
sintesi di tesi di laurea

Università degli Studi di Firenze - Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale In Ingegneria Edile

IL VALORE ESPRESSIVO DELLA STRUTTURA NEGLI EDIFICI ALTI

Autore: Francesco VERRAZZANI

Relatori: Prof. Arch. Ettore GUGLIELMI, Prof. Ing. Maurizio ORLANDO

Data di Laurea: 30 Novembre 2010

INTRODUZIONE

La progettazione architettonica e strutturale di una torre di 37 piani, inserita nell'area pianificata da Richard Rogers per il "Nuovo Centro Civico di Scandicci", è il frutto di un'indispensabile attività di ricerca e confronto con soluzioni già sperimentate, attraverso la quale l'ing. Verrazzani giunge nella sua tesi ad una configurazione architettonica sostenibile sia dal punto di vista funzionale sia dal punto di vista costruttivo. Lo studio analizza ed integra in maniera approfondita tutte le problematiche tipiche degli edifici alti: utilizzo ottimale del volume, collegamenti verticali, gestione del clima interno, comportamento aerodinamico nei confronti dei carichi eolici, livello di comfort degli occupanti. La tesi è sviluppata in maniera completa ed attenta, fino alla definizione dei dettagli esecutivi.

Prof. Ing. Maurizio ORLANDO

PERCHÉ CRESCERE IN ALTEZZA

Il grattacielo rappresenta una valida alternativa allo sviluppo incontrollato delle periferie e un'efficace soluzione alla congestione dei centri urbani odierni. La capacità intrinseca dell'edificio alto di concentrare l'edificato rende il suo impiego una soluzione ecologica in grado di salvaguardare il paesaggio e il verde che ci circonda. Questo indirizzo ha caratterizzato l'operato di numerosi progettisti tra i quali potremmo citare Le Corbusier che già nel 1922, con l'ideazione della *città per tre milioni di abitanti*, scelse di concentrare le attività direzionali di un'intera metropoli in 24 grattacieli inseriti in ampi parchi verdi.

L'edificio in esame costituisce l'esito della ricerca di una configurazione architettonica sostenibile sia dal punto di vista funzionale che dal punto di vista costruttivo. Le scelte compositive sono generate dalle esigenze statiche e dinamiche tipiche dell'edificio alto. Da esse è emersa una forma architettonica caratterizzata da un notevole valore espressivo in grado di dotare l'opera di una propria identità.

Per la definizione di tale prototipo è stata indispensabile una preventiva attività di ricerca e confronto con soluzioni già sperimentate, testimoni di possibilità e problematiche tipiche degli edifici alti. L'impiego ottimale del volume, le esigenze strutturali, il corretto dimensionamento degli impianti di sollevamento, la valutazione del rischio incendi e la corretta gestione del clima interno sono solo alcuni dei temi analizzati e integrati nel modello finale.

DARWIN E L'ERA DEI COLOSSI

La ricca diversità delle tecniche costruttive oggi disponibile dimostra come i sistemi strutturali abbiano subito, allo scopo di conquistare altezze sempre maggiori e migliorare conseguentemente l'efficienza contro le sollecitazioni laterali, una decisiva evoluzione. Dalla fine del XIX secolo ai giorni nostri si è così passati dai sistemi a gabbia alle strutture a telai, dagli edifici irrigiditi da setti o nuclei alle costruzioni dotate di notevole potenziale dissipativo grazie all'impiego di tecnologie avanzate quali dissipatori a massa accordata o dissipatori fluido-viscosi. Tali soluzioni hanno consentito all'uomo di passare dai primi edifici alti di 10-15 livelli ai 100-110 piani ed oltre dei moderni grattacieli.

L'ARCHITETTURA STRUTTURALE

Il processo creativo attraverso il quale le opere architettoniche vengono concepite è indubbiamente complesso, articolato e soprattutto non facile da codificare essendo spesso basato sull'intuizione e sull'esperienza acquisita. Nell'ambito di qualsiasi percorso metodologico però la forma di una costruzione è intimamente connessa con la struttura portante, che in alcuni casi costituisce l'elemento più rilevante dell'intera opera sino ad assumere, se lasciata in vista, un ruolo estetico preponderante. D'altronde persino quando l'orditura portante è mascherata, come avviene di solito, è raro che il valore estetico dell'opera non sia influenzata dalla geometria

e dalle dimensioni della struttura di sostegno.

