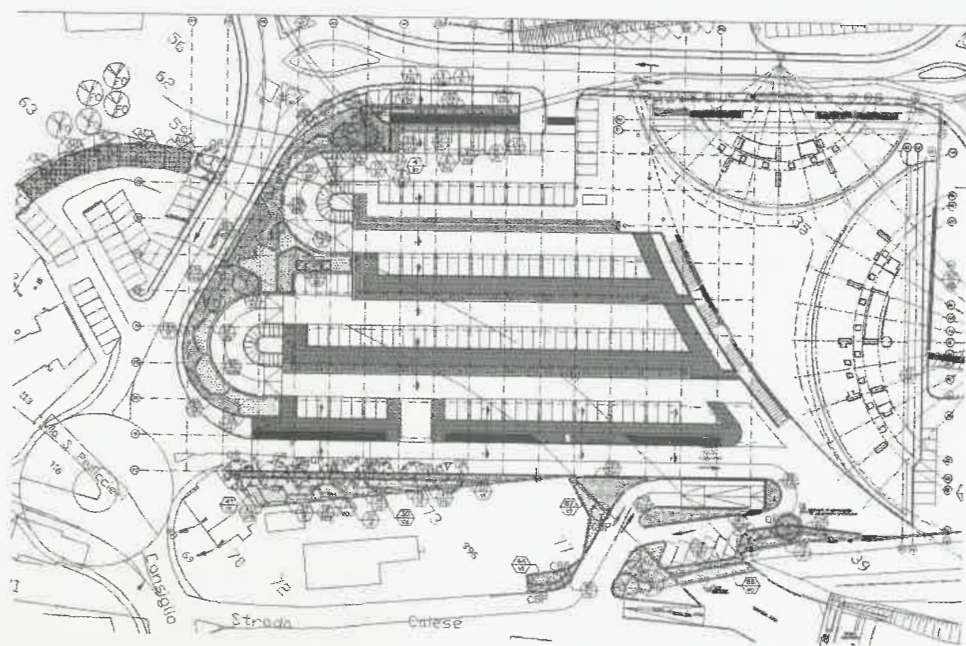
indiscusso del panorama architettonico mondiale. L'architetto inglese accolse con entusiasmo l'incarico e iniziò a mettere su carta alcune idee che portarono ad un primo progetto di massima e, quindi, ad una elaborazione più dettagliata che nel 1999 subì una variante significativa. Foster, infatti, modificò il suo progetto iniziale per meglio rispondere alle nuove esigenze di polifunzionalità dettate dall'ingresso nella WTC Association. Al termine di questo lungo iter, dopo due varianti progettuali e tre anni di lavori, lo scorso mese di giugno è stato inaugurato il World Trade Center San Marino, costato alla società immobiliare circa 30 milioni di euro. L'inaugurazione ufficiale ha visto presenti non soltanto le personalità poli-





## Verso il monte Titano

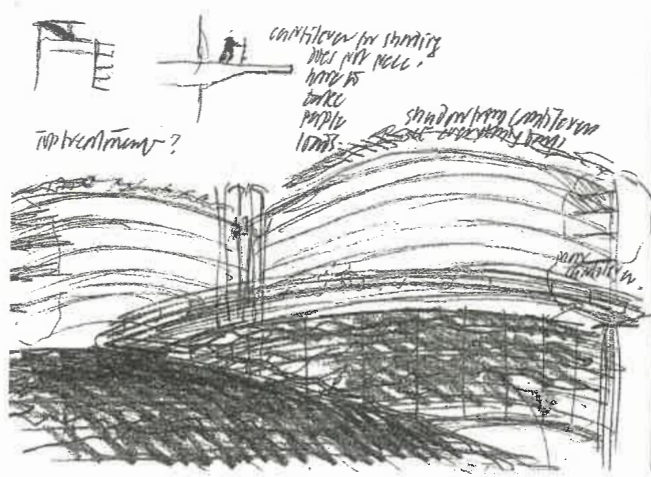
Sulla base di alcune suggestioni derivanti da una visita a San Marino, Foster decise di modificare l'orientamento dell'edificio e della piazza ad esso antistante per rivolgerli verso il Monte Titano (cioè a sud), lasciando una forma più compatta verso nord ovvero verso la superstrada che collega Rimini alla Repubblica di San Marino. Il complesso edilizio si articola in tre volumi: uno zoccolo di base e due torri che volumetricamente sono assimilabili a due spicchi disposti perpendicolarmente fra loro e ravvicinati in un vertice dello zoccolo stesso. I due volumi così disposti delimitano una zona centrale destinata a luogo di incontro per il pubblico, la "piazza", aperta verso il monte Titano, simbolo della Repubblica.



