

Il controventamento dei fabbricati

L'evoluzione dei grattacieli ha suggerito complessi sistemi di irrigidimento contro la spinta del vento. Per i fabbricati più alti è stata rimessa in uso una tecnica di oltre 100 anni fa

di Carl W. Condit

Un fabbricato è in generale sottoposto a tre tipi di forze. La prima è il cosiddetto «carico morto» cioè il peso proprio della struttura e del suo contenuto stabile; la seconda è il «carico vivo», ovvero il peso degli occupanti e delle parti mobili, come per esempio gli ascensori. Si tratta in entrambi i casi di forze gravitazionali che devono essere in definitiva trasmesse al terreno, lungo linee verticali, tramite le fondazioni.

La terza forza è prodotta dal movimento dell'aria e agisce in direzione perpendicolare alle pareti dell'edificio, con effetti differenti dalle prime due. Infatti i carichi gravitazionali sollecitano le strutture portanti verticali (colonne e pilastri) prevalentemente a compressione; l'azione del vento induce invece nell'ossatura della costruzione sollecitazioni complesse di flessione, torsione, taglio e rovesciamento.

Ai tempi in cui gli edifici venivano costruiti in muratura massiccia gli effetti del vento potevano essere praticamente trascurati nel progetto della struttura. Una costruzione in grado di reggere l'enorme peso proprio di spesse pareti in pietra è intrinsecamente indifferente alla spinta del vento. Quando però si cominciarono a erigere fabbricati di altezza eccezionale sostenuti da una leggera intelaiatura in ferro o in acciaio, il problema di assicurare una adeguata resistenza al vento si dimostrò di difficile soluzione. I metodi costruttivi seguiti in precedenza potevano fornire solo scarse indicazioni: infatti molti degli artifici e delle tecniche adottati dai costruttori di grattacieli non sono derivati dalla precedente esperienza edilizia, ma dai metodi ideati per la costruzione di ponti a grande luce libera.

L'integrità strutturale di un fabbricato dipende da due proprietà. Una struttura, considerata come un tutto, si definisce stabile se rimane immobile rispetto alla superficie di appoggio sotto l'azione dei carichi previsti in sede

di progetto; se invece i vari elementi di cui è costituita non subiscono spostamenti relativi, viene detta rigida.

Un telaio rettangolare semplice è stabile sotto l'azione di un carico verticale fisso (se i singoli elementi hanno una resistenza sufficiente), ma non è invece rigido nei confronti di una forza orizzontale o anche di una forza con una componente orizzontale. Sottoposto all'azione di un carico di questo genere, il rettangolo si deforma, diventando un parallelogramma e può al limite essere perfino del tutto appiattito (si veda l'illustrazione nella pagina successiva in alto).

Questa debolezza può venire eliminata collocando un controvento diagonale, che trasforma il telaio in una struttura rigida composta da due triangoli (il triangolo è una figura rigida, che non può essere deformata senza distorcere uno o più dei lati). Con l'aggiunta del controvento il telaio acquisisce entrambe le proprietà di stabilità e di rigidità: se gli elementi che lo compongono sono sufficientemente resistenti e se i giunti sono abbastanza forti, esso può sopportare sollecitazioni sia verticali sia orizzontali. L'unico difetto è ora la presenza dell'elemento diagonale che attraversa l'intero telaio e che può rendere inutilizzabile lo spazio interno. Occorre pertanto trovare altri metodi per irrigidire le strutture, metodi che costituiscono una gran parte della moderna scienza delle costruzioni.

Il carpentiere medievale si era reso ben conto della necessità di irrigidire i telai in legno contro le spinte del vento. Una copertura a falde sorretta da capriate (o incavallature) triangolari è intrinsecamente rigida, ma la catena della capriata e i piedritti che la sostengono formano un rettangolo che non lo è. Non è possibile collocare un elemento lungo la diagonale del rettangolo, in quanto ostruirebbe l'intera luce (la luce è la distanza tra ogni coppia di piedritti o montanti adiacenti

di ciascuna unità dell'intelaiatura). La soluzione più semplice del problema fu l'applicazione di un piccolo elemento diagonale fra la catena e il piedritto, denominato controvento a ginocchio, che irrigidisce il collegamento occupando spazio solo vicino al tetto. Un artificio di maggiore robustezza ed eleganza è stato il controvento curvo fissato con giunti a tenone e mortasa alla capriata e al montante. Tali controventi sono stati detti «a ginocchio di nave» perché derivati dagli elementi curvi chiamati ginocchi che collegano nelle navi a vela i bagli del ponte con le coste dello scafo. Controventi analoghi sono stati disposti anche in direzione parallela all'asse longitudinale dell'edificio (si veda l'illustrazione in basso nella pagina successiva).

Le spinte del vento sui grossi fabbricati in muratura non hanno costituito un problema fino al XII secolo. In precedenza erano state usate grandi quantità di pietra per sostenere il peso proprio della struttura e sulle pareti spesse e pesanti il vento rappresenta una sollecitazione trascurabile. Tuttavia i costruttori del periodo gotico trasformarono la pesante chiesa romanica in una struttura estremamente alleggerita costituita da costoloni, pilastri e contrafforti che formavano quasi un'intelaiatura in pietra. Per questa struttura relativamente debole la resistenza al vento assume una notevole importanza (si veda *L'analisi strutturale delle cattedrali gotiche* di Robert Marx in «Le Scienze» n. 54, febbraio 1973).

Durante il Rinascimento gli architetti tornarono a costruire con la classica tecnica delle pareti in muratura piena, già adoperata in precedenza negli edifici di dimensioni monumentali, e i problemi derivanti dalla resistenza al vento tornarono a essere trascurabili. Le soluzioni escogitate dai costruttori medievali per i più piccoli edifici in legno erano soddisfacenti e furono impiegate usualmente ben oltre l'inizio del XIX secolo.

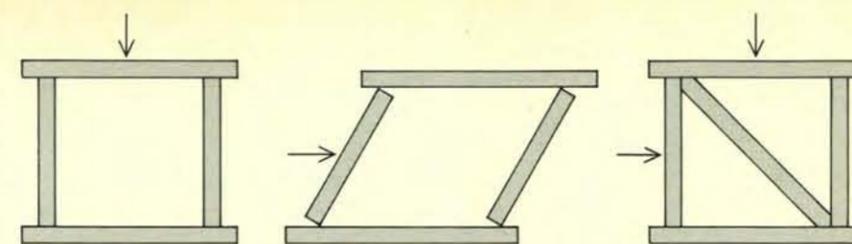
Con la rivoluzione industriale del 1700 sorse uno spirito più innovatore, ispirato da un insieme di fattori correlati, che promosse l'introduzione del ferro come materiale strutturale primario. Il nuovo impiego del ferro portò come conseguenza due nuovi indirizzi nella scienza delle costruzioni: le accresciute dimensioni delle strutture a telaio con la contemporanea riduzione delle sezioni degli elementi portanti, l'uno, e la trasformazione dell'edilizia da mestiere pragmatico e empirico in una tecnologia affermata sulla base di una scienza teorica e sperimentale, l'altro.

All'inizio i cambiamenti furono lenti. Così, per esempio, ancora nel 1850 l'aspetto di fabbriche e magazzini a più piani con struttura portante in ferro non differiva in modo sensibile da quello dei rispettivi prototipi con struttura portante in legno.

