



***Gli ingegneri friulani
a New York
sulla Freedom Tower***

rassegna tecnica

del Friuli Venezia Giulia

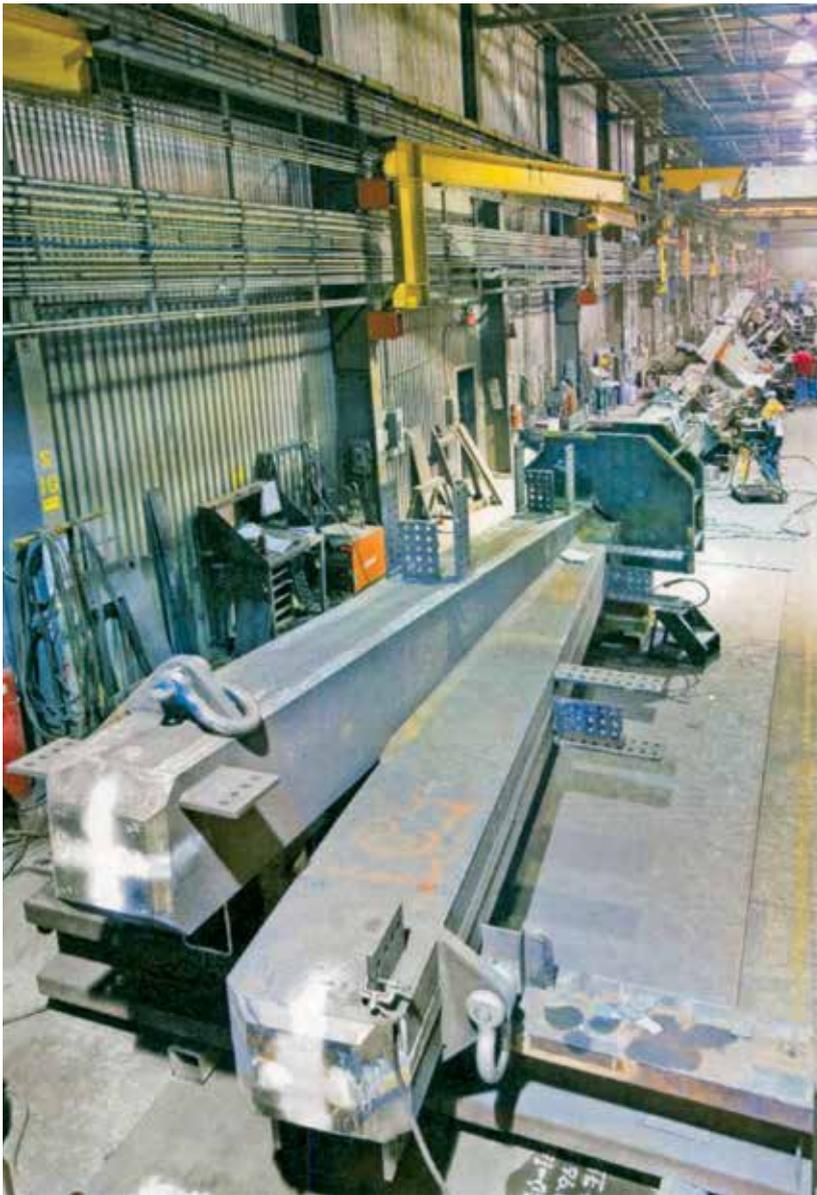
6

ANNO LXII - NOVEMBRE/DICEMBRE 2011

POSTE ITALIANE S.p.A. - Sped. in abbonamento postale - D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 n. 46) art. 1, comma 1, DCB UDINE

Publicazione bimestrale sotto gli auspici delle Associazioni e degli Ordini degli Ingegneri Architetti Agronomi Forestali e Geologi del Friuli-Venezia Giulia

I.P.



La Torre 1 del World Trade Center di New York (1 WTC) è il più importante tra gli edifici che occuperanno Ground Zero, in un progetto che vede, su un'estensione di oltre 6,4 ettari, un intervento edilizio complesso, che unisce al significato simbolico la rivalorizzazione commerciale dell'area e la riorganizzazione del sistema delle infrastrutture sotterranee, con una superficie commerciale lorda prevista, su 5 torri, di 930.000 mq e l'intersezione fra 13 linee di metropolitana, il nodo principale del sistema ferroviario per il New Jersey (PATH-Port Authority Trans-Hudson) e un futuro collegamento con Long Island e gli aeroporti (box 1). La 1 WTC raggiungerà, alla sommità dell'antenna che la sovrasta, un'altezza di 1.776 ft (541,32 m), esplicito rimando alla data della dichiarazione di indipendenza degli Stati Uniti d'America (ratificata a Filadelfia, il 4 luglio 1776), andando a costituire un elemento cardine, tanto evocativo, quanto materiale, dello skyline di Manhattan.

Gli aspetti innovativi con la tecnologia avanzata della facciata continua

Gli elementi strutturali e costruttivi della Torre 1 del World Trade Center

La realizzazione della 1 WTC, su progetto architettonico dello studio Skidmore, Owings and Merrill LLP (box 2), vede convergere l'applicazione di aspetti innovativi, in termini strutturali e costruttivi, con la dichiarata intenzione di integrare le elevate capacità portanti della struttura con le tecnologie avanzate della facciata continua (*curtain wall*), in un'ottica di sicurezza e sostenibilità.