tiche della Repubblica, ma anche tutta la popolazione e, soprattutto, quanti hanno contribuito alla realizzazione dell'opera: primo fra tutti Norman Foster ed i suoi collaboratori David Nelson (intervistato nei "I Maestri" edito da BE-MA editrice) e Luis Mattania. L'evento ha rappresentato quindi una occasione unica per incontrare da vicino il grande progettista e parlare con lui del suo progetto e soprattutto del suo interesse a lavorare in Italia, in vista di due future importanti realizzazioni: la nuova stazione TAV di Firenze e il progetto di riqualificazione dell'area Montecity Rogoredo a Milano.

"Data la tradizione architettonica italiana - ha spiegato Foster - ogni architetto prova amore per l'Italia. Io stesso sono stato stu-

dente in Italia. Abbiamo partecipato a molti concorsi in Italia: Firenze, Milano, Torino. L'Italia è molto stimolante, aperta a nuove idee e questo è anche sano visto dall'esterno. La collaborazione, infatti, è sempre un processo bidirezionale, da una parte c'è il vantaggio di guardare la situazione dall'esterno, dall'altra di imparare molto per chi lavora all'interno". Nel frattempo chi scrive coglie un sorriso malcelato di David Nelson, affiorato probabilmente nell'atto di ricordare alcuni momenti della sua esperienza italiana: "Quando parliamo di questo progetto ridiamo sempre. Questo è il bello e il brutto di lavorare in Italia!". E non si può fare a meno di pensare ad alcune immagini divertenti, circolate nel corso della conferenza stampa di inaugurazione, che lo ritraggono durante i sopralluoghi in cantiere.





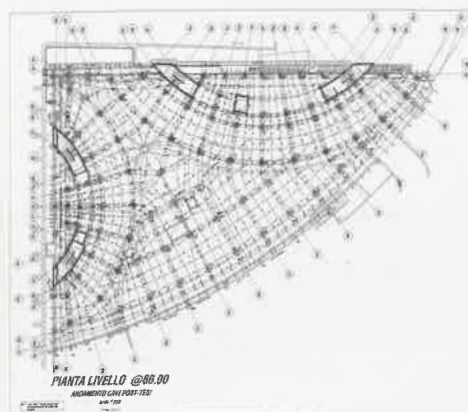
## Il progetto

L'idea alla base del progetto fu quella di creare un complesso polifunzionale che svolgesse la funzione di filtro, di spazio di attraversamento e luogo di scambi, nonché di polo di attrazione sia per la popolazione locale che per il turismo internazionale. Foster diede inizio alla progettazione effettiva dopo una attenta analisi di carattere urbanistico legata alla viabilità, alle caratteristiche orografiche del sito e all'impatto ambientale qualificando un'area strategica precedentemente dismessa. Spiega lo stesso Foster: "Il progetto scaturisce dall'ottimismo, dal credere nel futuro, in un edificio che genera la rigenerazione. Il WTC non è soltanto reale, ma è qualcosa di simbolico: rispetta il pensiero di pensare globalmente e agire localmente. A livello locale otto anni fa il sito era occupato da una industria dismessa. I principi che hanno portato al progetto sono locali: di creare uno spazio pubblico di relazione con il Monte Titano. Si è partiti da valori umanistici: sole, ombra, il concetto italiano di "vista", spazio pubblico, versatilità. Le idee di allora erano molto visionarie; anche se ci sono state modifiche, questo quadro iniziale di flessibilità e di uso misto era chiaro. Il concetto è che il WTC debba essere un edificio polifunzionale: albergo, ufficio, residenza. L'idea di avere un edificio flessibile che possa accogliere in qualunque punto qualunque funzione è un'idea nuova, sperimentale. Indipendentemente dalla progettazione è solo alla fine che si può sapere se un edificio ha successo. Di fatto oggi il 90% è stato già venduto o affittato".