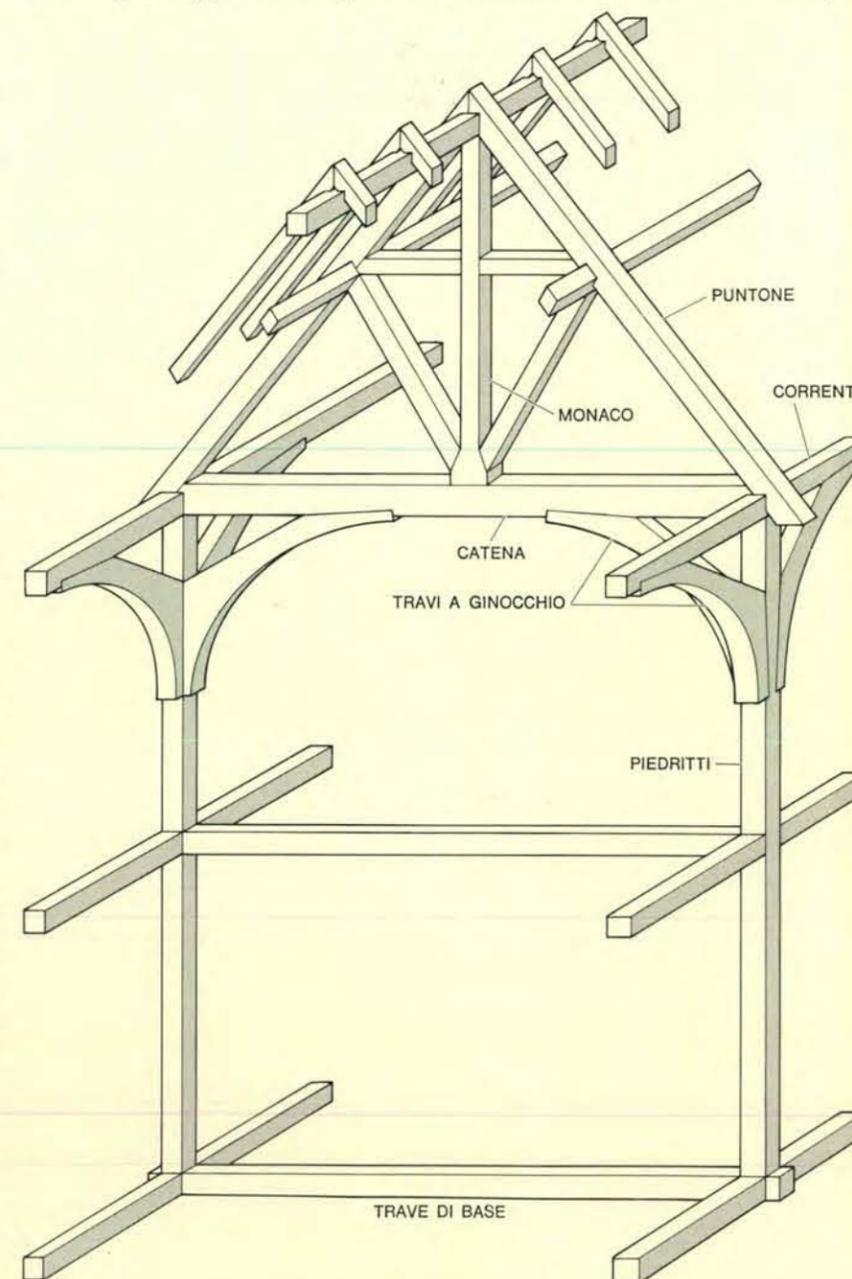
Le prime costruzioni con elementi strutturali principali in ferro furono i cotonifici in cui vennero alloggiati i nuovi macchinari tessili azionati a motore. I progettisti seguirono la tradizionale tecnica di supporto della struttura esterna con muratura di mattoni pieni, sostituendo però il ferro al legno nei piedritti e nelle travi interne. Per l'elevato peso della muratura, non si ritenevano necessarie le strutture interne di irrigidimento, opinione che permase fino all'ultimo decennio del XIX secolo.

È stata l'introduzione del telaio semplice in ferro appoggiato al suolo a far comprendere ai costruttori la necessità del controventamento, trattandosi di strutture prive dell'involucro protettivo di muratura. La capriata in ferro venne impiegata per la prima volta nel 1810 e nel 1820 i costruttori cominciarono a sostituire le pareti in muratura con colonne in ferro. Uno dei primi esempi di questa nuova struttura è stato un piccolo mercato parigino chiamato la Madeleine, costruito nel 1824, la cui intelaiatura e le cui capriate erano del tutto prive di controventamento. Un'opera più progredita è lo Hungerford Fish Market di Londra, progettato dall'architetto Charles Fowler ed edificato nel 1835. L'intelaiatura del tetto è sorretta da colonne cilindriche in ghisa e l'irrigidimento è assicurato da controventi in ferro a ginocchio di nave, sporgenti da collari fissati alle colonne.

I rapidi progressi conseguiti nelle costruzioni in ferro durante la restante parte del 1800 sono dovuti all'applicazione della scienza ai problemi di progetto delle strutture, ai metodi più



Un telaio rettangolare serve a dimostrare il significato delle proprietà di stabilità e di rigidità. Il telaio è stabile sotto l'azione di un carico verticale (figura a sinistra), rimanendo immobile rispetto alla superficie di appoggio; se invece esso viene sottoposto a una forza orizzontale non è più rigido (figura al centro) e i suoi elementi subiscono spostamenti relativi. La struttura si può peraltro rendere rigida collocando un controvento diagonale (figura a destra), che suddivide l'intero rettangolo in due triangoli.



Il telaio in legno della casa medievale è stato una delle prime strutture che hanno richiesto l'irrigidimento contro le spinte del vento. La capriata formata dai puntoni e dalla catena è un triangolo ed è intrinsecamente rigida, ma la catena forma con il resto del telaio un rettangolo che invece non lo è (vedasi la figura in alto). Poiché un elemento disposto lungo la diagonale del rettangolo ostruirebbe la campata, sono stati impiegati degli elementi diagonali più piccoli, denominati controventi o travi «a ginocchio», montati fra la catena e i piedritti e fra questi ultimi e i correnti.

accurati per l'analisi delle sollecitazioni nelle strutture a telaio e ai laminati capaci di produrre profili in ferro aventi altezza fino a 180 millimetri. Il lavoro che ha maggiormente anticipato il futuro è stato il Palazzo di Cristallo, eretto nel 1851 in occasione dell'esposizione di Londra dall'architetto sir Joseph Paxton, orticoltore e costruttore di serre a telaio in ferro.

Il Palazzo di Cristallo è stato il primo edificio di grandi dimensioni realizzato con intelaiatura in ferro: misurava in pianta 144,5 per 563,3 metri ed è stato anche il primo fabbricato con tamponature esterne in vetro, il primo costruito con unità strutturali prefabbricate e il primo nel quale leggeri telai sono stati irrigiditi contro la spinta del vento con una tecnica nota in seguito con il nome di controventatura a portale.

Nel Palazzo di Cristallo sono stati impiegati due tipi di controventatura. Il primo tipo era costituito da membrature diagonali disposte in croce per formare una serie di X, realizzate con tondini di ferro battuto e connesse agli elementi portanti principali della volta

centrale. Il secondo era applicato nei punti ove le travi reticolari in ghisa che sorreggevano le gallerie incontravano le colonne ottagonali: dei collari a flangia fissati alle colonne erano chiodati alle facce superiore e inferiore delle travature, eliminando la necessità di elementi diagonali per la presenza dei due punti di fissaggio. Entrambe le tecniche erano state derivate dai metodi impiegati nella costruzione di ponti a trave reticolare, che sono tradizionalmente controventati con membrature diagonali incrociate disposte tanto superiormente che inferiormente. Il secondo tipo di controvento usato nel Palazzo di Cristallo si trova nei telai di estremità dei ponti citati, denominati telai porta (o di ingresso) la cui membratura di irrigidimento viene chiamata controventatura a portale (si veda l'illustrazione in questa pagina).

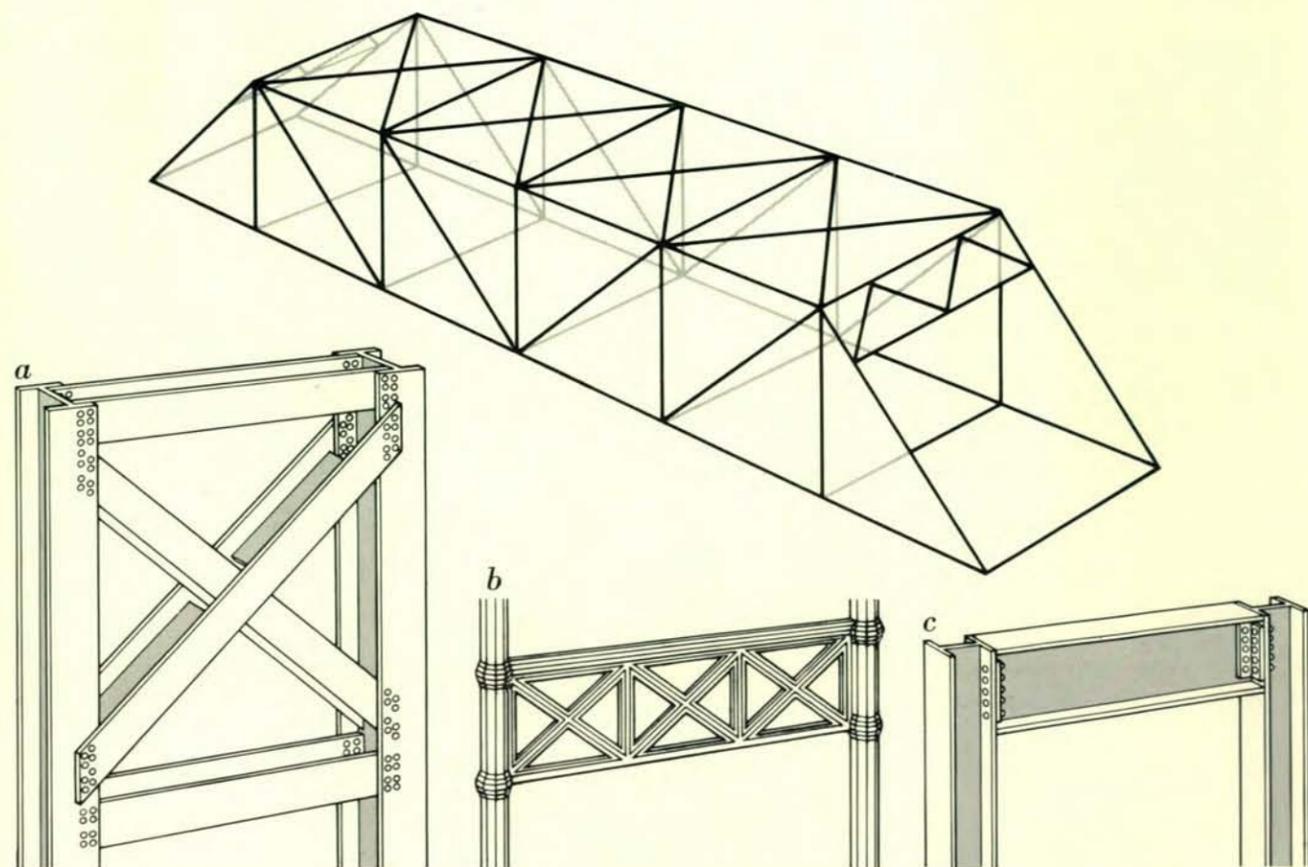
Il principio su cui si basa questa tecnica è antico almeno quanto la carpenteria primitiva: due tavole unite con un solo chiodo ruotano con facilità intorno al chiodo stesso, ma se si usano due chiodi il giunto diventa rigido. Nel Palazzo di Cristallo il metodo è