Descrizione dell'opera

L'ubicazione

La 1WTC occupa l'angolo a

Anna Frangipane Giuseppe Suraci

nord-ovest dell'area del World Trade Center, a ridosso della Vesey Street e della West Street, nella parte meridionale dell'isola di Manhattan (Lower Manhattan), cuore del quartiere finanziario di New York, ubicazione che ha fortemente condizionato gli aspetti logistici e di organizzazione del cantiere, in relazione agli spazi minimi utilizzabili per lo stoccaggio e le lavorazioni e alla difficoltà di accesso dei mezzi di trasporto dei materiali.

L'area, "rubata" all'alveo del fiu-

me Hudson dai lavori di bonifica dell'800, ha restituito, durante le operazioni di scavo delle opere infrastrutturali sotterranee, parte dello scafo di una barca, databile al secolo precedente, utilizzata, secondo gli archeologi, come materiale di riempimento delle colmate.

La valenza simbolica

La costruzione della 1WTC è strettamente legata al significato di ri-

prof. ing. Anna Frangipane, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICA) dell'Università degli Studi di Udine
dott. ing. Giuseppe Suraci, libero professionista in Udine

nascita dell'area devastata dall'attentato del 2001, icona del prevalere, con la ricostruzione, dei principi fondanti di libertà, in un voluto forte contrasto con il contiguo WTC Memorial, costituito da una doppia voragine, scavata nel terreno, in corrispondenza del sedime delle Twin Towers, per il quale è atteso un flusso di oltre 3 milioni di visitatori l'anno.

Lasciata al WTC Memorial la valenza rievocativa, la 1WTC si eleva, torre più alta di NY, a significare, nella forma simmetrica con antenna sovrapposta -che rimanda altre icone fondanti, quali il Chrysler Building e l'Empire State Building- e nella matericità -resa cristallina dalla scelta di curtain wall vetrati- la speranza nel futuro e il significato di elemento di riferimento della comunità, sottolineato dallo specchiarsi del cielo sulle superfici inclinate, in un modificarsi continuo dei riflessi, del rapporto con le torri vicine.

La 1WTC vuole essere, così, simbolo della rinata vitalità economica della nazione e costituirne un nuovo, forte, elemento identitario.

La 1WTC declina tali significati, volutamente, anche in relazione ai rimandi a cifre simboliche (l'altezza complessiva, la posizione di alcuni elementi marcapiano, ...) e all'efficienza dei sistemi tecnologici (le soluzioni progettuali rispondono, infatti, ai più alti livelli, ai requisiti formali, strutturali, di progettazione urbana, sicurezza e sostenibilità).

La geometria

La 1WTC è costituita (box 3) da un basamento cubico, di base 61 x 61 m, impronta prossima a quella delle Twin Towers (63 x 63 m), da cui spiccano 8 lunghi triangoli isosceli, ottenuti per rastremazione del volume verso l'alto.

Il basamento ospita una *hall* imponente (15 m di altezza), sovrastata da una serie di piani tecnici, per un'altezza complessiva di 57 m.

Al di sopra si collocano 71 piani di uffici, fino a raggiungere la quota di 345 m, alcuni piani tecnici e 3 affacci panoramici sovrapposti, coronati da un parapetto in vetro e acciaio, a pianta quadrata (46 x 46 m), ruotato di 45° rispetto al basamento, la cui fascia terminale segna la altezza che raggiungevano le Twin Towers (415 e 417 m).

Un'antenna, sorretta da una piattaforma circolare, funzionale alla collocazione di apparecchiature per le comunicazioni, porta alla quota di 541 m, facendo della 1WTC, come detto, la torre più alta di New York.

estensione area	64.750 m ² (16 acre)
superficie commerciale in costruzione	930.000 m ² (10 Mft ²)
superficie commerciale distrutta	1.020.000 m ² (11 Mft ²)

box 1 - Area del WTC: principali grandezze in gioco

committenza	I World Trade Center LLC, società della Port Authority of New York and New Jersey
progettazione architettonica	Skidmore, Owings & Merrill, LLP
consulenza artistica (antenna)	Kenneth Snelson
costruttore	Tishman Construction Corporation
progettazione strutturale	WSP Cantor Seinuk Group Schlaich Bergermann und Partner GbR (antenna)
progettazione impianti meccanici ed elettrici	Jaros Baum & Bolles, Inc.
consulenza sulla sostenibilità	Veridian Jaros Baum & Bolles, Inc. Steven Keppler & Associates
progettazione paesaggistica	Peter Walker and Partners
progettazione illuminotecnica	Claude R. Engle, Lighting Consultant Scott Matthews: Brandston Partnership Inc. (Podium)
aspetti dell'ingegneria civile e dei trasporti	Philip Habib & Associates
aspetti della sicurezza	Ducibella, Venter & Santore Weidinger Associates
progettazione acustica	Cerami & Associates
progettazione movimentazione verticale	Jaros Baum & Bolles, Inc
progettazione geotecnica	Mueser Rutledge Consulting Engineers
prove galleria del vento	Rowan Williams Davies & Irwin Inc.

box 2 - Committenza e principali progettisti (<http://www.som.com>)

I materiali

La scelta dei materiali strutturali e di finitura è strettamente collegata ai requisiti progettuali di sicurezza, innovazione tecnologica e valenza simbolica.