Il successo dell'intera operazione è il risultato di una stretta collaborazione tra tutti i soggetti che hanno partecipato alla realizzazione, fin dal primo momento. "E' difficile far capire - ammette lo stesso Foster - sforzi e tempi dedicati alla progettazione. Tre anni sono lunghi. Di fatto il progetto risale a otto anni fa. Ciascun progetto rappresenta il risultato di un grosso sforzo di collaborazione. Il team deve riuscire a lavorare in una visione collettiva e farlo per lungo tempo è difficile". E senz'altro difficile è stato all'inizio, in un contesto italiano

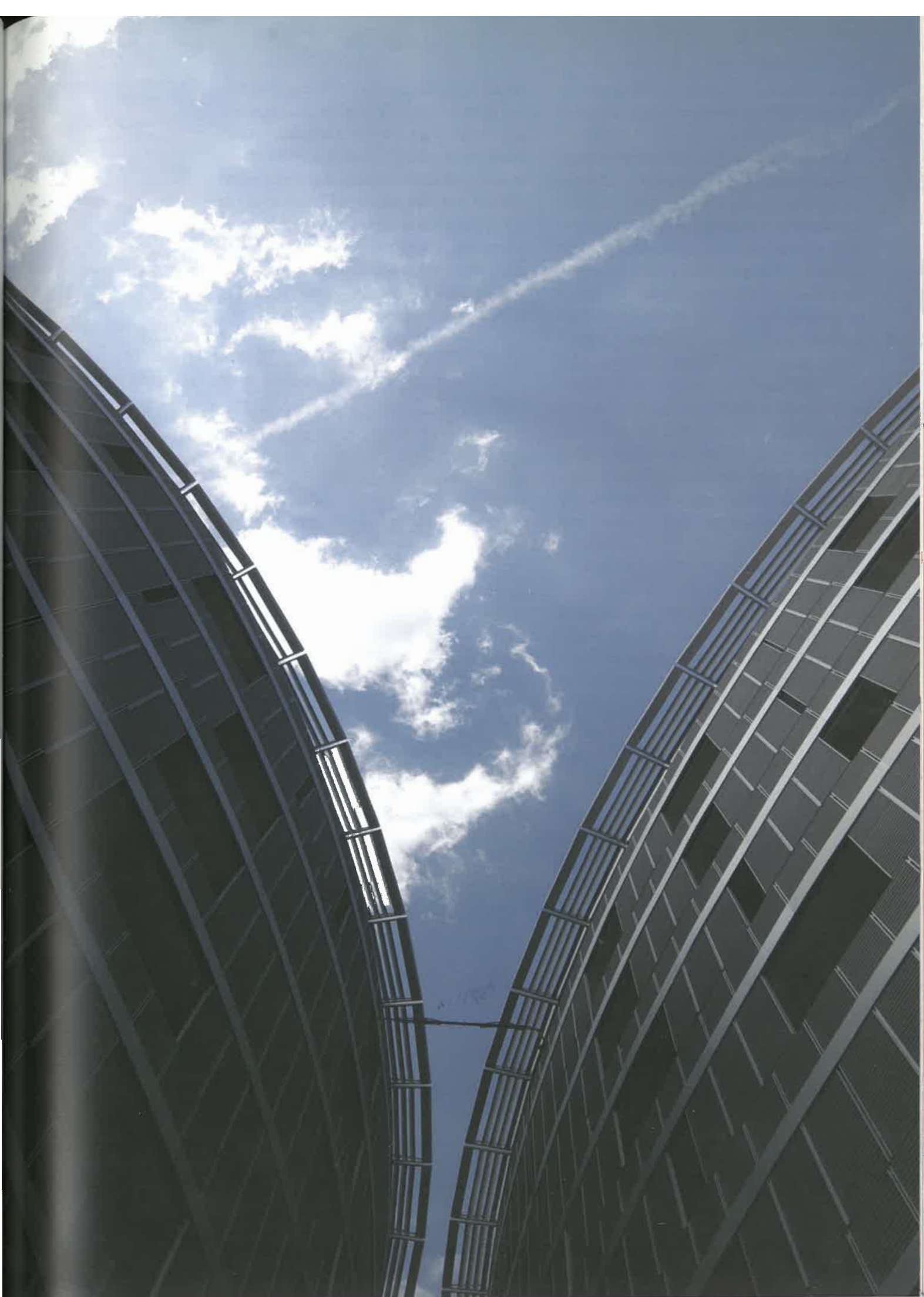
## Struttura mista ad alte prestazioni

*La soluzione adottata per il WTC è una struttura mista con pilastri acciaio-calcestruzzo (HPC) costituiti da due lamiere in acciaio Fe510 di grosso spessore che confinano un nucleo in calcestruzzo Rbk800. L'uso di due piatti in acciaio Fe510 e di due lamiere di testa da 5 mm ha permesso di gestire elementi monolitici, di altezza pari ad un piano, che hanno svolto anche la funzione di cassero per il calcestruzzo HPC. Il particolare tipo di solaio adottato, in calcestruzzo a soletta piena, armato con cavi post-tesi, ha permesso di poter considerare i pilastri soggetti quasi esclusivamente a sforzo normale, consentendo di arrivare per essi ad una dimensione di cm 16x60, costante per tutti i piani, bilanciando il variare delle tensioni di compressione solo diminuendo lo spessore dei piatti laterali in acciaio in funzione dell'altezza. Una particolare attenzione è stata posta per l'innesto dei pilastri rettangolari a struttura mista nei pilastri dei piani al di sotto della piazza a sezione circolare, realizzati sempre in calcestruzzo Rbk 80 MPa, al fine di eliminare qualsiasi fessurazione nella zona di giunto.*



legato a modi di operare tradizionali, entrare in sintonia con la filosofia, ovvero con il metodo di lavoro dello studio Foster. Come ha spiegato Giorgio Francesco Rosa - coordinatore dei progettisti - in Italia si è poco abituati a lavorare all'interno di un processo apparentemente così controllato, addirittura burocratizzato. Ma superate le difficoltà iniziali e una volta appresa la metodologia proposta da Foster, non si è potuto fare a meno di dividerla poiché ha permesso un controllo totale del progetto, una qualità del dettaglio e dell'esecuzione altrimenti impossibile. E non si può che imparare da chi come Foster progetta e realizza in tutto il mondo. Non è stato perciò difficile convincere la committenza. "Se si crea un bel luogo dove stare, si aumentano i valori e la buona qualità è valida per tutti. Questa visione ha visto coinvolti committenza e chi ha portato avanti questi principi teorici. Progetti come questo aiutano in tale direzione".