Si può dunque parlare di “architettura strutturale” quando forma e struttura risultano felicemente combinate tra loro con il fine di valorizzare lo sforzo compiuto dalla macchina portante. L’architettura strutturale rappresenta il punto di arrivo di un lunghissimo processo di evoluzione dell’arte del costruire. Essa trova in Pier Luigi Nervi uno dei più illustri rappresentanti. Nell’atto della costruzione inevitabilmente emergono i vincoli imposti dalle leggi fisiche a limitare la creatività dell’artista, Nervi ha saputo, nel corso della sua vita di costruttore, superare questi vincoli in maniera tanto brillante quanto determinata mediante un continuativo processo di sperimentazione e di ricerca.

L’Architettura Contemporanea degli ultimi decenni è anch’essa testimone dell’armonioso legame instaurabile tra Architettura e Struttura. Grazie al progredire di nuove tecnologie di costruzione e di calcolo, le strutture hanno potenzialmente valori espressivi sempre più considerevoli. Solo il progettista può però decidere di manifestare tali potenzialità, arrivando a risultati d’indubbia efficacia. Una delle correnti di pensiero caratteristiche degli ultimi decenni che meglio rappresenta questa visione è senz’altro l’“Architettura High Tech” espressa in importanti opere

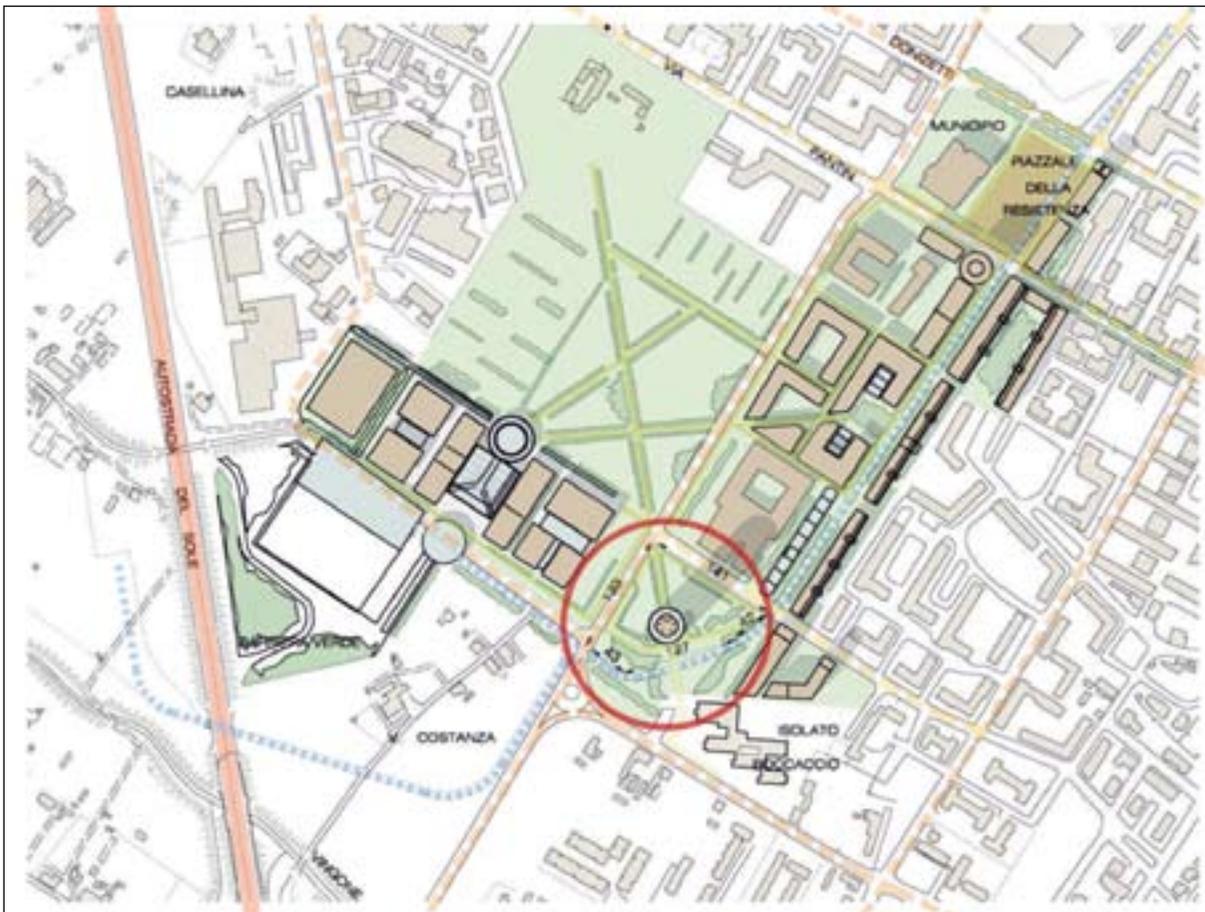
di sapienti progettisti quali Norman Foster, Renzo Piano o Richard Rogers.