La scelta di uno schema strutturale ad anima in c.a. (blocco scale ascensori) e anello periferico in acciaio strutturale (uffici) risponde, infatti, come di seguito approfondito, alla necessità di garantire una sufficiente resistenza al fuoco e il deflusso agevole degli occupanti in condizioni di emergenza, mentre il rivestimento con

un *curtain wall* a pannelli di grandi dimensioni, in vetro a elevate prestazioni, vuole dimostrare palesemente il livello tecnologico innovativo nel settore delle costruzioni e sottolineare le potenzialità espressive di superfici riflettenti inclinate.

In questo, gli elementi in acciaio inox che li confinano, volutamente, indirizzano il percorso visivo verso la base dell'edificio, unendo le superfici vetrate ai sottostanti terrazzamenti degli spazi pubblici aperti, effetto che i progettisti intendono rendere ancora più evidente di notte, con un'illu-

altezza complessiva	541,32 m (1.776 ft)
altezza basamento	20 m (65 ft)
altezza blocco uffici	288 m
numero complessivo piani	104
numero piani uffici	71
interpiano uffici	4,06 m
quota affacci panoramici	377 m (1.238 ft), 380 m (1.248 ft), 386 m (1.265 ft)
quote fascia parapetto	415 m (1.362 ft), 417 m (1.368 ft)
superficie di base	61 m x 61 m (200 ft x 200 ft)
superficie parapetto in sommità	46 m x 46 m (150 ft x 150 ft)
superficie media occupata	3.716 m ² /piano (40.000 ft ² /piano)
superficie media calpestabile	2.369 m ² /piano (25.500 ft ² /piano)
progettazione movimentazione verticale	Jaros Baum & Bolles, Inc
progettazione geotecnica	Mueser Rutledge Consulting Engineers
prove galleria del vento	Rowan Williams Davies & Irwin Inc.