Nonostante il progetto abbia subito due varianti, nel lungo iter non sono andati persi spunti progettuali suggeriti da alcuni elementi della tradizione italiana: la "persiana", la "piaz-





za", la "pergola", sono stati reinterpretati da Foster in chiave contemporanea e denotano fortemente il WTC.

Il complesso edilizio si articola in tre volumi: uno zoccolo di base e due torri che volumetricamente sono assimilabili a due spicchi disposti perpendicolarmente fra loro e ravvicinati in un vertice dello zoccolo stesso. Lo zoccolo centrale, organizzato su tre livelli al di sotto della piazza, è stato progettato come un contenitore flessibile in grado di ospitare attività commerciali, sale conferenze e altre destinazioni d'uso. Il livello più basso, interrato, è destinato a parcheggio per i titolari delle attività ospitate nel WTC. Al livello piazza, invece, trovano spazio una serie di servizi quali negozi, bar, ristorante, palestra, banche e attività del terziario. I piani superiori (8 livelli) ospitano unità immobiliari separate destinate ad uffici, residenze e a una piccola struttura alberghiera.

### La struttura

Gli elementi verticali, pilastri e nuclei irrigidenti (vani scala, vani ascensore e cavedi), delle due torri del WTC sono in calcestruzzo armato gettato in opera. Le membrature orizzontali (solai ed elementi a sbalzo costituenti i terrazzi) sono state realizzate mediante solette piene in c.c.a. gettate in opera, armate con barre di acciaio FEB44K e cavi post-tesi. La particolare maglia strutturale delle torri, in cui i nodi sono ubicati all'intersezione fra linee circonferenziali e linee radiali, e le dimensioni importanti degli aggetti continui (2,30 m) hanno comportato la necessità di realizzare, nell'intersezione del fronte circolare con il retro lineare, luci di 6,85 m, sempre utilizzando una struttura orizzontale di spessore

variabile tra i 22 e i 30 cm. L'introduzione di una soletta in c.c.a. armata con cavi post-tesi ha permesso di ottenere, su richiesta di Foster, solai con luci superiori a 7 metri mantenendo una bassa incidenza di elementi verticali portanti rispetto ai metri quadrati di solaio portato (circa 1 su 60 m<sup>2</sup>). In questo modo, liberando il più possibile le piante da pilastri, è stata garantita una elevata flessibilità