stato probabilmente adottato per motivi estetici poiché i controventi a ginocchio sarebbero sembrati privi di grazia nell'elegante traliccio.

La controventatura a portale nella forma moderna apparve pochi anni dopo. Il primo esempio si trova nel Royal Navy Boat Store a Sheerness in Inghilterra, che fu progettato da Godfrey T. Greene e costruito fra il 1858 e il 1860. Alte travi in ferro battuto erano chiodate a colonne in ghisa per tutta la loro altezza. Ulteriori perfezionamenti della tecnica sono stati introdotti nei grattacieli che cominciarono a essere costruiti a New York e a Chicago alla fine del secolo.

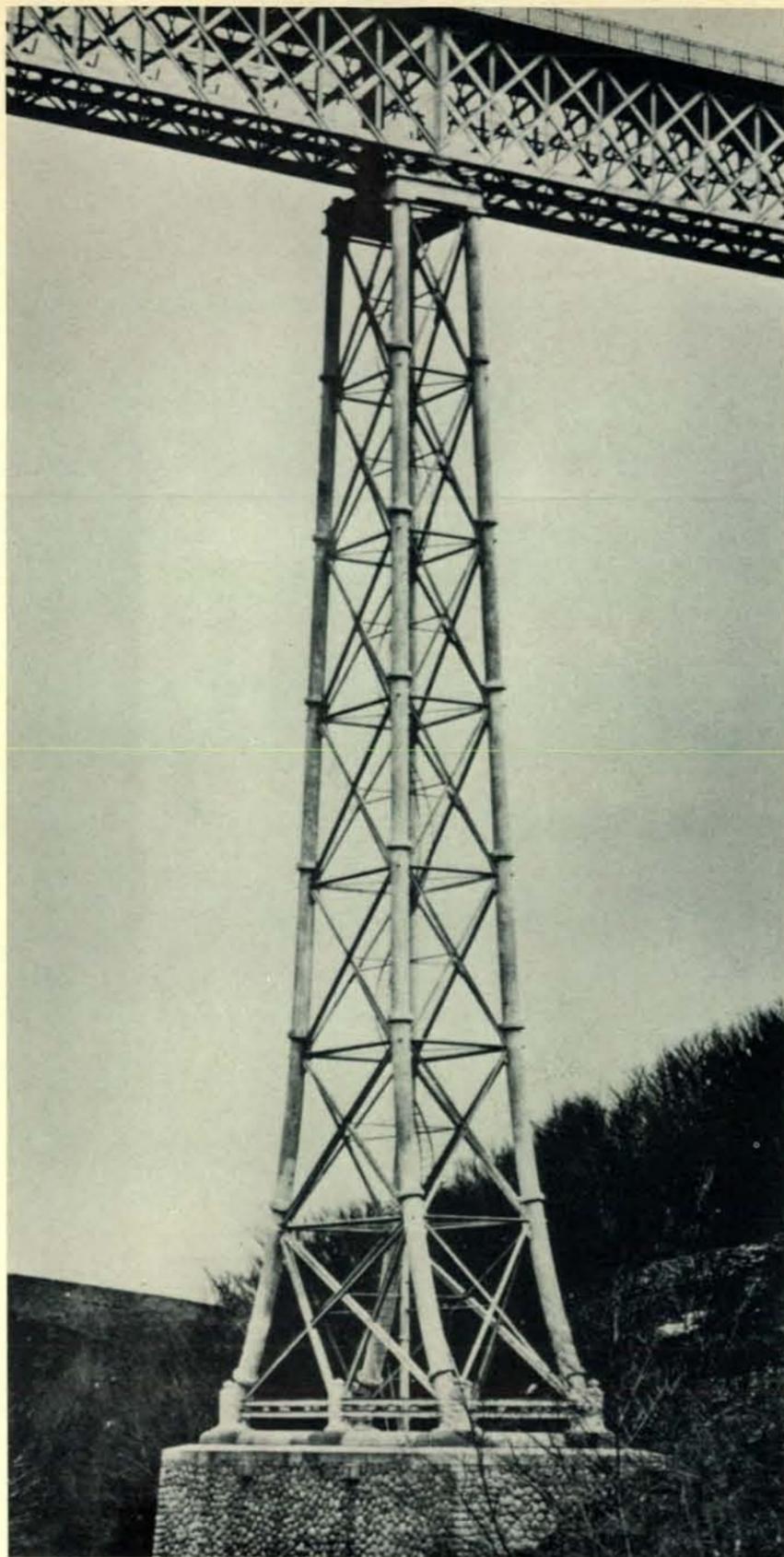
Nello stesso periodo parecchi costruttori introdussero altre tecniche fondamentali nella costruzione dei moderni edifici a grande sviluppo verticale. Sebbene sembrasse che tali progressi non fossero in relazione fra loro, cominciò a manifestarsi un nuovo esempio di evoluzione tecnologica.

Numerose sono le novità applicate per la prima volta nella costruzione dei fari. La forma di massima stabilità al-



I disegni illustrano la derivazione dai ponti a trave reticolare di due tecniche di controventamento. Il controventamento con membrature diagonali incrociate, disposte in genere nei pannelli superiori e inferiori del ponte, è stato adottato direttamente per i fabbricati dove l'ostruzione dei volumi interni non è

inaccettabile (a). La controventatura a portale deriva dai telai di ingresso, o telai porta, del ponte. Nei primi esempi, quale il Palazzo di Cristallo, una trave reticolare era fissata alla colonna in due punti (b). Negli edifici costruiti successivamente le travi vennero chiodate ai montanti per tutta la loro altezza (c).



La svasatura dei montanti riduce le sollecitazioni nella struttura portante, o torre di sostegno, del viadotto Bellon della linea ferroviaria Gannat-Commentry in Francia. Le sollecitazioni di taglio e di flessione raggiungono i massimi valori alla base del traliccio; la curvatura dei montanti tende a trasformare il taglio in compressione, cioè in un tipo di sollecitazione alla quale gli elementi in ghisa resistono meglio. Consulente per il progetto del viadotto, che fu costruito fra il 1868 e il 1871, fu Gustave Eiffel.

la spinta del vento è per queste strutture quella a « tronco d'albero », cioè di un cilindro rastremato con la parte larga alla base. È la forma usata da John Smeaton già nel 1759 per la torre in muratura del faro Eddystone in Inghilterra, adattata poi alle costruzioni in ferro da parte degli ingegneri francesi che l'hanno perfezionata per il faro di Roches-Douvres sulla Manica, eretto negli anni 1860-1870.

Il faro di Roches-Douvres, alto 48 metri, era rivestito con piastre di ferro, applicate su un traliccio in ferro battuto realizzato con colonne, travi periferiche e controventi diagonali. La resistenza al vento era ottenuta con tre tipi di accorgimenti: le ormai familiari membrature diagonali nei primi tre ripiani in basso, ove i momenti flettenti indotti dal vento raggiungono i massimi valori; le piastre nodali di rinforzo nelle giunzioni chiodate fra le colonne, le travi e gli elementi diagonali e infine la larga base dalla forma a tronco d'albero.