box 3 - 1WTC: principali grandezze in gioco

Fig. 1

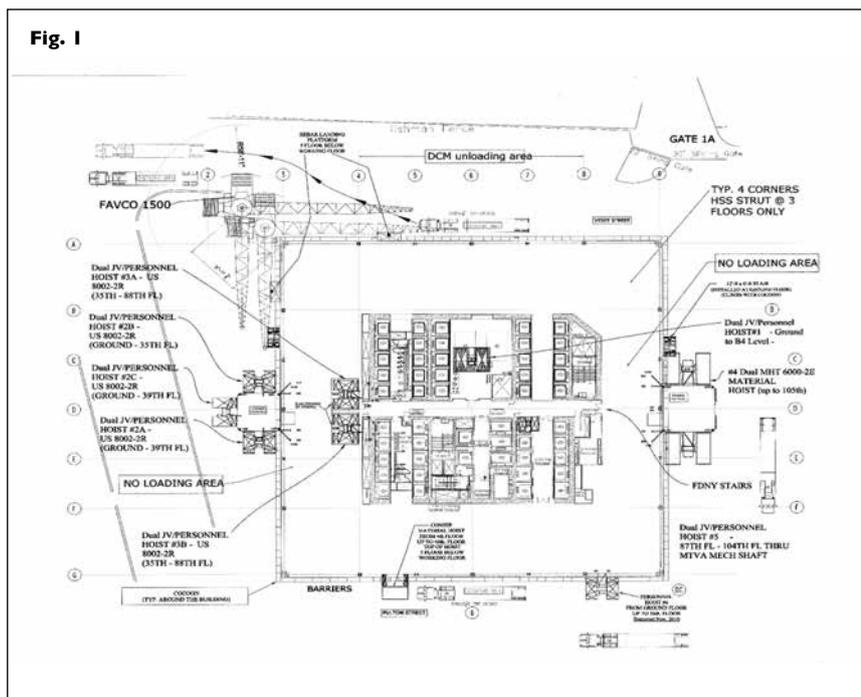


Fig. 2

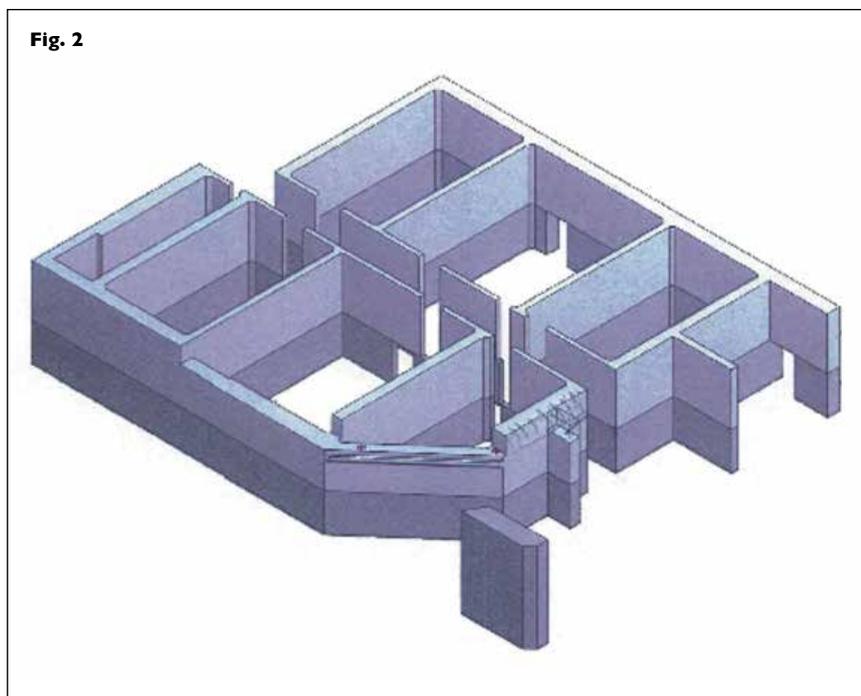
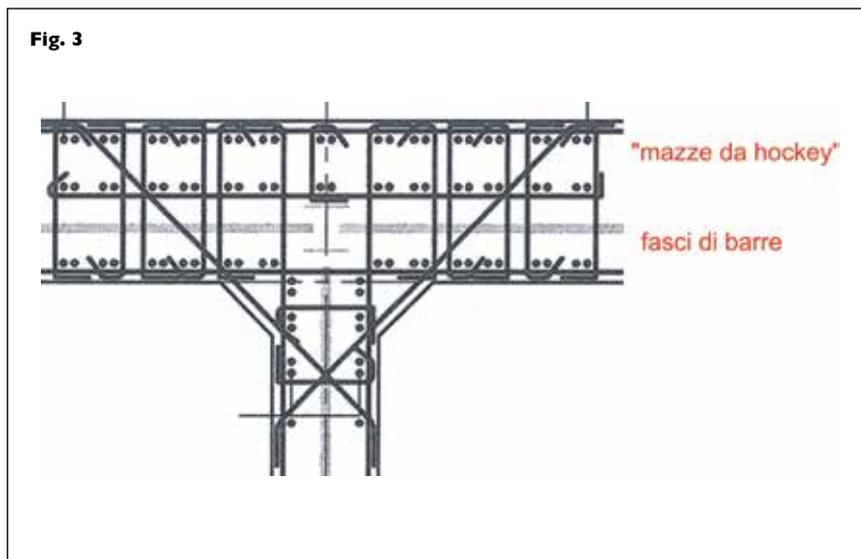


Fig. 3



minazione che li trasformi in nastri luminosi, di collegamento della torre con il parterre circostante.

Il progetto prevede che il basamento sia accessibile dai 4 lati, attraverso ampi vani ($h = 18\text{ m}$), segnati da pensiline in vetro, sostenute da stralli in acciaio. Gli accessi principali (a nord e a sud) sono caratterizzati dall'utilizzo di pannelli multistrato di vetro microico, con proprietà riflettenti cangianti, la cui resa ottica è stata lungamente studiata. La grande *hall*, organizzata intorno al nucleo centrale, risulta, così, illuminata dalla luce naturale che attraversa le vetrate, le cui caratteristiche di resistenza, peraltro, rispondono a standard estremamente elevati, in relazione alla garanzia di sicurezza richiesta verso possibili attacchi terroristici.

Schermature in vetro, negli angoli dell'area scoperta circostante, si intende rispondano tanto a una funzione frangivento che di prima difesa, unendo la trasparenza e l'accessibilità ai requisiti di sicurezza dell'edificio.

La scelta dei materiali sottolinea, parallelamente, l'importanza del luogo, in quanto centro degli scambi commerciali mondiali: il marmo di Carrara che riveste la *hall* ha, da questo punto di vista, un evidente valore celebrativo.

Altrettanto celebrativa è la monumentalità degli elementi del *curtain wall*, in grado di sopportare i carichi del vento e rispondere ai requisiti di sicurezza. Si tratta di elementi multistrato a elevate prestazioni, di dimensioni $1,52 \times 4,40\text{ m}$ (peso: 2.722 kg/pannello), con un sistema di fissaggio innovativo, in grado di coprire l'interpiano senza collegamenti intermedi ai solai. In corrispondenza degli spigoli della 1WTC, sono posti in opera dei pannelli in acciaio inox, anche questi privi di collegamenti intermedi ai piani. Per il completamento del rivestimento, verranno posti in opera oltre 12.000 elementi.

Le destinazioni d'uso

La 1WTC è un edificio, di proprietà pubblica, a prevalente destinazione d'uso per uffici (box 4). A questa si affiancano spazi per gli affacci dei visitatori (observation decks), un ristorante e il sistema antenna-anello di sostegno, a servizio delle reti di comunicazione.

Nei piani interrati sono presenti dei volumi di deposito, aree di parcheggio, negozi e, come premesso, l'accesso a 13 linee della rete della metropolitana (WTC Hub) e a quella ferroviaria verso il New Jersey (PATH).

La sicurezza

La progettazione dell'edificio ha rivolto un'estrema attenzione ai sistemi di sicurezza, ben oltre quanto richiesto dalla normativa della città di NY, costituendo, di fatto, un nuovo standard per gli edifici alti.

Avendo ben presenti le deficienze riscontrate durante le fasi del collasso delle Twin Towers, la struttura metallica perimetrale, protetta da un rivestimento ignifugo, viene a gravitare intorno al nucleo in c.a., compartimentato, spesso quasi un metro, che racchiude il sistema delle comunicazioni verticali (ascensori, montacarichi, scale). Le vie di fuga sono state sovradimensionate, sono previsti luoghi sicuri ai piani, vani scala riservati alle squadre di pronto intervento, sistemi di ventilazione forzata, con filtri biologici e chimici, gruppi di continuità per l'emergenza. La posizione stessa dell'edificio è stata arretrata, in fase di realizzazione, rispetto alla West Street, vedendone aumentata la distanza da 8 m a 27 m.