IL CONTESTO URBANO

Un edificio alto possiede la capacità di generare un centro d’interesse comune a varie attività, andando a rappresentare il “faro” del sistema di servizi che lo circonda.

All’interno del territorio fiorentino, così come evidenziato dello studio della mobilità elementare, un’area suburbana ottimamente connessa con i principali servizi della città è indubbiamente rappresentata dal “Nuovo Centro Civico di Scandicci”. “Il nuovo centro, anche per i suoi forti contenuti simbolici, sarà il luogo deputato al vitale incontro sociale e sarà in grado di rafforzare e dare una identità marcata ai livelli di “centralità” già presenti, offrendo a tutti nuove opportunità mediante l’inserimento di funzioni qualificate pubbliche e private”, Richard Rogers, Programma direttore 2003-2008 del Comune di Scandicci.

L’edificio risulta così inserito nell’area per la quale è prevista la realizzazione di infrastrutture con destinazione prevalentemente direzionale, circa il 70%, con una restante porzione da dedicare ad attività ricettive, ristorative e congressuali

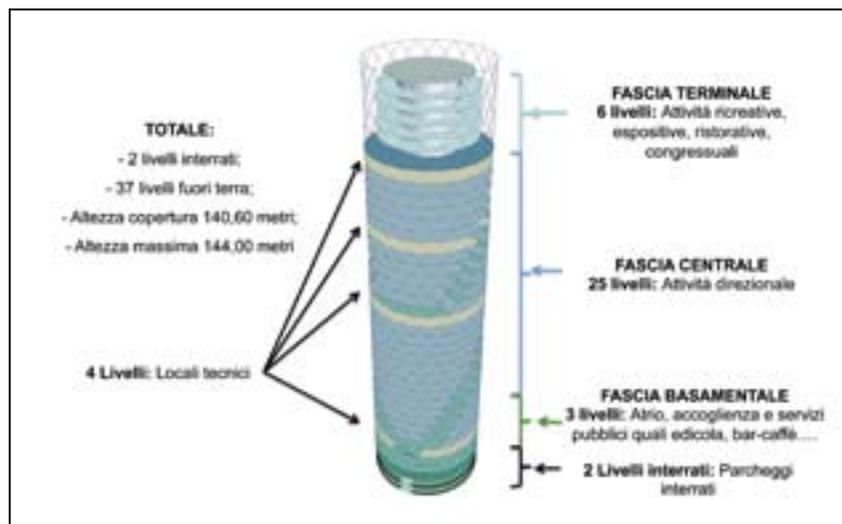


Planivolumetria dell’area di progetto con inserimento dell’edificio

L'IMPIEGO OTTIMALE DEL VOLUME

La forma dell'edificio deriva primariamente da considerazioni di carattere strutturale. La normativa, infatti, premia la realizzazione di edifici dotati in pianta di più assi di simmetria, in modo da consentire un più efficacemente sostenimento delle azioni orizzontali. Inoltre, in relazione al comportamento aerodinamico, la forma cilindrica è quella che potenzialmente offre meno resistenza al vento, in quanto lascia scivolare in modo fluido l'aria lungo la superficie dell'involucro. Peraltro, se la struttura è priva di particolare snellezza, gli effetti dovuti al distacco alternato dei vortici di scia aerodinamica sono trascurabili.

Dal punto di vista funzionale la geometria circolare consente l'ottimizzazione delle superfici di piano occupate dai collegamenti orizzontali. Lo schema funzionale adottato, oltre a risultare molto flessibile per un utilizzo sia da parte di una singola azienda che di imprese più piccole, permette di ottenere un rapporto della superficie utile di piano rispetto alla superficie costruita sempre superiore al 65 %, con punte anche dell'80%.