### Dettagli di facciata

*La curvatura delle facciate prospicienti la piazza è un espediente progettuale che, oltre a conferire aerodinamicità alla struttura, riduce la possibilità di introspezione tra unità immobiliari contigue. La richiesta di polifunzionalità ha determinato, inoltre, la scelta di creare balconi aggettanti lungo tutte le facciate, in modo tale da spezzare la continuità dell'involucro e permettere la manutenzione individuale delle vetrate. Sul bordo della parte a sbalzo sono fissati elementi schermanti a lamelle di alluminio, le "persiane", con funzione di parapetto e di frangisole, che definiscono l'immagine complessiva dell'edificio.*





## Il Progetto

### Committente:

Società Immobiliare  
Centro Direzionale San  
Marino (Gruppo Ge.Cos.  
Spa Rimini)

### Progetto architettonico:

Lord Norman Foster  
Capo Progetto, arch.  
David Nelson  
Collaboratore, arch. Luis  
Mattania

### Progetto strutturale:

Antao Studio,  
ing. Roberto Ragini,  
ing. Vincenzo Collina

### Direzione Lavori

Antao Studio, arch. Luigi  
Moretti, ing. Roberto  
Ragini e ing. Marino  
Casagrande

### Coordinatore dei progettisti

geom. Giorgio  
Francesco Rosa

degli ambienti. Analogamente Foster chiese ai progettisti strutturali di realizzare dei pilastri che potessero essere inglobati nelle pareti divisorie poste fra le varie unità immobiliari, realizzate in cartongesso, in modo da nasconderli alla vista degli utilizzatori degli ambienti. Fu presa subito in considerazione l'idea di utilizzare calcestruzzi ad elevata resistenza (HPC), ancora di difficile utilizzo in Italia (è infatti necessaria una autorizzazione speciale dal Ministero dei LL.PP.) ma più agevolmente ammissibili nella Repubblica di San Marino dove è comunque il progettista a rispondere di tutte le scelte utilizzate sia staticamente che tecnologicamente, materiali compresi. Furono quindi prese in considerazione le Normative Europee e Statunitensi e fu verificata la possibilità di produrre un calcestruzzo ad alta resistenza da parte della più importante centrale di betonaggio sammarinese il cui nuovo impianto, certificato ISO9001, consentiva un controllo costante del prodotto. Lo studio per la messa a punto della miscela cementizia fu affidato ad una società di

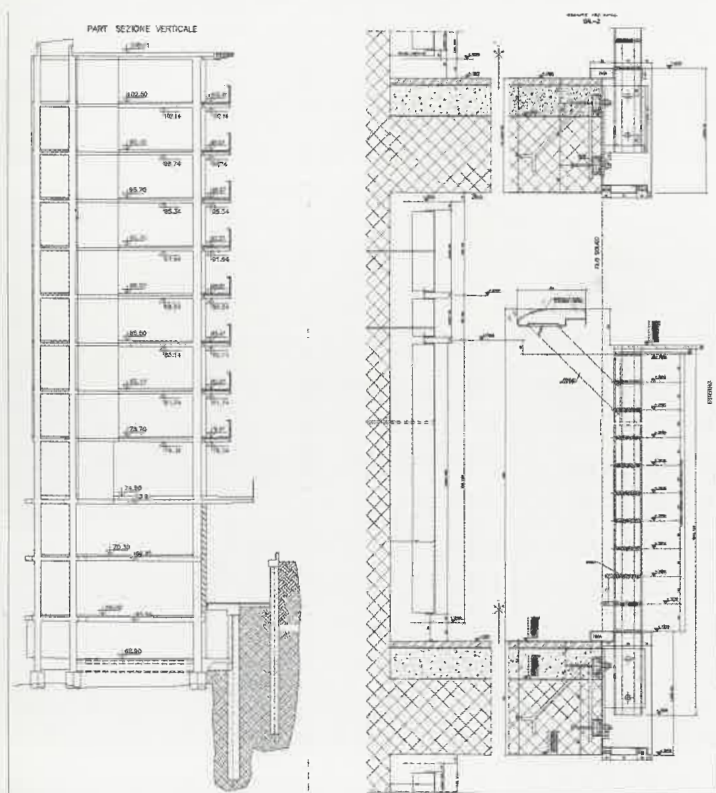
servizi di primaria importanza e in poco tempo, si poté dare inizio ad una campagna di sperimentazione, prima in laboratorio su provini, poi realizzando i pilastri di un edificio, sempre a San Marino.