La sostenibilità

In quanto icona di innovazione tecnologica, la progettazione della 1WTC ha avuto come obiettivi paralleli la massimizzazione dell'efficienza degli impianti e la riduzione dei rifiuti e degli scarichi.

Per quanto riguarda, in particolare, il risparmio energetico e idrico, le prestazioni superano quanto richiesto dai codici guida (in questo caso le World Trade Center Sustainable Design Guidelines).

Per quanto riguarda il risparmio energetico, l'obiettivo è il raggiungimento della *LEED Gold Certification* per l'intero edificio. La scelta di vetrate con rivestimenti opportuni, basso emissivi, capaci di ridurre la necessità di illuminazione artificiale e minimizzare gli apporti solari termici, ne è la logica conseguenza. A servizio della 1WTC sarà, inoltre, installato un impianto a celle a combustibile di nuova generazione (1.2 MWatt), che dovrebbe portare a una riduzione dei consumi maggiore del 20% di quella richiesta

superficie uffici	242.000 m ² (2,6 Mft ²)
spazi commerciali sotterranei	5.110 m ² (55.000 ft ²)

box 4 - 1 WTC: principali destinazioni d'uso

posa prima pietra	luglio 2004
getto fondazioni	aprile 2006
completamento stimato struttura metallica	inizio 2012
completamento stimato sovrastruttura in c.a.	I quadrimestre 2012
fine lavori	entro il 2013

box 5 - 1 WTC: tempi di realizzazione

superficie del nucleo (core)	+/- 14.900 ft ² (1.347 m ²)/piano, 1/3 della superficie dell'edificio
-------------------------------------	--

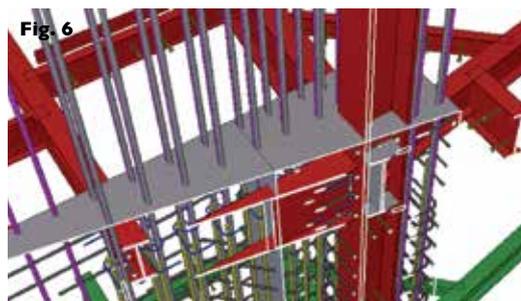
box 6 - 1 WTC: caratteristiche nucleo centrale

cos'è il calcestruzzo a elevata resistenza?	l'ACI definisce calcestruzzo a elevata resistenza il cls con resistenza a compressione maggiore di 6.000 psi (41 MPa)
vantaggi del calcestruzzo a elevata resistenza	<ul style="list-style-type: none"> • possibilità di ridurre lo spessore delle parti in cls • maggiore durabilità, resistenza alla corrosione e all'abrasione • livello maggiore di prestazione strutturale, soprattutto in relazione alla resistenza e alla durata • riduzione delle quantità di materiale utilizzate nella costruzione (cioè, cls, acciaio etc.)
mix-design del calcestruzzo a elevata resistenza	<ul style="list-style-type: none"> • gli aggregati devono essere resistenti e stabili • sono presenti, in genere, uno o più leganti supplementari (scorie, ceneri etc.) • il rapporto a/c è, in genere, basso (0,23-0,35) • il contenuto del legante è compreso tra 700 lbs/yd³ (415 kg/m³) e 1.100 lbs/yd³ (650 kg/m³) o di più

box 7 - Caratteristiche del calcestruzzo ad elevata resistenza

calcestruzzo ad elevata resistenza nella 1WTC - ulteriori aspetti	<ul style="list-style-type: none"> • lavorabilità • riduzione segregazione (vibratori esterni) • consistenza della miscela • resistenze tipiche a rottura: <ul style="list-style-type: none"> - media = +/- 14.900 psi (103 MPa) - modulo di elasticità tipico media = +/- 7.500 ksi (51.710 MPa)
parametri tipici del mix-design per la 1 WTC (miscela da 14.000 psi / 96,5 MPa)	<ul style="list-style-type: none"> • rapporto a/c: 0,30 • leganti totali: +/- 900 lbs (408 kg) - cemento = +/- 300 lbs (136 kg) - ceneri volanti = +/- 70 lbs (32 kg) - scorie = +/- 475 lbs (215 kg) • aggregati: diametro nominale 3/4" (2 cm) e 3/8" (1 cm) • allargamento del cls: +/- 26" (66 cm), media misurata • contenuto d'aria: 3% • modulo elastico: +/- 7.500 ksi (51.710 MPa), media misurata

box 8 - caratteristiche del calcestruzzo ad elevata resistenza impiegato nella 1 WTC.



pompabilità	<ul style="list-style-type: none"> • sollevamento del calcestruzzo: 1.300 ft (396 m) • velocità di trasporto fino a 70 CY (54 m³)/ora (per ciascuna delle 2 pompe stazionarie) • pressione nella tubazione = +/- 2.500 psi (170 atm / 17.0 MPa) • pressione nella pompa = +/- 3.250 psi (221 atm / 22.1 MPa) • allargamento del cls (caratteristica della pompabilità): +/- 27" (69 cm) • fluidità (per l'elevata densità dell'armatura)
--------------------	---

box 9 - IWTC: caratteristiche di pompabilità del calcestruzzo a elevata resistenza

influenza delle condizioni meteorologiche	<ul style="list-style-type: none"> • correzione stagionale del rapporto acqua/cemento • fluttuazioni giornaliere di temperature e umidità • temperature degli aggregati • saturazione degli aggregati • cls invernale • miscele additivate • cls con temperature elevate (uso ghiaccio e acqua ghiacciata)
--	---