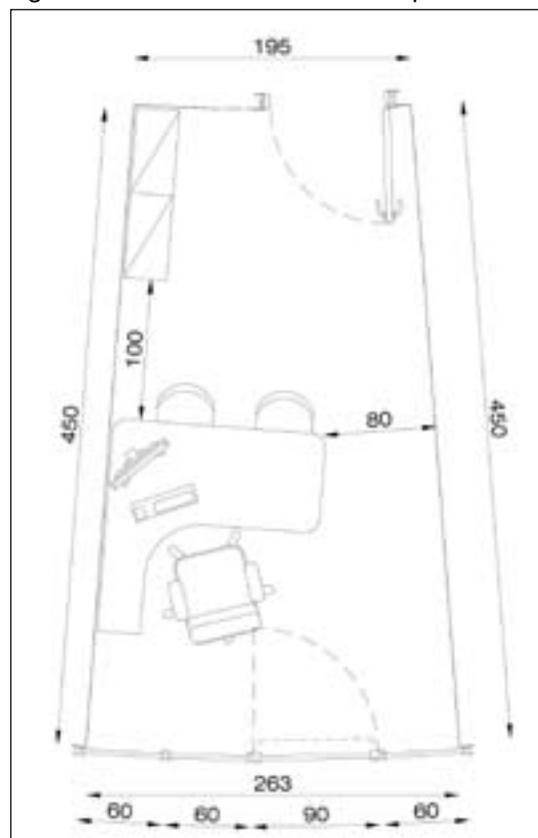
Schema distributivo dell'edificio

La tipologia strutturale impiegata prevede in primo luogo la realizzazione di un nucleo circolare in calcestruzzo armato del diametro di circa 16 metri e dallo spessore variabile da 110 cm alla base, fino a 20 cm in sommità. All'interno di tale nucleo, sono posizionati i principali servizi quali ascensori, cavedi impianti e servizi igienici. Gli orizzontamenti all'interno del nucleo sono sostenuti da una struttura interamente di tipo misto, acciaio-calcestruzzo, dove i pilastri sono realizzati mediante l'impiego di profilati circolari cavi riempiti di calcestruzzo, mentre le travi di sostegno sono realizzate mediante profilati metallici tipo HE o IPE collaboranti con la soletta in calcestruzzo del solaio.

All'esterno del nucleo è previsto l'impiego di una serie di travi radiali incernierate alle rispettive estremità al nucleo centrale e a un reticolo di pilastri in acciaio perimetrale. Per dotare l'edificio di elevata rigidità e resistenza alle azioni torsionali, è stata adottata una maglia reticolare perimetrale composta da elementi inclinati ed orizzontali. Tale soluzione individua così un reticolo triangolare molto resistente alle sollecitazioni di tipo torsionale, che va ad affiancare la resistenza offerta dal nucleo centrale ottimizzando il comportamento globale del sistema.

L'adozione in modo diffuso di una facciata a "doppia pelle" ha consentito di risolvere numerose problematiche tecnologiche, tra le quali la connessione tra pareti divisorie interne, necessariamente verticali, e struttura perimetrale inclinata.

Il "passo" della maglia strutturale è generato dalla dimensione della cellula minima dell'ufficio tipo, pari a 270 cm in corrispondenza della pelle interna della doppia facciata. Tale modulo risulta scomponibile in tre superfici trasparenti fisse larghe 60 cm ed una apribile larga 90 cm, anch'essa trasparente, in modo da consentire l'accesso all'intercapedine della doppia facciata esterna. Questa configurazione risulta in grado di conferire all'edificio un'elevata flessibilità distributiva dei locali di piano, consentendo di adattarsi al meglio alle varie destinazioni d'uso possibili.



Pianta dell'ufficio base



Pianta del piano tipo adibito ad ufficio

Ovviamente è stato verificato che tale passo divida in parti uguali il perimetro dell'edificio, in modo da poter realizzare la facciata con elementi tutti uguali e ripetitivi. Il passo strutturale conseguente è scandito da 21 assi radiali in corrispondenza dei quali sono posizionate le travi principali.

Altro elemento caratterizzante aspetto e meccanismo distributivo dell'edificio è costituito dalla presenza di una serie di "Aree Break", aperte ad impiegati ed ospiti presenti al piano, che consentono l'affaccio su analoghe aree presenti al piano superiore ed inferiore, andando a definire un volume unico nel suo genere in grado di dotare l'edificio di particolare dinamicità.



Pianta dell'ufficio base

La corretta protezione dal rischio incendi è assicurata dall'adozione di specifici provvedimenti quali:

- Corretto dimensionamento delle scale di emergenza a tenuta di fumo;
- Lunghezza massima delle vie di esodo pari a 28,50 m;
- Installazione di due ascensori di soccorso;
- Compartimentazione di ogni livello adibito a uffici dal successivo;
- Compartimentazione dei primi tre livelli

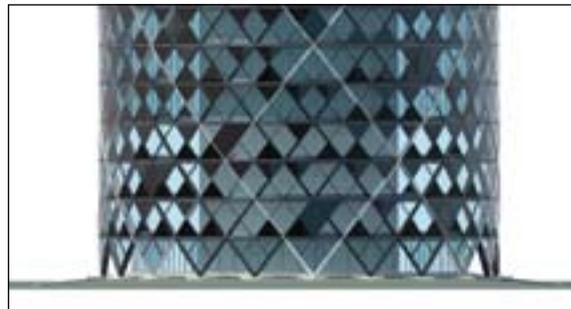
aperti al pubblico dal resto dell'edificio;

- Protezione delle strutture dal fuoco di tipo REI 120;
- Installazione di serbatoi di accumulo dell'acqua in corrispondenza dei piani tecnici intermedi.