Nello stesso decennio gli ingegneri progettisti della linea ferroviaria Gannat-Commentry in Francia svilupparono dei tralicci a tronco d'albero per le strutture portanti in ferro, o torri di sostegno, dei numerosi ponti nel tratto montano del percorso. Fra queste strutture, le più innovative furono progettate per il viadotto Bellon, costruito fra il 1868 e il 1871 (si veda l'illustrazione a sinistra).

Le torri a traliccio sono realizzate con quattro montanti tubolari in ghisa legati a intervalli da traverse orizzontali e controventati da tondini diagonali incrociati in ciascuno degli specchi verticali e orizzontali delimitati dai montanti e dalle traverse. La caratteristica singolare della struttura è la svasatura alla base, esattamente calcolata, imposta ai montanti che non solo assicura una maggiore larghezza nella zona ove i momenti flettenti sono maggiori, ma consente anche di trasformare nei robusti tubi di ghisa, in corrispondenza dell'incastro nel basamento, le sollecitazioni di taglio in sollecitazioni di compressione. I ponti della ferrovia Gannat-Commentry sono stati progettati dagli ingegneri Delom, Geoffroy, Nordling e Thirion. Consulente per il progetto fu un ben più illustre ingegnere: Gustave Eiffel, l'uomo che nel 1870 era la massima autorità europea per il calcolo della stabilità aerodinamica delle strutture di grande altezza.

La celebre Torre Eiffel, progettata per l'Esposizione di Parigi del 1889, è l'esempio più eminente di un'opera eretta seguendo rigorosamente le norme

della scienza delle costruzioni e dell'aerodinamica. I principi dell'aerodinamica applicati nella sua realizzazione guidano tuttora il progetto dei grattacieli a traliccio in acciaio.

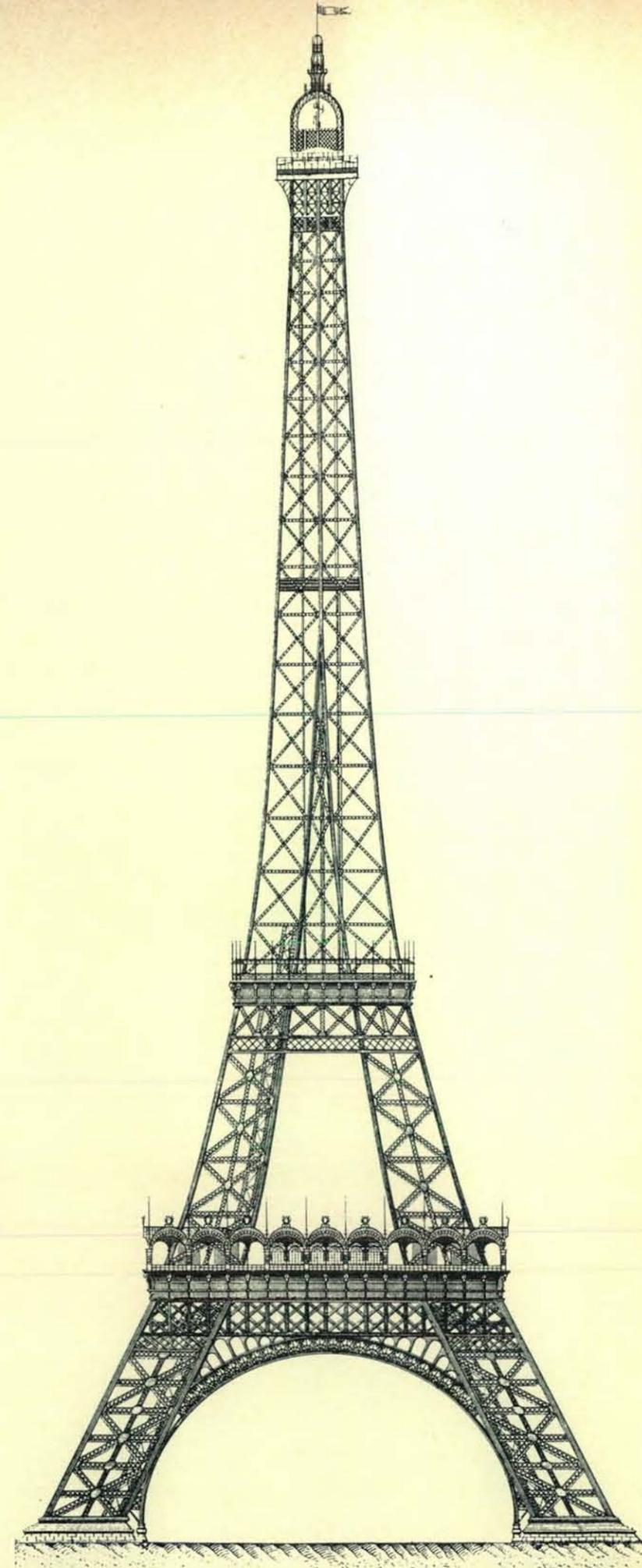
L'immensa costruzione in ferro, un *tour de force* eccezionale che non è niente altro che un monumento a se stessa, venne eretta fra il 1887 e il 1889 su progetto di Eiffel, assistito dagli ingegneri Emile Nouguier e Maurice Koechlin e dall'architetto Stephen Sauvestre. La torre doveva essere alta 300 metri e divisa da tre ripiani, il primo per poter ospitare un ristorante e gli altri due per fungere da belvedere.

Negli anni 1880-1890 la costruzione dei ponti di grande luce era diventata una scienza prevedibile e quindi il calcolo delle forze gravitazionali era basato su un'esauriente casistica. Eiffel sapeva che il vento avrebbe costituito il fattore decisivo del progetto e che la resistenza a esso avrebbe determinato la stabilità o la caduta della torre.

Egli prese fin dall'inizio la decisione di trattare l'intera struttura come una mensola verticale (una mensola è una trave o una struttura reticolare vincolata a uno solo degli estremi). La mensola è costituita da due parti: una è la torre vera e propria compresa fra il secondo ripiano e il piano di calpestio delle attuali stazioni meteorologica e televisiva poste sulla cima; l'altra è distinta dalla prima anche in modo visivo ed è formata dal traliccio di base, chiamato da Eiffel il *montant* (si veda l'illustrazione a destra). La struttura di transizione è un traliccio periferico che funge da enorme cravatta e che è situato immediatamente al di sotto del secondo ripiano.

La torre è quello che oggi sarebbe definito un « telaio spaziale », cioè un traliccio tridimensionale che racchiude uno spazio definito e i cui elementi sono tutti connessi fra loro e si comportano come una struttura unica. La torre è delimitata da un involucro rastremato curvilineo che prolunga con eleganza la pronunciata curvatura della base. Le singole strutture portanti vuoti della torre vuoti del *montant* derivano direttamente dalle torri di sostegno dei

Antenata dei moderni grattacieli, la Torre Eiffel è stata calcolata dal progettista come una mensola verticale, cioè come una struttura monolitica incastrata a un estremo e libera di spostarsi all'altro. La sua forma a guglia curva e rastremata riduce l'area esposta al vento in prossimità della cima e converte le sollecitazioni di flessione e taglio in sollecitazioni di compressione alla base. La torre, costruita per l'Esposizione di Parigi del 1889, è alta 300 metri. Il disegno è tratto dallo studio di Eiffel *La Tour de Trois Cents Mètres*.



ponti: ciascuna è costituita da quattro montanti collegati da puntoni orizzontali e da controventi diagonali incrociati.