La classe richiesta per il nuovo calcestruzzo era Rbk 60 MPa ma l'obiettivo era il raggiungimento di un valore Rbk 80 MPa necessario per i pilastri del World Trade Center. I risultati dell'analisi strutturale del WTC e le ferme decisioni dello studio Foster portarono alla conclusione che l'uso del solo calcestruzzo Rbk80 non fosse sufficiente a mantenere le dimensioni dei pilastri entro i limiti assegnati (16 cm di spessore). Si arrivò, quindi, per le due torri alla soluzione poi adottata: pilastri in struttura mista acciaio-calcestruzzo (HPC) costituiti da due lamiere in acciaio Fe510 di grosso spessore che confinano un nucleo in calcestruzzo Rbk800.

Per i nodi fra pilastro e solaio fu adottata una soluzione che prevedeva la formazione di un capitello realizzato sia con armatura lenta che con piatti in acciaio Fe 510 sui

## La "pelle"

La vera "pelle" dell'edificio è costituita da elementi frangisole che formano parapetti fissi alti circa 1200 mm e specchiature superiori in parti fisse ed in parte scorrevoli su monorotaia la cui altezza è di circa 1900 mm. I brise-soleil sono composti da alette orizzontali in profilato estruso di alluminio di colore argento fissate, ad un interasse di 80 mm, su una cornice perimetrale sempre in alluminio estruso.



quali far passare i cavi di post-tensione. Accorgimenti particolari furono inoltre adottati per l'unione pilastro-pilastro che è stata realizzata nello spessore del solaio per evitare costose opere di bullonatura e di messa in verticale dei pilastri stessi. Furono a tal fine usate barre quadre di ripresa saldate sul pilastro sottostante e immerse nel calcestruzzo del pilastro superiore. Tale giunzione si integrava perfettamente con i piatti del capitello, costituendo un nodo di grande efficacia e facilità di esecuzione.

### **I solai a cavi post-tesi**

Questa tecnologia costruttiva prevede l'utilizzo di trefoli del diametro di 15.2 mm aventi una sezione compatta di 165 mm<sup>2</sup>. Questi sono protetti da una sostanza grassa lubrificante e racchiusi all'interno di una guaina estrusa in polietilene dello spessore di 1.5 mm. Il rivestimento di grasso e la guaina costituiscono una doppia protezione alla corrosione per l'acciaio e, allo stesso tempo, impediscono al trefolo di aderire al calcestruzzo nel quale è inglobato.

Le maglie strutturali dei solai variano da 12 m a 8 m con sbalzi fino a 7.5 m. I sovraccarichi accidentali variano da 1000 kg/m<sup>2</sup> a 250 kg/m<sup>2</sup> a seconda della funzione; di conseguenza la struttura dei solai è stata risolta con solette di 30 cm e 24 cm di spessore. Lo spessore maggiore è stato usato per tutto il piano della piazza dove il carico accidentale è stato tenuto pari a 1000 kg/m<sup>2</sup> per consentire il transito di veicoli pesanti. La geometria dei cavi, che sfrutta al massimo lo spessore del solaio, segue il reticolo funicolare spaziale del carico semi-permanente; gli ancoraggi, ove il trefolo è bloccato, sono stati disposti lungo il perimetro del solaio e posti nel punto medio della sezione.

Il progetto strutturale è stato mirato all'ottenimento di una struttura che, in condizioni quasi-permanenti, fosse sottoposta solo a sforzo normale centrato - il cui valore è di norma tenuto minore di 20 kg/cm<sup>2</sup> - con assenza di azioni flessionali e di taglio. L'assenza di tali sollecitazioni rende nulla la rotazione dei vincoli, almeno per quanto riguarda l'azione equilibrata della trazione dei cavi; inoltre si hanno frecce elastiche modestissime e assenza di fluage e di accorciamento elastico vista la modesta entità della tensione.