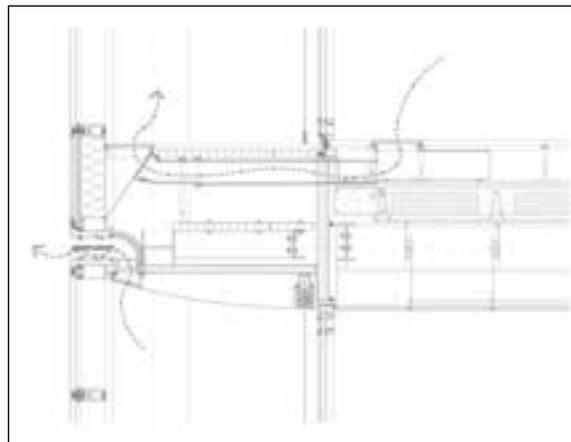
Per garantire invece una corretta gestione del clima interno sono state adottate alcune tecnologie ampiamente collaudate in edifici con analoghe caratteristiche volumetriche e destinazioni d'uso:

- Impianto decentralizzato di climatizzazione integrato nel pavimento galleggiante;
- Impiego del volume delle aree break per consentire la corretta ventilazione interna e conseguentemente il parziale raffrescamento di tali locali nei mesi estivi sfruttando l'aerazione naturale;
- Utilizzo dell'intercapedine della facciata doppia pelle come canale di evacuazione dell'aria esausta proveniente dagli uffici.

Per quanto riguarda invece la verifica della fattibilità costruttiva dell'involucro esterno essa è garantita dall'adozione di elementi cellulari prodotti in serie di forma triangolare e romboidale di soli tre tipi, ancorati ai traversi orizzontali della griglia strutturale di facciata. In tal modo non sarà necessario installare alcun ponteggio esterno poiché il montaggio risulterà totalmente eseguibile dall'interno dell'edificio stesso ed interamente a secco.



Facciata a cellule romboidali e triangolari, trasparenti ed opache, in modo da consentire l'eventuale integrazione di pannelli fotovoltaici



Sezione tipo della facciata "doppia pelle"

PROGETTAZIONE STRUTTURALE

Lo studio eseguito in merito al comportamento strutturale ha avuto come scopo l'individuazione di un ottimale meccanismo resistente da adottare per la realizzazione dei vari elementi a sostegno dei carichi verticali ma che sia in grado di contrastare efficacemente anche le forze orizzontali indotte dalla pressione esterna del vento e dalle eventuali azioni sismiche.

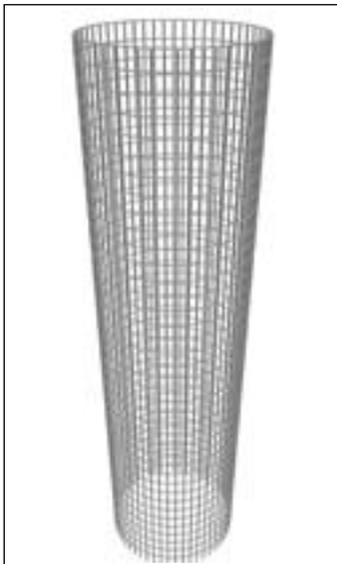
La progettazione ha visto come prima protagonista la ricerca della leggerezza e l'ottimizzazione della funzionalità mediante l'adozione di tecnologie ampiamente collaudate quali l'adozione di pavimenti galleggianti, strutture portanti principali in acciaio o acciaio-calcestruzzo e l'impiego di solai alleggeriti tipo "Predalles" dallo spessore minimo.

Grazie all'adozione di travi incernierate alle estremità, sollecitate quasi esclusivamente da azioni orizzontali, già dalle prime fasi di predimensionamento è stato possibile determinare con particolare precisione l'effettiva geometria di travi e solai.

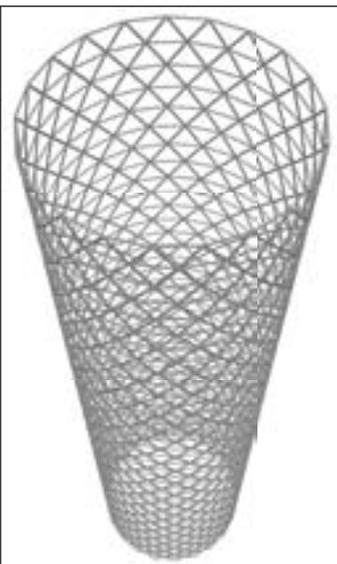
Le proprietà possedute dalla griglia esterna a maglia triangolare sono evidenziate dai risultati comparativi tra due modelli agli elementi finiti caratterizzati dalla presenza della medesima quantità di acciaio ma configurazione geometrica diversa: la prima tradizionale ad elementi verticali ed orizzontali, la seconda composta da elementi inclinati ed orizzontali in grado di creare la maglia ideata. I risultati evidenziano nella seconda soluzione una riduzione della rigidità verticale di 2,5 volte, ma un aumento della rigidità torsionale pari a quasi 30 volte. L'analisi modale inoltre ha periodi propri notevolmente inferiori rispetto a quelli posseduti dal primo modello.