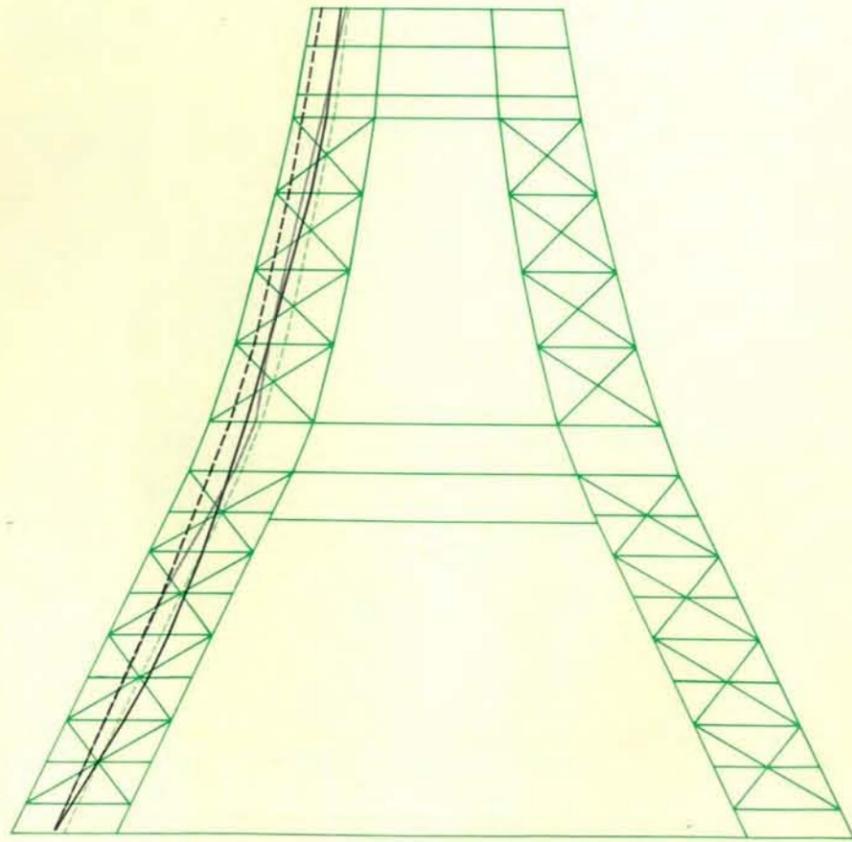
Eiffel aveva posto a base del calcolo due ipotesi di sollecitazione prodotta dal vento; una costituita da un carico uniforme dalla cima alla base di 300 chilogrammi per metro quadrato, l'altra da un carico variabile linearmente fra 400 chilogrammi per metro quadrato alla cima e 200 chilogrammi per metro quadrato al suolo.

Il carico equivalente nell'ipotesi di vento uniforme (cioè il vettore che rappresenta la risultante delle forze agenti per effetto del vento) risultava applicato circa a metà altezza della costruzione, con un momento flettente massimo alla base della torre di 50 923 218 chilogrammetri e uno sforzo di taglio massimo di 66 960 chilogrammi. Nella ipotesi di vento variabile con linearità il momento flettente raggiungeva il valore di 59 745 250 chilogrammetri e lo

sforzo di taglio i 73 050 chilogrammi. Se i supporti della torre fossero stati perpendicolari al terreno, il momento flettente al suolo sarebbe stato di 225 milioni di chilogrammetri. Eiffel ridusse in modo drastico questa enorme forza di rovesciamento, trasferendola al vincolo tramite i quattro tralicci portanti fortemente incurvati che compongono la struttura di base.

L'insolita forma del *montant*, l'idea più singolare del progetto, venne scelta dopo un'analisi rigorosa. Essa si ritrova nella sagoma svasata del faro di Roches-Douvres e nelle torri di sostegno del viadotto ferroviario Bellon. Eiffel e i suoi assistenti dettero alla configurazione una base scientifica.

La curva di ciascuna delle quattro strutture portanti segue, per quanto è consentito a una costruzione rigida metallica, la curva che rappresenta la diminuzione del momento flettente con l'altezza. La curvatura dei tralicci si approssima a un segmento di parabola, ovvero alla medesima curva che si ottie-



L'andamento dei momenti flettenti nella struttura portante di base, o *montant*, della Torre Eiffel corrisponde alla forma della torre stessa. I momenti flettenti tracciati in funzione dell'altezza seguono un segmento di parabola; i quattro tralicci che compongono il *montant* approssimano la stessa curva. Il momento flettente nell'ipotesi di una spinta uniforme del vento pari a 300 chilogrammi per metro quadrato (*curva nera continua*) e quello nell'ipotesi di una spinta del vento variabile fra 200 chilogrammi per metro quadrato alla base e 400 chilogrammi per metro quadrato al pinnacolo (*curva nera tratteggiata*) si discostano solo leggermente dalla linea di mezzeria del traliccio (*curva tratteggiata in colore*). Anche la linea di pressione (*curva in grigio*) lungo la quale viene trasmesso il peso proprio della costruzione segue la sagoma del traliccio.

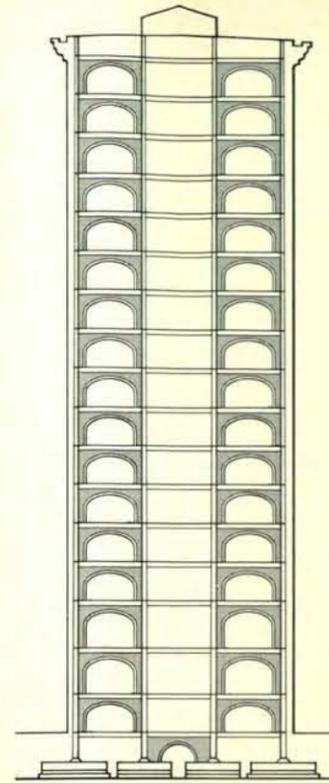
ne tracciando il reciproco del momento flettente in funzione dell'altezza. L'asse dei tralicci corrisponde con buona approssimazione alla linea di pressione lungo la quale viene trasmesso il peso proprio della costruzione (*si veda l'illustrazione in basso*). La conseguenza pratica della sagoma scelta è che gli enormi momenti flettenti e gli elevatissimi sforzi di taglio nel *montant* vengono progressivamente trasformati in una sollecitazione di compressione, ossia nel tipo di sollecitazione ideale per le strutture portanti rigide e cave. Infine la forma prescelta riduce le oscillazioni, sebbene queste restino ancora considerevoli nel tratto sottile della torre.

La torre di Parigi era stata preceduta dalla statua della Libertà, eretta fra il 1883 e il 1886 sull'isola che a quel tempo era chiamata di Bedloe, nel porto di New York. La statua è opera dello scultore Frédéric Auguste Bartholdi mentre il traliccio interno di supporto fu progettato da Eiffel. Costituita da un involucro cavo in rame che si innalza per 57 metri e 37 centimetri al di sopra del piedistallo in muratura, più alta di qualsiasi edificio allora esistente e superata solo da alcuni piloni di ponti, la statua ha posto dei problemi particolari di controventamento. La struttura centrale, costituita da quattro montanti legati da puntoni orizzontali e irrigidita da diagonali incrociate in ciascuna delle quattro facce, sostiene un traliccio sul quale sono fissati i pannelli in rame. La disposizione delle diagonali e la struttura a traliccio dimostrano che Eiffel aveva considerato la figura principale come una mensola verticale e il braccio sollevato come una mensola aggiunta eccentricamente alla prima.

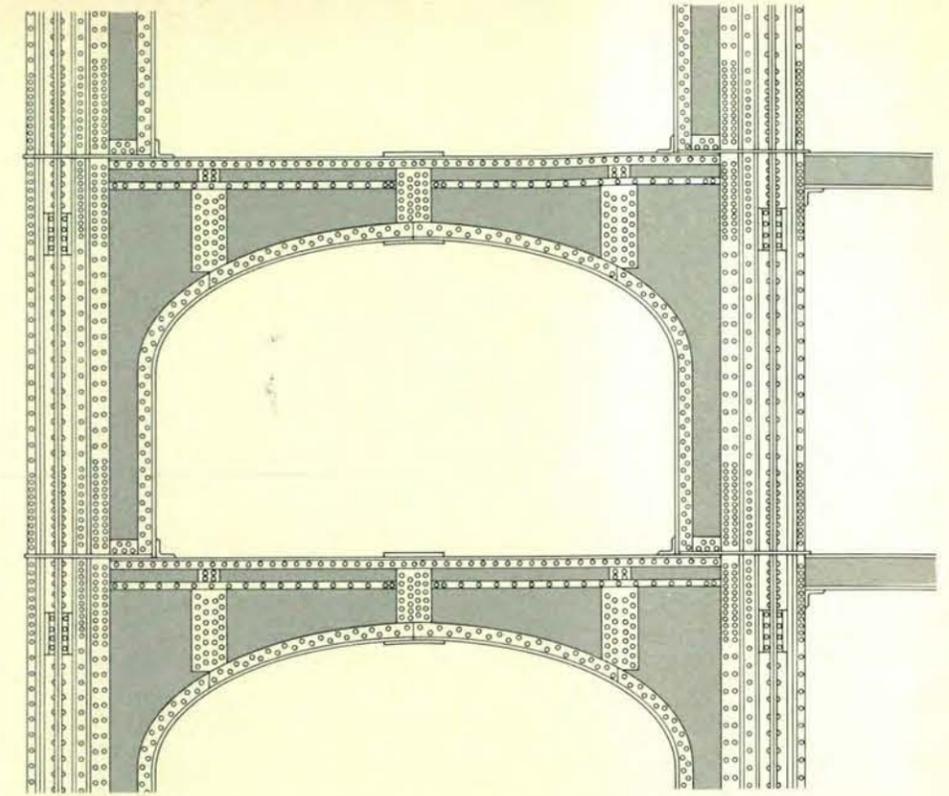
Fu necessario attendere il 1960 perché il modo di affrontare il progetto delle strutture a forte sviluppo verticale usato da Eiffel fosse applicato alla costruzione dei grattacieli. E venne adottato allora perché gli edifici a torre di grande altezza si dimostrano più vulnerabili al vento di qualsiasi altra costruzione precedente, sia per il grande valore del rapporto fra l'altezza e la sezione orizzontale sia per la mancanza delle tradizionali pareti portanti in muratura.