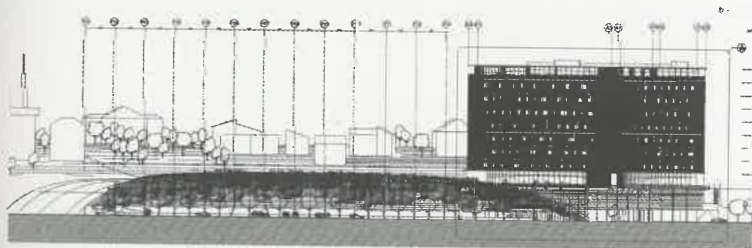
Tutta la resistenza flessionale dei pilastri rimane disponibile per resistere alle azioni non equilibrate (azione sismica e azione del vento). Il getto del solaio è di norma condotto per porzioni di 1300 m<sup>2</sup> max al fine di evitare che l'azione del ritiro del calcestruzzo e il seppur modesto accorciamento elastico connesso alla post-compressione possano indurre sforzi eccessivi nei pilastri. Per questo motivo i solai del WTC sono stati divisi in conci separati fra loro da giunti provvisori attivi per 4/5 mesi, trascorsi i quali vengono rigidamente bloccati. Essi sono collegati in punti strategici e sono costituiti da lame in acciaio affiancate, ma collegate da una parte ad un concio e dall'altra al concio successivo. Serrando i bulloni, saldando le piastre fra loro e saturando lo spazio lasciato fra i cavi in condizioni finali si ripristina la monoliticità del solaio. Sono stati eseguiti giunti provvisori anche tra il solaio e i vani scala e ascensori, essendo questi ultimi in pareti di cls armato di grande rigidità.





## La pergola e il parcheggio

*A copertura di tutto il parcheggio è stata realizzata una spettacolare tensostruttura metallica sulla quale si sta progressivamente aggrappando una pianta di gelsomino. La "pergola" voluta da Foster vuole mitigare l'impatto ambientale della struttura del parcheggio ripristinando la continuità di una collina verde.*



Tesando i cavi di post-compressione dopo soli 2/3 giorni dal betonaggio (quando il calcestruzzo raggiunge una resistenza  $R_{ck}$  di circa  $150 \text{ kg/cm}^2$ ), è stato possibile un disarmo immediato con recupero delle cassaforme. E' stato, inoltre, possibile eseguire il betonaggio del successivo solaio puntellandosi sul solaio inferiore già disarmato e, quindi, collaudarlo pienamente, ottenendo così il completamento della maturazione del cls in condizioni di compressione triassiale impedendo ogni possibile formazione di fessura per ritiro differenziale.

La struttura realizzata è perfettamente piana, è esente da fessure, ed è anche perfettamente impermeabile.

Per quanto riguarda le operazioni di tesatura, ed in particolare per l'utilizzo dei martinetti, è stato previsto uno spazio di 1 metro davanti all'ancoraggio in senso assiale al cavo. Le operazioni di tesatura sono state registrate per ogni singolo cavo, in modo da avere un controllo puntuale e costante delle forze introdotte con i cavi.

Il progetto strutturale ha altresì tenuto conto della necessità di prevedere i passaggi per le colonne impiantistiche in prossimità delle colonne strutturali. Avendo una struttura costituita da una soletta a spessore costante si è adottato l'accorgimento di sdoppiare le strisce di trave facendo passare i cavi non sull'asse dei pilastri, ma metà a destra e metà a sinistra del pilastro consentendo così la forabilità anche in asse. Ciò è stato ottenuto grazie a un rinforzo strutturale locale costituito da lame in acciaio e spezzoni di trave in acciaio dimensionate per assorbire interamente le reazioni trasmesse dai cavi.

La compattezza dei solai a soletta piena garantisce un ottimo comportamento sia dal punto di vista acustico per via aerea che termico grazie alla grande massa ed inerzia termica. Il solaio a cavi post-tesi ha, inoltre, un ottimo comportamento dal punto di vista della resistenza al fuoco in quanto la post-compressione chiude ogni fessurazione dovuta all'effetto del ritiro. Inoltre ha una grande duttilità dal punto di vista sismico.

*segue a pagina 1046*