



Edifici alti



Gli edifici alti

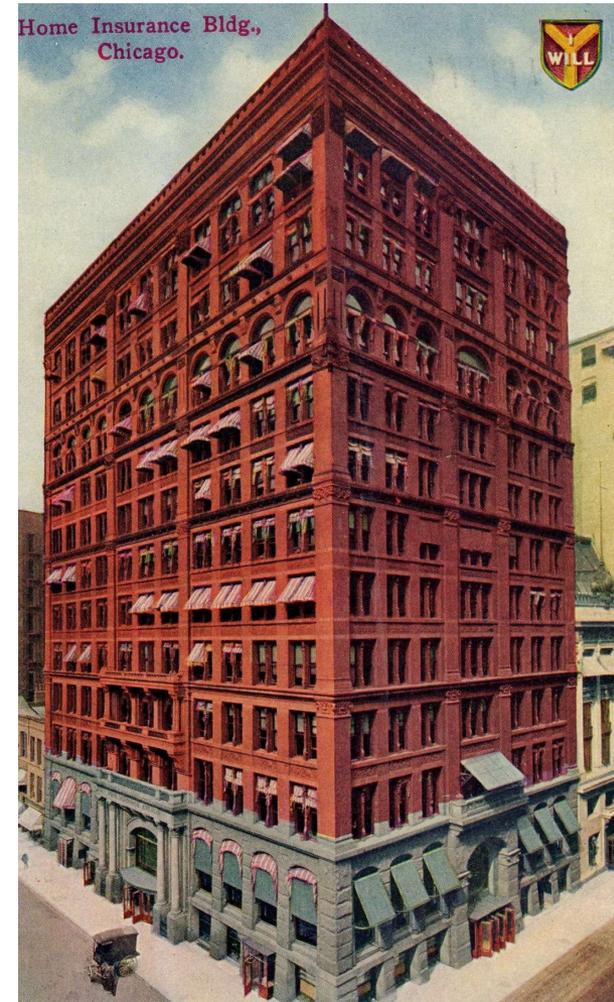
Negli ultimi 200 anni la popolazione mondiale è cresciuta da un miliardo a quasi sette miliardi. Si prevede che in meno di quarant'anni possa raggiungere i nove miliardi.

Con questa prospettiva, l'attuale modello di sviluppo, che si basa sulla disponibilità infinita di suolo, di acqua e di energia, non può essere sostenibile nel futuro.

Al giorno d'oggi, gli edifici e i trasporti sono responsabili dei due terzi dell'emissione di CO₂ nell'atmosfera. Molti ritengono che le principali cause dei cambiamenti climatici sono dovute al modo con cui posizioniamo gli edifici e ci muoviamo tra essi.

Il futuro del nostro pianeta dipende anche dalla nostra capacità di costruire città che dovranno essere non solo piacevoli e vivibili, ma anche dense e compatte.

Una possibile chiave per raggiungere tutto questo è rappresentata da un'invenzione americana della fine del 19° secolo: l'*edificio alto*.



Gli edifici alti

I cosiddetti “grattacieli” - *skyscrapers* in lingua americana – costruiti in acciaio e vetro hanno rappresentato una grande rivoluzione nel campo dell’architettura. Le condizioni per la loro realizzazione furono dovute a una concomitanza di eventi e di straordinari progressi tecnologici:

a) L’evoluzione dell’industria

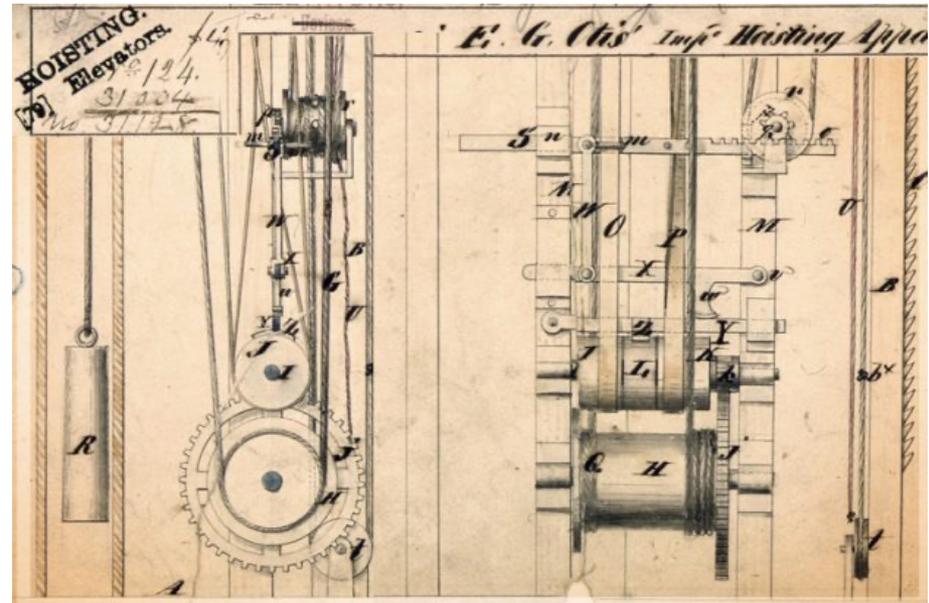
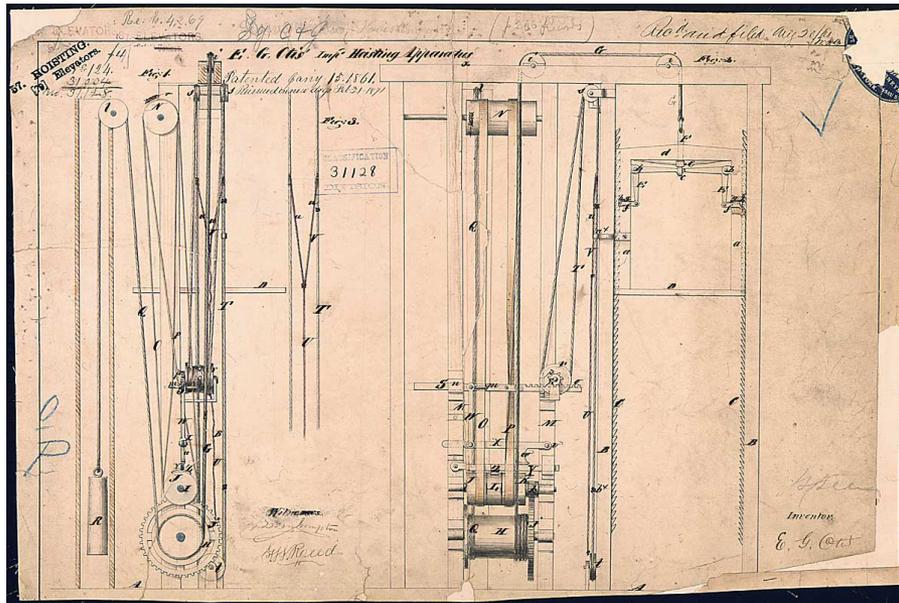
- Disponibilità di elementi strutturali in acciaio, prodotti in serie e a basso costo dalle industrie che consentirono: (i) la progettazione di strutture molto più alte e snelle di quelle tradizionali in muratura portante; (ii) lo sviluppo del sistema costruttivo a telaio, modulare e ripetibile a ogni piano; (iii) la realizzazione di aperture più ampie con il conseguente miglioramento delle condizioni di illuminazione e di confortevolezza.
- Disponibilità di dispositivi di collegamento degli elementi strutturali, quali bulloni e rivetti, in precedenza realizzati solo artigianalmente.



Gli edifici alti

b) L'invenzione dell'ascensore elettrico

Insieme alla diffusione dell'energia elettrica, l'invenzione dell'ascensore, brevettato da Elisha Graves Otis nel 1853, rese comodamente fruibili anche i piani più alti, trasformandoli in quelli con maggiore valore, data la migliore luminosità e la progressiva distanza dai rumori della strada.



L'occasione per sperimentare l'applicazione delle nuove tecnologie per la costruzione di edifici alti si ebbe a seguito di un evento disastroso: l'incendio che distrusse il centro e la zona nord della città di Chicago nel 1871.

L'incendio di Chicago (1871)

L'incendio, che nell'ottobre 1871 devastò una gran parte del centro di Chicago, costituì una grande opportunità di ripensare il progetto e la costruzione dell'ambiente urbano, di considerare i limiti dei materiali comunemente utilizzati, di approfondire la comprensione del comportamento e delle potenzialità di nuovi materiali e di nuovi sistemi strutturali, di concepire e sviluppare sistemi di trasporto verticali per muovere persone e cose all'interno degli edifici più alti.