Fra i primi grattacieli vi sono l'Hamemeyer Building a New York e il Monadnock e il Manhattan Building a Chicago, nei quali la resistenza al vento è affidata a diagonali incrociate e a controventature a portale; i primi due hanno anche spesse pareti in muratura alla base.

Corydon T. Purdy ha sviluppato un tipo di controventatura più elaborato



L'arco a portale, derivato dalla controventatura a portale, consentì ai costruttori nell'ultimo decennio del XIX secolo, di erigere fabbricati alti e stretti privi di pesanti pareti portanti in muratura. L'Old Colony Building di Chicago, costruito nel 1893-94 era irrigidito con archi a portale in ciascuno dei suoi diciassette piani (*vista in sezione a sinistra*). Le luci centrali era-



no libere, mentre le serie di archi sovrapposti nelle luci laterali formavano delle strutture trasversali rigide in grado di sostenere la costruzione. Ogni arco era costruito con piastre piane in acciaio, chiodate alle flange delle colonne cilindriche (*dettaglio a destra*). Il sistema era costoso sia per il materiale che per la mano d'opera richiesti e inoltre ostruiva lo spazio interno.

e costoso, conosciuto come arco a portale, che venne impiegato negli alti, stretti e sottili grattacieli frequenti a Chicago nell'ultimo decennio del XIX secolo. Egli progettò per l'Old Colony Building, edificato fra il 1894 e il 1895, un complicato sistema, derivato ancora una volta dal telaio porta dei ponti a trave reticolare, nel quale delle piastre di acciaio erano chiodate fra loro in modo da formare un arco pieno, chiodato a sua volta per tutta l'altezza ai pilastri e, per la larghezza della luce, alle facce inferiori delle travi di solaio (*si veda l'illustrazione in questa pagina*).

Il sistema degli archi a portale scelto da Purdy era costoso sia per la quantità di materiale sia per la mano d'opera che richiedeva, ma la resistenza che assicurava alla struttura indusse gli ingegneri della Gunvald Aus Company ad adottarlo per il Woolworth Building di New York. Costruito fra il 1911 e il 1913, il Woolworth Building, di 231,80 metri, rimase l'edificio più alto del mondo per quasi venti anni (la torre Eiffel era però ancora più alta di circa 46 metri). Gli archi a portale irrigidiscono la struttura fino al ventottesimo piano, mentre nei piani superiori la

funzione è affidata a controventi a ginocchio, chiodati nelle facce superiore e inferiore delle travi trasversali principali nei punti di incontro con i pilastri.

Il continuo aumento nell'altezza dei grattacieli di New York, dai 55 piani del Woolworth Building ai 102 dell'Empire State Building, insieme con i costi crescenti del materiale e della mano d'opera, resero ben presto economicamente proibitivo l'arco a portale. Questo, oltre a essere costoso, richiedeva anche il sacrificio di molto spazio, che avrebbe potuto essere utilmente impiegato in altro modo. Di conseguenza cominciarono a prevalere negli edifici a forte sviluppo verticale altre forme di gomiti, diagonali e controventature a portale più antiche e più leggere, anche se spesso non meno ineleganti.

Alcune caratteristiche del progetto costruttivo e architettonico dei grattacieli permisero in quel periodo di sfruttare per la controventatura alcuni semplici accorgimenti. La distanza fra i pilastri superava di rado 9 metri, rimanendo spesso al di sotto di 6 metri. Le tramezzature erano realizzate in pesanti

mattoni forati e separavano i vani dal pavimento al soffitto; l'area complessiva destinata alle finestre era meno della metà della intera area delle pareti, mentre le singole finestre avevano dimensioni solo approssimativamente standard. La muratura di tamponamento fra le file verticali di finestre era rifinita con un sottile strato di pietra calcarea e i pannelli (che separavano verticalmente le aperture) erano spesso in acciaio inossidabile. Le conseguenze costruttive di queste caratteristiche erano un elevato peso proprio per unità di area coperta e una fitta schiera di pilastri su cui potevano distribuirsi le sollecitazioni di flessione e taglio indotte dal vento. Il grattacielo possedeva quindi una certa resistenza intrinseca al vento, analoga a quella della chiesa romanica, e il suo progettista si preoccupava tanto dei carichi gravitazionali quanto della resistenza al vento della costruzione.

Tuttavia, quando nel 1950 si riprese la costruzione di fabbricati commerciali, dopo il lungo intervallo dovuto alla crisi, alla seconda guerra mondiale e alle incertezze del dopoguerra, si affermò un nuovo stile architettonico per l'influenza degli architetti europei



I metodi tradizionali di controventamento pervennero al culmine dello sviluppo nell'edificio della Chase Manhattan Bank a New York City, completato nel 1961. La torre di 60 piani, alta 240 metri, è stata progettata dall'ufficio di New York della società Skidmore, Owings & Merrill e rappresenta il limite massimo di applicazione della scienza delle costruzioni per gli edifici sostenuti da un'ossatura interna di travi controventate in acciaio e racchiusi da una leggera parete «a cortina» in vetro e metallo.

Mies van der Rohe e Le Corbusier. La moda dominante impose i grattacieli con pareti interamente di vetro mentre la richiesta di superfici interne non limitate da tramezzature fisse portò all'adozione di pannelli leggeri e mobili e a luci fra i montanti di 12 o anche più metri.

All'inizio gli ingegneri affrontarono il nuovo stile architettonico con le tecniche tradizionali, le cui caratteristiche fondamentali, come si è visto prima, possono essere fatte risalire alla metà del XIX secolo. L'opera che rappresenta la conclusione di questo sviluppo durato un intero secolo e che nel contempo chiarisce i motivi per cui era indispensabile escogitare nuove tecniche è l'edificio della Chase Manhattan Bank a New York (si veda l'illustrazione in questa pagina).

Progettato dalla società di progettazione Skidmore, Owings & Merrill e dagli ingegneri costruttori Weiskopf & Pickworth, venne edificato fra il 1957 e il 1961: è stato il primo fabbricato con pareti in vetro alte più di 240 metri. Esso riassumeva necessariamente la scienza delle costruzioni di tutta un'epoca; ne venne fatta l'analisi delle strutture su modello e fu illustrato in *Structure: An Architect's Approach* di H. Seymour Howard.

Il Chase Manhattan Building è alto 60 piani, divisi in tre luci trasversali e in nove longitudinali. Il regolamento edilizio di New York City prescrive che gli edifici devono essere in grado di resistere a una spinta del vento pari a 97,65 chilogrammi per metro quadrato (20 libbre per piede quadrato) su tutte le superfici situate a oltre 30 metri dal suolo (la pressione frontale del vento su un edificio è proporzionale al quadrato della velocità del vento stesso; la formula empirica usata negli Stati Uniti per mettere in relazione queste grandezze è $P = 0,00487V^2$ ove P è la spinta del vento in chilogrammi per metro quadrato e V è la velocità del vento in chilometri all'ora. Una spinta di 97,65 chilogrammi per metro quadrato corrisponde quindi a una velocità del vento di 141,6 chilometri all'ora).

Per il Chase Manhattan Building una spinta del vento di 97,65 chilogrammi per metro quadrato corrisponde a una sollecitazione frontale su ogni luce di 191 420 chilogrammi. La risultante della spinta distribuita dal vento è applicata normalmente alla facciata a un'altezza di 136 metri. Gli sforzi di taglio e di flessione raggiungono il massimo valore al livello del suolo (cioè al piano terra), dove il momento flettente per ciascu-

na luce è $191\,420 \times 136$, ovvero poco più di 26 000 000 di chilogrammi.

L'azione che il vento esercita su un fabbricato a forte sviluppo verticale, edificato in una zona urbana avente un'elevata densità di costruzioni, è piuttosto complessa, ma deve essere prevista dall'ingegnere per poter progettare la sua ossatura in acciaio e dimensionarne gli elementi. Il progetto per la torre di Parigi mostra che Eiffel aveva individuato i tre effetti principali: la flessione dell'intera struttura sotto l'azione della spinta orizzontale del vento, la tendenza della struttura stessa a rovesciarsi ruotando intorno alla linea di base sottovento e la sollecitazione di taglio presente in tutti i montanti. Eiffel si era anche reso conto che i momenti flettenti su una struttura costruita in un materiale elastico come il ferro dovevano inevitabilmente tradursi in uno spostamento misurabile laterale della sua sommità, provocando delle oscillazioni che dovevano essere contenute entro ampiezze tali da non pregiudicarne la stabilità.