Per ottimizzare il comportamento della struttura e rispondere all'esigenza architettonica di rendere l'involucro esterno il più trasparente possibile, in corrispondenza di ognuno dei quattro piani adibiti a locali tecnici, sono presenti sette travi reticolari che consentono di trasferire le sollecitazioni della griglia di facciata al nucleo centrale in calcestruzzo. In questo modo la griglia risulta relativamente poco impegnata in termini di sforzi interni, consentendo così l'adozione di elementi circolari cavi in acciaio dal diametro costante di soli 24 cm e spessore variabile da un minimo di 6 mm ad un massimo di 16 mm.

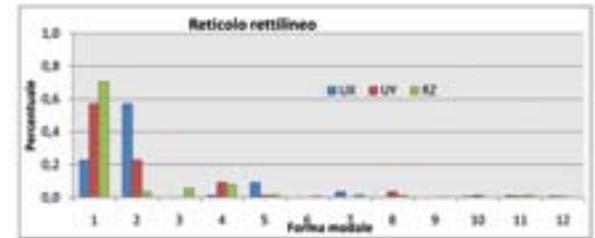
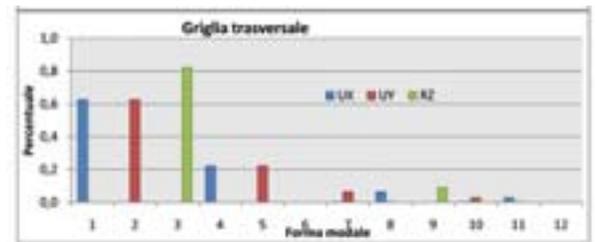
Sette coppie di spirali bianche percorrono la facciata dell'edificio per l'intera altezza e nelle ore notturne sono evidenziate da un impianto di illuminazione capillare integrato in facciata.



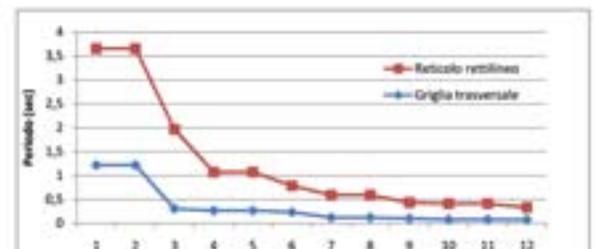
Vista estrusa del primo modello composto da elementi verticali ed orizzontali



Vista estrusa del secondo modello composto dalla maglia triangolare



Comparazione tra percentuale di massa modale partecipante



Comparazione tra periodi di vibrazione (secondi)

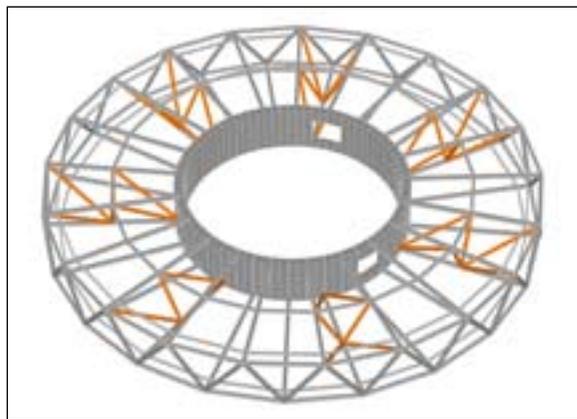


Prospetto principale dell'edificio

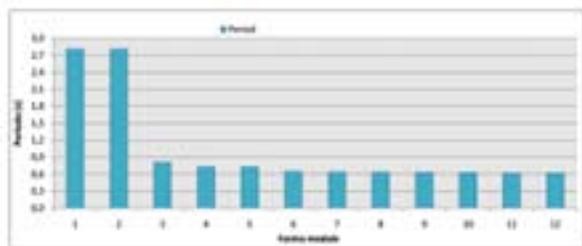


Sezione principale dell'edificio

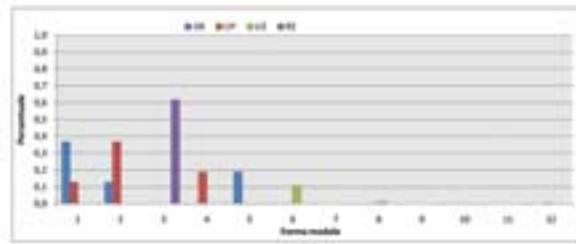
L'analisi modale dell'intero edificio evidenzia l'efficacia del modello strutturale, avente i primi due modi di vibrare interamente traslazionali e caratterizzati da un periodo relativamente alto, 2,81 sec, ed un terzo modo di vibrare di tipo torsionale caratterizzato da un periodo molto più breve, pari a 0,81 sec, a causa dell'elevata rigidità torsionale del sistema nucleo-griglia.