box 10 - IWTC: problemi connessi ai getti in condizioni meteorologiche estreme

smaltimento del calore d'idratazione nei getti massivi	<ul style="list-style-type: none"> • temperatura interna massima= 160 Deg. F (71 °C) • massima differenza di temperature tra il nucleo e la superficie del getto= 35 Deg. F (20 °C) <p>vedi Tabella 3.1 delle ACI 306 - linee guida per la variazione del gradiente di temperatura ammissibile</p>
---	--

box 11 - IWTC: smaltimento del calore d'idratazione nei getti massivi (spessore maggiore di 30" (76 cm))

acciaio di armatura	<ul style="list-style-type: none"> • peso totale - 26.000 t • dimensione tipica delle barre (da #4 a #20 = da 4/8" a 20/8" = da 13 mm a 64 mm) • travi in post-tensione (lunghezza +/- 120 ft (37 m), altezze 16 ft (4,9 m)) • quantità tipica fornita quotidianamente (4 carichi - 20 t/carico) • sistema di sollevamento/gestione del materiale <ul style="list-style-type: none"> - doppia guida di sollevamento nel core - sistemazione del materiale, circa 4 piani al di sopra delle operazioni del core • operazioni di piegatura <ul style="list-style-type: none"> - 3 in cantiere - 2 fuori cantiere
----------------------------	--

box 12 - IWTC: alcuni dati sulle armature del CA.

Fig. 1 - Planimetria. Si noti il rapporto tra la superficie occupata dal core e quella utile. **Fig. 2** - Configurazione del core. **Fig. 3** - Armatura del nodo tra pareti ortogonali del core. **Fig. 4** - Armatura nodo tra pareti d'angolo del core. **Fig. 5** - Intersezione travi di impalcato in corrispondenza di un angolo del core. **Fig. 6** - Modello 3D per lo studio delle interferenze tra acciaio strutturale e armature del c.a. **Fig. 7** - Nodi fra travi di impalcato e colonne conglobate nel core. **Fig. 8** - Armatura del core. Osservare, a sinistra, il profilato in acciaio strutturale con pioli di connessione. **Fig. 9** - Completamento del solaio in lamiera grecata in corrispondenza delle pareti del core. **Fig. 10** - Dettaglio armature inclinate a 45° per contrastare lo scorrimento tra i getti consecutivi. **Fig. 11** - Telaio perimetrale: predisposizione per le giunzioni di controventi di parete. **Fig. 12** - Telaio perimetrale. Notare il montacarichi per materiale (al centro) e la gru per il calcestruzzo (a sinistra). **Fig. 13** - Travi di impalcato in opera; notare la sagomatura per la formazione della cerniera plastica. **Fig. 14** - Visualizzazione della formazione di una cerniera plastica. Prova di laboratorio. **Fig. 15** - Trattamento superficiale con schiuma intumescente esteso all'intradosso dell'impalcato. **Fig. 16** - Collegamento bullonato trave-colonna.



dalla normativa della città di NY.

Riguardo al consumo d'acqua, si prevede che questo possa essere ridotto del 30% rispetto a quanto richiesto dalla stessa normativa per questo tipo di edifici; il 100% dell'acqua piovana dovrebbe essere raccolto e utilizzato nelle pertinenze verdi e nello specchio d'acqua del WTC Memorial.

I tempi di realizzazione e i costi

I lavori di costruzione (box 5) sono formalmente iniziati nel luglio 2004, con la posa della prima pietra; temporaneamente sospesi per problemi amministrativi, sono stati ripresi nell'aprile 2006, con l'inizio del getto delle fondazioni. Si prevede il completamento della struttura metallica per l'inizio del 2012 e il completamento della sovrastruttura in c.a. per il primo quadrimestre del 2012. La fine lavori, inizialmente stimata per il settembre 2011, è progressivamente slittata ed è oggi fissata entro il 2013.

Per quanto riguarda i costi, la 1WTC è indicata come uno degli edifici più costosi al mondo, con una stima di spesa, nel 2007, di 3 miliardi di dollari, pari circa 12.380 \$/m², che oggi raggiunge i 3,2 miliardi di dollari.

Gli aspetti strutturali

L'organismo resistente

L'organismo resistente è costituito da un nucleo centrale (*core*), di cemento armato, accoppiato ad una intelaiatura d'acciaio disposta sul perimetro, tramite gli impalcato di piano. La resistenza per le sollecitazioni dovute alle forze verticali è affidata sia alle strutture metalliche sia a quelle di c.a., le azioni orizzontali dovute al vento si scaricano prevalentemente sul nucleo. Al riguardo si osserva che l'involucro della torre ha una forma aerodinamica che riduce sensibilmente gli effetti del vento.

Il core ha configurazione planimetrica scatolare (figg. 1 e 2) che occupa un'area pari a circa un terzo della superficie coperta (box 6).

Le pareti di taglio sono disposte

nelle due direzioni principali della pianta e hanno spessore che alla base raggiunge i 90 cm circa. Le connessioni reciproche tra pareti ortogonali sono sagomate a coda di rondine in modo da risultare rigide e particolarmente efficaci per la trasmissione delle azioni taglianti (fig. 3). La geometria del *core* e le dimensioni degli elementi che lo compongono sono funzionali al raggiungimento dei necessari requisiti di resistenza alle azioni orizzontali e di rigidezza trasversale, per limitare gli spostamenti¹.