Esperimenti condotti nella galleria del vento hanno messo in evidenza ulteriori difficoltà. La vicinanza di altri edifici di grande altezza provoca una turbolenza nelle correnti di aria e inoltre l'effetto Venturi negli stretti spazi delimitati dai fabbricati può aumentare la velocità del vento. Forti spinte del vento accompagnate da improvvise variazioni di direzione inducono flessioni alternate nell'intelaiatura dell'edificio. La formazione e la diffusione ripetuta di vortici, dovuti allo sbarramento delle correnti d'aria, dà luogo a oscillazioni nel piano perpendicolare alla direzione del vento. Infine pressioni non uniformi, piani a sbalzo e l'impiego di montanti situati all'esterno del piano della parete sottopongono la struttura a torsione e a flessione, e talvolta generano anche pressioni negative, ossia pressioni dell'aria all'interno dell'edificio superiori a quella esterna.

L'ingegnere deve progettare un'intelaiatura e calcolare forme e aree delle sezioni degli elementi strutturali, in modo che la struttura medesima resista all'insieme delle sollecitazioni (almeno per tutta la vita prevista) e non si sposti sotto l'azione del vento in modo sgradevole o tale da turbare gli occupanti. La prima fase della progettazione è la traduzione dei vari effetti del vento in azioni quantitative meccaniche sull'intelaiatura. Il metodo abituale attualmente applicato è un ritorno al metodo di calcolo usato da Eiffel: un edificio di gran-

de altezza è considerato una mensola verticale incastrata nel terreno e sottoposta alle spinte del vento.

Quando una trave (o un edificio) incastrata è sollecitata a flessione, la metà verso il lato più vicino al carico è convessa mentre l'altra metà è concava. La metà convessa è in tensione con valori di sollecitazione compresi, in teoria, fra zero in corrispondenza dell'asse neutro di mezzeria e un massimo in corrispondenza della fibra esterna. La metà concava è compressa con i medesimi valori di sollecitazione. È possibile fare la stessa generalizzazione per una trave semplice sottoposta a flessione (una trave appoggiata alle estremità), salvo che in questo caso risulta concava la metà verso il lato ove è applicato il carico. La trave è sottoposta anche a sollecitazioni assiali di taglio che sono massime nella zona dove tensione e compressione si avvicinano allo zero, e a sollecitazioni trasversali di taglio che raggiungono il massimo in corrispondenza dell'incastro nel caso della mensola e degli appoggi in quello della trave semplice (si veda l'illustrazione nella pagina seguente).

In un fabbricato assimilato a una mensola, supposto soggetto alla sola azione del vento, i montanti sopravvento sono in tensione e quelli sottovento in compressione, essendo inoltre presenti sforzi di taglio negli elementi strutturali paralleli alla direzione del vento e in tutti i pilastri. In questi ultimi gli sforzi maggiori sono prodotti dai venti che soffiano sulle facciate più larghe dell'edificio, perché in tal caso nella profondità dell'edificio vi è un minor numero di montanti sottoposti a taglio e flessione.

Nel caso del Chase Manhattan Building a un vento che soffia in direzione normale a una delle facciate larghe devono resistere quattro pilastri per ciascuna luce. Con una spinta di 97,65 chilogrammi per metro quadrato i pilastri sopravvento sono sottoposti a una sollecitazione di tensione di 567 000 chilogrammi e quelli sottovento a una sollecitazione di compressione di 712 000 chilogrammi. I due pilastri interni sono invece sottoposti a carichi molto inferiori. Le sollecitazioni di taglio sono invece distribuite in modo contrario, cioè con il carico maggiore sui pilastri interni.

La rigidità della struttura sotto l'azione di questi carichi è assicurata da tre tipi di controventatura. In tutti i piani della luce centrale della sezione trasversale sono state inserite delle travi a K (che in questo caso assumono l'aspetto di lettere K disposte

orizzontalmente). Controventi a ginocchio disposti fra solaio e solaio irrigidiscono tutte le luci della sezione longitudinale nelle quali non interferiscono con la distribuzione degli spazi o con i movimenti interni, mentre in tutto il fabbricato sono usate controventature a portale. Nelle luci centrali sia della sezione trasversale sia di quella longitudinale gli elementi diagonali si estendono dalle fondazioni alla copertura. Due sono le ragioni per tale concentrazione di membratura di irrigidimento: le luci centrali, analogamente alle fibre di mezzeria di una trave inflessa, giacciono lungo l'asse secondo il quale la struttura tende con maggiore facilità a dividersi sotto la spinta del vento. Inoltre i pozzi degli ascensori situati in queste luci sono zone di debolezza per complesse e concentrate sollecitazioni che si manifestano lungo i loro bordi.

L'ingegnere deve tener conto anche di altri due effetti del vento. In primo luogo deve assicurarsi che l'edificio non possa essere rovesciato dal vento. Ciò può essere verificato con un bilancio dei momenti: se il fabbricato deve restare in posizione verticale il momento prodotto dal vento che tende a rovesciare la costruzione intorno alla linea di base sottovento deve essere inferiore al momento dovuto al peso proprio che tende a raddrizzarla intorno alla stessa linea. Per il Chase Manhattan Building il momento del vento per luce, secondo quanto è stato detto sopra, è di 26 milioni di chilogrammi. Il peso proprio di ogni luce pari a 6940 tonnellate è applicato con un braccio di 17,13 metri (distanza fra la mezzeria del fabbricato e la linea di base sottovento) e genera un momento in senso contrario al precedente pari a 118,9 milioni di chilogrammi. La stabilità dell'edificio sotto la spinta del vento è quindi assicurata, poiché il momento di bilanciamento è quasi cinque volte superiore al momento di rovesciamento.

L'ultima grandezza che deve essere determinata dall'ingegnere è lo spostamento o oscillazione indotta dal vento. Stabilito un valore limite per la deviazione l'intelaiatura viene progettata in modo da evitare deformazioni che superino il limite prefissato. Per gli edifici più vecchi si imponeva di norma un'oscillazione limite pari a $0,003 h$, ove h è l'altezza; per quelli più recenti che superano 240 metri il limite è stato ridotto a $0,0015 h$, valore adottato per il Chase Manhattan Building: per questo fabbricato è consentita quindi un'oscillazione di 366 millimetri, ov-

vero 183 millimetri per parte rispetto all'asse.

Il sistema costruttivo del Chase Manhattan Building potrebbe sembrare l'ultima parola in fatto di controventamento interno, e in un certo senso si poteva considerare esatta tale affermazione. Il numero delle membrature di irrigidimento esistenti del traliccio è immenso: vi sono quasi 3000 elementi diagonali, molte migliaia di piastre e di staffe in ferro e milioni di chiodi. Un peso straordinario e molte ore di lavoro sono state dedicate ad assicurare la rigidità dell'edificio sotto la spinta del vento.

Con la continua richiesta di fabbricati sempre più alti, qualunque potesse essere il danno che ne derivava all'ambiente urbano, divenne tuttavia evidente che occorreva escogitare dei metodi di controventamento meno costosi. Infatti all'inizio degli anni 1960 parecchi ingegneri svilupparono contemporaneamente un nuovo procedimento.

Il principio fondamentale di questa tecnica è una variazione contemporanea dei concetti su cui si basa il progetto della Torre Eiffel, malgrado che

questi non fossero probabilmente noti ai progettisti. I principali innovatori sono stati Fazlur R. Khan e Myron Goldsmith dell'ufficio di Chicago della Skidmore, Owings & Merrill, e numerosi ingegneri facenti parte dello staff di progettisti della ditta Worthington, Skilling, Helle e Jackson di Seattle.

Il ragionamento di questi progettisti era fondato sull'ipotesi che se fosse possibile costruire un edificio che si comportasse come un tubo cavo a pareti solide, un qualcosa di simile a una gigantesca scatola, oppure come un traliccio tubolare irrigidito, analogo alle strutture di supporto dei primi viadotti ferroviari, si otterrebbe una struttura il cui comportamento sarebbe quello di una mensola rigida e le cui pareti esterne sopporterebbero tutte le forze orizzontali, con conseguente drastica riduzione della proliferazione dei controventi interni.