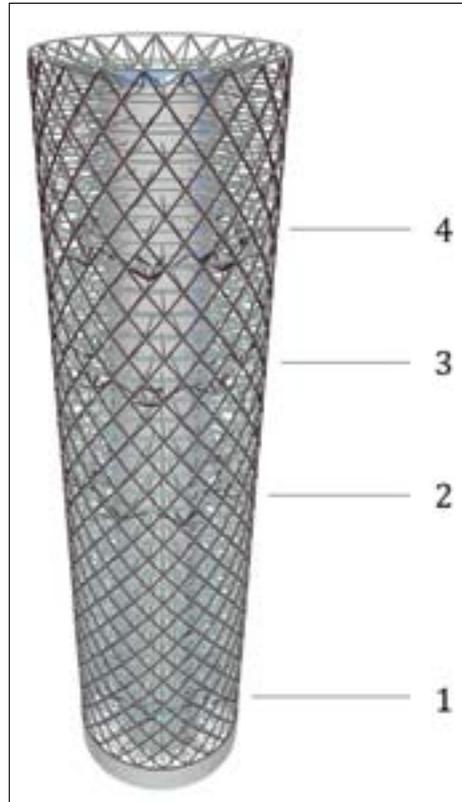
Travi reticolari dei piani tecnici



Periodi di vibrazione della struttura (sec)



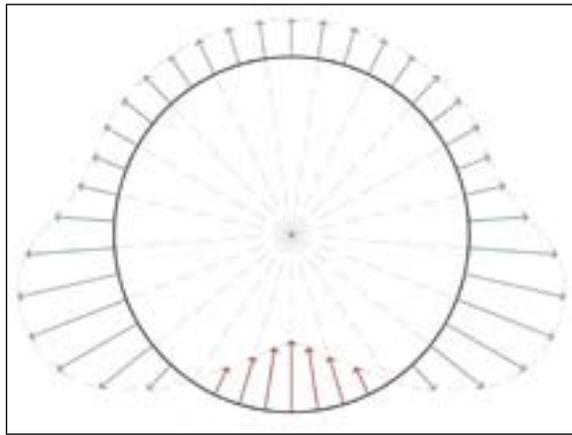
Massa modale percentuale partecipante



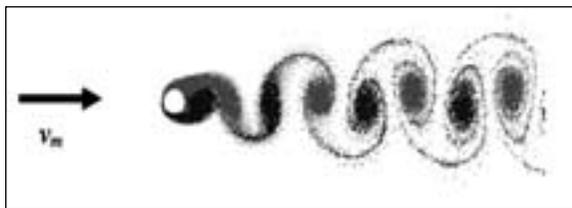
Posizione delle travi reticolari nel modello FEM

L'analisi dinamica modale ha permesso di determinare le sollecitazioni della struttura in caso di sisma, mentre la valutazione delle massime sollecitazioni indotte dalla pressione del vento in facciata è stata effettuata applicando dei carichi equivalenti ai traversi orizzontali della griglia di facciata esterna.

Sempre in riferimento all'azione del vento, per edifici snelli, è necessario valutare l'eventuale presenza di oscillazioni trasversali indotte dal distacco alternato dei vortici di scia, in grado di generare pressioni istantanee oscillanti sulla superficie del corpo, la cui integrazione origina notevoli forze e momenti. L'assenza di tale condizione è garantita dal ridotto periodo di vibrazione traslazionale della struttura e dall'elevato diametro esterno dell'edificio che genera un periodo di distacco dei vortici di scia pari a 4,15 sec, superiore dunque a quello posseduto dalla struttura dell'edificio (2,81 sec).