Le pareti del *core* (*shear walls*) sono realizzate con calcestruzzo ad alta resistenza, rinforzato con barre d'armatura e con profilati d'acciaio strutturale. Questi ultimi sono inseriti in corrispondenza ai punti d'intersezione delle travi d'impalcato con le pareti del *core* (figg. 4-5-6).

I collegamenti fra travi e profilati inseriti nel calcestruzzo, vengono realizzati prima della esecuzione dei getti delle pareti (figg. 7-8-9). Tale circostanza, consentendo la costruzione dei solai prima del completamento delle pareti sottostanti, facilita l'organizzazione del cantiere (maggiori spazi per il deposito di materiali) e velocizza l'esecuzione delle opere (più squadre che lavorano contemporaneamente).

Gli impalcati posti all'interno del *core* sono realizzati, prevalentemente, con rigide solette monolitiche, mentre quelli tessuti nella zona anulare, compresa tra il perimetro dell'edificio e il nucleo centrale, sono realizzati con travi d'acciaio e soprastanti solai misti (lamiera grecata e calcestruzzo collaborante).

Il progetto della 1WTC è stato elaborato utilizzando specifiche progettuali avanzate, che faranno da apripista nello sviluppo di nuovi standard costruttivi orientati al conseguimento di requisiti di resistenza e di sicurezza superiori a quelli previsti dal NYC Code in vigore.

Le opere di cemento armato

Le opere di c.a. sono costruite dalla Collavino Group, che ha dovuto risolvere molteplici problemi esecutivi

zone di interesse delle armature	<ul style="list-style-type: none"> • core • solette all'interno del core, travi di cerchiatura e scale • solai
congestione delle armature	<ul style="list-style-type: none"> • aumento della congestione a causa di richieste supplementari di progetto (carico del vento), unite al fatto di lavorare attorno all'acciaio strutturale, requisito normalmente non richiesto nella maggior parte dei progetti • la congestione evidenzia aspetti connessi con la messa in opera del cls (cioè attenzione aumentata alla vibrazione e a miscele che abbiano il comportamento dei cls SSC/auto-compattanti)

box 13 - 1WTC: alcuni aspetti relativi alle armature del c.a.

Acciaio A709 grade 50	<ul style="list-style-type: none"> • resistenza a rottura (min)= 58 ksi (402 MPa) • resistenza a snervamento= 50 ksi (346 MPa) • allungamento in 2" (50 mm) 19%
Acciaio A709 grade HPS 70 W	<ul style="list-style-type: none"> • resistenza a rottura (min)= 85-110 ksi (585 MPa - 760 MPa) • resistenza a snervamento= 70 ksi (485 MPa) • allungamento in 2" (50 mm) 19%

box 14 - 1WTC: alcune caratteristiche degli acciai strutturali.

connessi con la confezione del calcestruzzo a elevata resistenza e con l'esecuzione dei getti a quote molto elevate. La resistenza a compressione del calcestruzzo impiegato diminuisce con l'aumentare della quota del getto: nel tratto inferiore 14.000 psi (96 MPa); nel tratto mediano 12.000 psi; (82 MPa); nella zona più alta 10.000 psi (69 MPa).

Il calcestruzzo a elevata resistenza

Le opere in c.a. della 1WTC hanno richiesto la messa a punto di miscele speciali, in grado di offrire prestazioni elevate (box 7 e 8).

I problemi di maggiore rilievo che si sono presentati per la messa in opera del calcestruzzo riguardano: la pompabilità (box 9); gli adeguamenti della miscela alle condizioni stagionali (getti in condizioni estreme, box 10); lo smaltimento del calore d'idratazione, nei getti massivi (box 11).

Le armature del cemento armato

Le pareti di taglio sono armate con barre verticali, orizzontali e inclinate, disposte sulle due facce. Alcuni dati caratteristici delle armature impiegate sono riportati di seguito (box 12 e box 13).

Le armature verticali sono collegate da frequenti staffe che ne impediscono l'instabilizzazione. In corrispondenza delle riprese di getto, sono disposte armature inclinate a 45° per contrastare lo scorrimento tra i getti consecutivi (fig. 10). I profilati inseriti nelle pareti sono provvisti di connettori a piolo che contrastano lo scorrimento tra calcestruzzo e acciaio strutturale. Per il collegamento con gli impalcati, sono lasciate nel getto boccole filettate di attesa o stabox.

Le opere in acciaio strutturale

Le opere di acciaio strutturale sono predisposte dalla ADF Group nello stabilimento di Montreal da dove sono trasportate via terra a NYC e montate in opera a cura della Tishman Construction Corporation.

Le caratteristiche di alcuni tipi di acciaio impiegati sono riportati di seguito (box 14).

Un problema di rilievo che ha dovuto risolvere ADF consiste nello studio dei nodi della intelaiatura spaziale iperstatica costituita dai telai di perimetro (figg. 11-12), da quelli conglobati nel core e dalle travi d'impalcato che li collegano².