Tale fine può essere raggiunto in vari modi, due dei quali sono illustrati dalle prime opere realizzate secondo tale principio. Una è l'International Business Machines Building a Pittsburgh, eretto, fra il 1922 e il 1963 dagli ingegneri Worthington, Skilling, Helle

e Jackson su progetto degli architetti Curtis e Davis. Il fabbricato è una scatola cava rigida con pareti reticolari, una struttura ideata nel 1820 da Ithiel Town, usata molto tempo fa nei ponti, ma mai nei fabbricati. L'altra è rappresentata dai Chestnut-DeWit Apartments a Chicago, edificio costruito contemporaneamente a quello della IBM. È opera di Skidmore, Owings & Merrill, con progetto costruttivo di Khan, ed è costituita da un tubo cavo in cemento armato le cui pareti formano un'ossatura monolitica composta da una fitta schiera di montanti rastremati e da corte travature.

L'edificio più spettacolare e complesso realizzato applicando la tecnica citata è il John Hancock Center a Chicago alto 100 piani, opera di Skidmore, Owings & Merrill, eretto su progetto costruttivo di Khan fra il 1965 e il 1970 (si veda l'illustrazione a pagina 87). Si presenta come una mensola tubolare irrigidita a profilo rastremato ed è l'equivalente quasi esatto di un'antica torre di sostegno a traliccio di ponti in ferro sotto forma di grattacielo. Ciascuna delle quattro facciate è costituita da pilastri e da travi rigidamente vincolate fra loro mediante immense membrature diagonali incrociate che formano delle travature a X larghe cinque pannelli e alte 18 piani e da travi a K nel pannello terminale alto 10 piani. Pilastro, trave e diagonale si incontrano in un punto dove sono rigidamente connessi con una grossa piastra di rinforzo.

Il risultato costruttivo di questo « supertraliccio » impeccabilmente progettato è che tutti gli sforzi di flessione prodotti dal vento e tutti i carichi assiali nei pilastri determinati da sollecitazioni di tensione e di compressione dovute al vento sono eliminati dalla struttura interna e trasferiti sulle pareti a traliccio. Anche le diagonali contribuiscono a distribuire le forze, cosicché qualsiasi configurazione di carichi verticali su un montante a una certa quota è uniformemente ripartito fra tutti i montanti alla base. Ancora più notevole, perché contrario a quanto si verifica normalmente in un traliccio, è il fatto che le diagonali sono quasi sempre compresse, indipendentemente dall'azione del vento e per questo motivo sono state definite « pilastri inclinati ». Le conseguenze economiche del progetto sono eccezionali quanto l'aspetto della costruzione: la struttura contiene solo 145 chilogrammi di acciaio per ogni metro quadrato di superficie in pianta, mentre negli edifici a traliccio convenzionale si hanno di norma valori compresi fra 195 e 245 chilogrammi per metro quadrato.

Esistono anche altri metodi costruttivi

per le mensole tubolari rigide. La struttura muraria che si avvicina con la migliore approssimazione a un diaframma piano è quella dello Standard Oil Building di Chicago. Progettata da Edward Durell Stone e dalla Società Perkins & Will e iniziata nel 1970, la torre ha 80 piani raggiungendo un'altezza di 414,5 metri. Le facciate, dotate di finestre piccole e notevolmente distanziate, sono chiuse da piastre di acciaio piene irrigidite da prismi triangolari a forma di sperone che, oltre alla funzione strutturale di contrafforti, alloggiavano condutture, condotti e tubature.

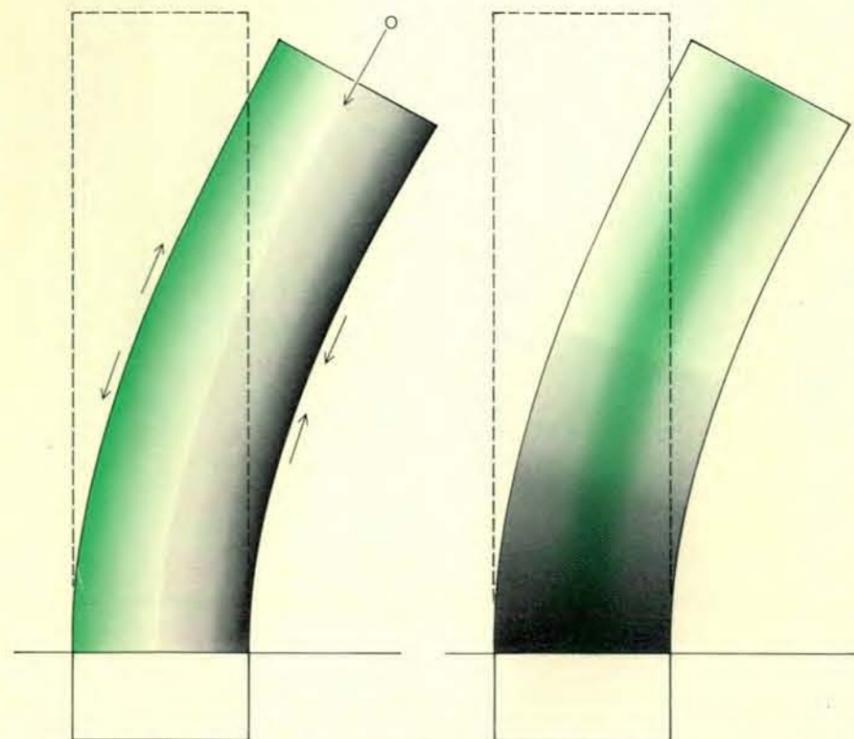
Altra variazione è il World Trade Center di New York, costituito da due torri di 110 piani alte 411,5 metri. Il Centro, iniziato nel 1968, è stato progettato da Minoru Yamasaky, Emery Roth & Sons e da Worthington, Skilling, Helle e Jackson. Il fitto disegno esterno delle torri è realizzato con gli elementi verticali molto ravvicinati di tralici Vierendeel. Si tratta di tralici privi di membrature diagonali, la cui rigidità è assicurata da giunti progettati in modo da resistere alla flessione e al taglio. Un sistema analogo è stato adottato nell'ossatura delle pareti del Sears, Roebuck and Company Building di Chicago, iniziato nel 1970, che con i suoi 442 metri è attualmente il più alto edificio del mondo. Ne sono stati architetti e costruttori Skidmore, Owings & Merrill.

Un terzo sistema è stato impiegato nel Boston Company Building, edificato fra il 1969 e il 1970 a Boston. Ne sono stati architetti Pietro Belluschi e Emery Roth, mentre i costruttori appartenevano allo staff di James Ruderma. I tralici a K disposti nell'intelaiatura delle pareti, cui si aggiunge una struttura ad anello al livello del secondo piano, trasmettono tutte le spinte del vento e la maggior parte dei carichi gravitazionali a quattro poderosi pilastri angolari rastremati con sezione a croce. Questo sistema si è finora dimostrato il più economico: la quantità di acciaio è di appena 102 chilogrammi per metro quadrato di superficie in pianta.

Tutti gli antenati di questi sistemi costruttivi si ritrovano nell'evoluzione dei ponti a travi reticolari nel corso degli ultimi 150 anni; gli edifici « tubolari » possono essere considerati ponti a sbalzo vincolati a una estremità. Al momento in cui verranno introdotti sistemi costruttivi analoghi a quelli dei ponti sospesi, come in effetti si sta già verificando, l'analogia fra il progetto dei ponti in acciaio e quello dei grattacieli a traliccio sarà pressoché completa.



Un traliccio esterno realizzato con immense membrature in acciaio sopporta tutte le spinte del vento nell'edificio alto 100 piani del John Hancock Center di Chicago. In ogni facciata le controventature formano delle travature a X larghe cinque pannelli e alte 18 piani e delle travi a K negli ultimi 10 piani. La torre è una mensola tubolare irrigidita ed è l'equivalente in forma di grattacielo delle torri di sostegno dei ponti in ferro del XIX secolo. Gli sforzi di flessione indotti dal vento sono eliminati dalla struttura interna e trasferiti sulle pareti a traliccio. Inoltre qualsiasi configurazione di carichi verticali è uniformemente ripartita fra i montanti. Architetti e costruttori appartenevano all'ufficio di Chicago della società Skidmore, Owings & Merrill.



La deflessione di una mensola induce almeno quattro tipi di sollecitazione. Tensione e compressione (a sinistra) raggiungono il valore massimo in corrispondenza delle fibre esterne e si avvicinano a zero in corrispondenza dell'asse neutro di mezzeria. Nel lato convesso si ha tensione (in colore), e in quello concavo compressione (in grigio). Sono presenti anche sollecitazioni di taglio (a destra). Il taglio longitudinale (in colore) è provocato dal contrasto fra sforzi di tensione e di compressione e raggiunge il massimo valore in mezzeria; il taglio trasversale (in grigio) è massimo all'incastro della struttura. In un edificio considerato come una mensola sottoposta alla spinta del vento possono essere presenti anche forze che tendono a rovesciare e a torcere la struttura.