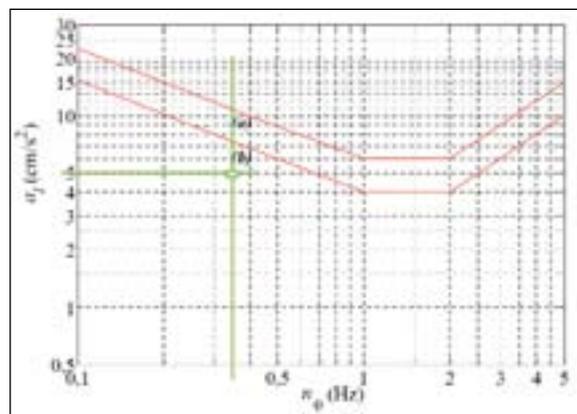


Massa modale percentuale partecipante



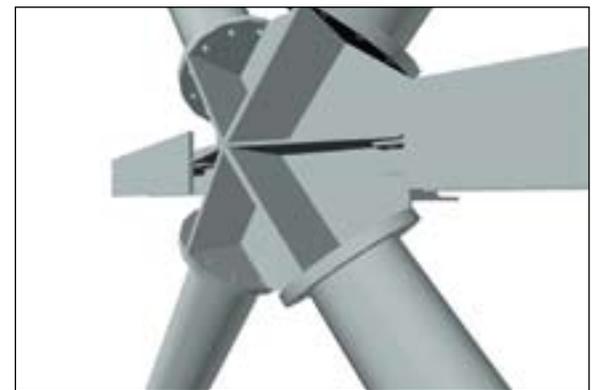
Scia di Von Karman

Per garantire il benessere agli occupanti è necessario inoltre verificare il valore di picco dell'accelerazione longitudinale alla quota massima dell'edificio, in questo caso pari a 4,97 cm/sec², in riferimento ad un periodo di ritorno dell'azione massima del vento pari ad un anno. Andando poi a confrontare tale risultato con l'accelerazione di picco ammissibile dall'uomo risulta evidente la capacità dell'edificio di rimanere sotto la soglia limite.

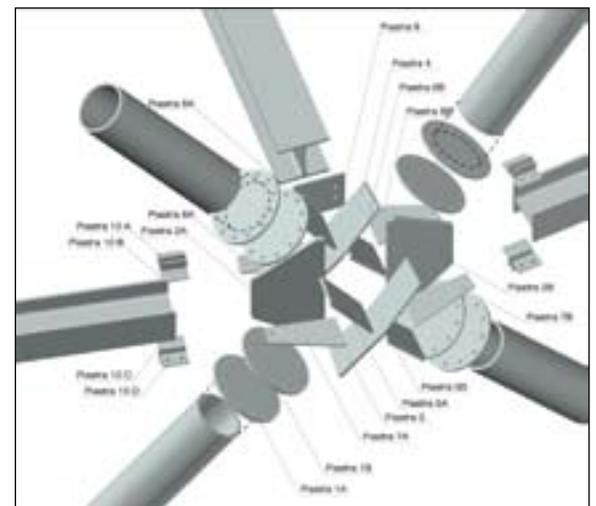


Confronto tra valore limite di progetto dell'accelerazione di picco e valori ammissibili. Curva "a" e "b" rispettivamente accelerazione limite ammissibile per locali adibiti ad uffici e residenze

La progettazione strutturale è arrivata dunque alla progettazione del nucleo centrale in calcestruzzo armato a sezione variabile, da 110 cm alla base fino a 20 cm in sommità, e alla definizione della geometria delle piastre necessarie per la realizzazione del nodo tipo della griglia strutturale esterna dove convergono sette aste ciascuna avente un'inclinazione diversa dall'altra. Per limitare la lunghezza libera d'inflessione delle aste circolari facenti parte della griglia esterna è stato ideato un nodo in grado di garantirne il vincolo d'incastro alle estremità delle stesse. La geometria delle singole piastre, in grado di minimizzare il numero di tagli necessari, è stata ottenuta grazie ad un'indispensabile modellazione tridimensionale del nodo, che ha consentito tra l'altro di verificare l'effettiva realizzabilità dell'opera.



Nodo tipo della griglia di facciata esterna



Esploso nodo tipo della griglia di facciata esterna

L'ESITO DELLA RICERCA

Il grattacielo non è un oggetto da temere ma, se adottato con buon senso, una valida e legittima soluzione, certamente non l'unica e non la sola, da cui trarre vantaggio, ripensando le nostre città e integrandole con sistemi in grado di favorire la socialità, lasciando al verde e alla natura il compito di circondarci.

L'integrazione delle tematiche strutturali nel modello architettonico e la costante ricerca della valorizzazione dello sforzo compiuto dalla macchina portante, hanno portato alla definizione di un edificio dalla forma dinamica, in grado di snellirne l'impatto visivo e al tempo stesso evidenziarne il meccanismo resistente.

L'efficacia di tale prototipo non è la trasposizione di un'intuizione sommaria sul comportamento dell'edificio, ma rappresenta il frutto di attente ricerche ed analisi strutturali che hanno consentito di individuare una soluzione realmente sostenibile.



Fotoinserimento diurno nell'area di progetto



Fotoinserimento notturno nell'area di progetto



Vista prospettica del porticato di piano terra



Dettaglio della facciata esterna



Vista interna dell'ufficio tipo