La progettazione dei nodi risulta complicata per la particolare forma dell'edificio, la cui pianta varia ad ogni piano (quadrata alla base si trasforma in ottagono a metà altezza per ridiventare quadrata in sommità). È interessante osservare che, per garantire la necessaria duttilità strutturale, le travi d'impalcato vengono indebolite, in prossimità delle colonne esterne, nella zona dove è prevista la formazione di una cerniera plastica (fig. 13). Tale predisposizione, comportandosi come una sorta di fusibile, realizza la gerarchia delle resistenze fra pilastro e trave facilitando la rotazione della sezione e, quindi, la formazione della cerniera (fig. 14).

Le principali difficoltà esecutive, nelle lavorazioni in officina, sono connesse con la fabbricazione di elementi di notevoli dimensioni (fino a 70 t di peso, fig. sopra il titolo) e con la realizzazione di elementi composti con lamiere di grosso spessore, assemblate mediante robuste saldature a completa penetrazione.

Le opere in acciaio strutturale, così come l'intradosso dell'impalcato in lamiera grecata, dopo la posa in opera, sono protetti contro gli incendi mediante schiume intumescenti applicate a spruzzo (fig. 15).

I collegamenti in opera tra gli elementi d'acciaio sono prevalentemente bullonati (fig. 16).

Gli aspetti costruttivi

La logistica del sito

L'ubicazione dell'edificio e la ridottissima area a disposizione per le operazioni di stoccaggio e le lavorazioni, come premesso, hanno fortemente inciso sull'organizzazione del cantiere e la sequenza delle operazioni.

Per quanto riguarda, in particolare, le fasi di getto delle strutture in calcestruzzo (setti e solai del nucleo, solai dell'anello in struttura metallica), si sono configurati, sostanzialmente, 3 tipi di vincolo: spazio ridotto per la predisposizione dei materiali (casse-

forme/armature), area ridotta per le operazioni di pompaggio, possibilità di predisposizione delle gru a uso dei getti solo nell'angolo N/W dell'edificio.

Le operazioni di pompaggio del calcestruzzo si sono dovute confrontare, inoltre, con la necessità di tempestività di scarico delle betoniere (per un numero complessivo di viaggi previsto pari a 22.000), con le variazioni "just in time" dell'approvvigionamento, legate alle condizioni meteorologiche e ai loro cambiamenti, con l'interazione, in spazi condivisi, con gli altri settori operativi (acciaio strutturale, impianti ascensori, impianti meccanici ed elettrici), con il traffico generato dalle diverse consegne all'arrivo (60-70 automezzi al giorno, dei quali circa 1/6 per materiali diversi dal cls), con l'organizzazione del lavoro di oltre 500 operai compresi.

Le sequenze della costruzione

L'assenza di spazi di stoccaggio e la necessità di limitare l'interazione tra le diverse lavorazioni e le squadre addette hanno portato a definire una sequenza di costruzione che vede avanzare la struttura in ferro al di sopra del nucleo in cls, per circa 10 piani. Al montaggio di questa, segue la posa in opera della lamiera grecata, sulla fascia che circonda il vano del nucleo, il getto delle relative solette, il trattamento ignifugo dei profilati, la posa in opera degli impianti meccanici, elettrici e sanitari, il montaggio del *curtain wall*, la realizzazione delle finiture.

Imprevisti e soluzioni relative al montaggio dell'acciaio strutturale precedono, così, quelli dei getti in cls, imponendo un'interazione continua di coordinamento per verificare l'interferenza tra struttura metallica e getti, interazione basata sull'utilizzo di software adeguati (BIM-Building Information Modeling).

La presenza di un fronte avanzato di montaggio dell'acciaio strutturale e di deposito del materiale, caricato preventivamente per sfruttare al meglio i

piani forniti dai solai, al di sopra della quota di getto del nucleo e dei suoi solai, implica, inoltre, una particolare attenzione agli aspetti della sicurezza, per l'aumentato rischio delle cadute dall'alto.

I sistemi di sollevamento

Il sistema costruttivo e la sequenza della costruzione implicano la presenza di diversi impianti di sollevamento, a servizio delle diverse lavorazioni e delle maestranze.

In particolare, due gru a torre sono riservate alle fasi di montaggio dell'acciaio strutturale, mentre il getto del cls è operato utilizzando un impianto a gru, rampante, ubicato nell'angolo nord ovest dell'edificio.

Il materiale è trasferito verso l'alto grazie alla presenza di piattaforme di carico montate sul perimetro esterno dell'edificio.

All'interno del vano del nucleo una gru Fassi, a braccio articolato, permette la movimentazione dal perimetro al centro, delle attrezzature e delle casseforme per le operazioni nel nucleo.

Le casseforme dei setti del nucleo, infine, sono dislocate da un sistema di sollevamento Efcò, anch'esso ubicato all'interno del vano del nucleo.

A.F.-G.S.

Note

1 - L'organismo resistente della Freedom Tower (1 WTC) è concettualmente diverso da quello che era presente nelle Twin Towers. In queste ultime, infatti, la struttura di controvento era posta prevalentemente sul perimetro, ed era costituita da 59 colonne metalliche su ciascuno dei 4 lati, collegate in senso orizzontale da corti traversi in modo da realizzare schemi Vierendeel (tube-frame).

2 - Nella consuetudine costruttiva del Nord America la progettazione dei nodi è affidata all'azienda che produce i manufatti d'acciaio, restando al progettista solo l'onere del controllo

Riferimenti e approfondimenti

Materiale cortesemente fornito dalla Collavino
Materiale cortesemente fornito dall'ADF
Sito Web Skidmore, Owings & Merrill, LLP
(www.som.com)