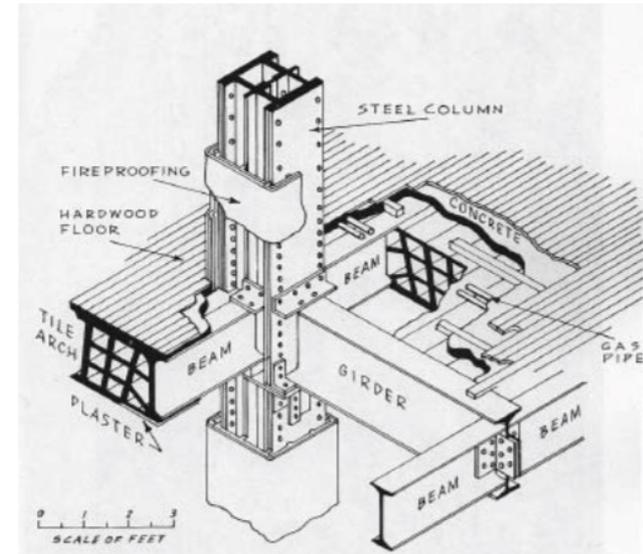
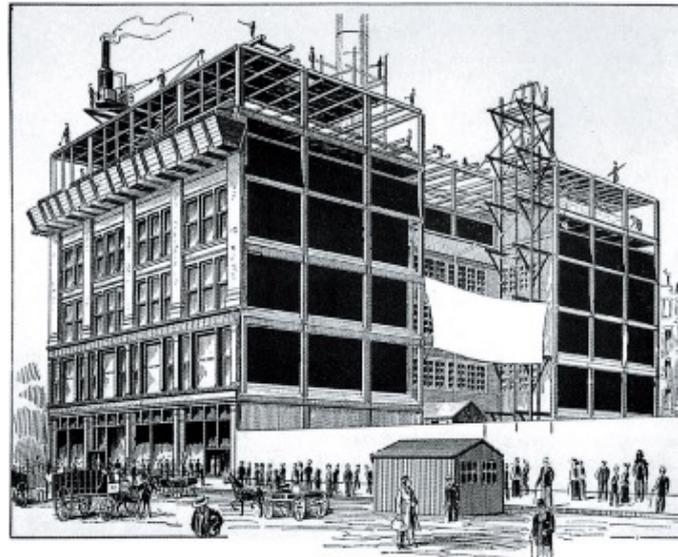
I grandi studi di architettura della città riuscirono a trasformare la catastrofe in opportunità. A quel tempo Chicago era in una fase di crescita economica, essendo uno dei principali nodi commerciali tra Est e Ovest. Era dunque necessario ricostruire rapidamente gli edifici che, allo stesso tempo, dovevano consentire di sfruttare al massimo le costose aree del centro della città.

Queste esigenze costituirono le condizioni ideali che portarono alla definizione di una nuova tipologia edilizia: il grattacielo.

La Scuola di Chicago (William Le Baron Jenney)

Dal punto di vista strutturale, le costruzioni tradizionali in legno e in muratura non consentivano di superare una certa altezza: più l'edificio era alto e più le pareti dovevano essere spesse ai piani bassi. Oltre una certa altezza, la perdita di spazio in pianta rendeva l'operazione antieconomica.

Per superare questo ostacolo le pareti in muratura furono sostituite da travi e pilastri in acciaio imbullonati, in modo da formare uno scheletro metallico relativamente sottile, identico per ogni piano. Le facciate, perduta qualsiasi funzione portante, potevano essere realizzate agganciando dei pannelli di chiusura al telaio strutturale, con notevole aumento delle parti vetrate.



Magazzini Fair – Chicago 1891

Home Insurance Building – Chicago 1885 (William Le Baron Jenney)

La Scuola di Chicago (Daniel Burnham & John Root)



Monadnock Building – Chicago 1891



Reliance Building – Chicago 1891

La Scuola di Chicago (Dankmar Adler & Louis Sullivan)



Auditorium— Chicago 1889



Magazzini Schlesinger & Mayer
Chicago 1885-1903

Grattacieli a New York



Fuller building
(Flatiron) 1902
(Burnham - Dinkelberg)



Chrysler building 1930
(William Van Allen)



Empire state building 1931
(Shreve – Lamb – Harmon)

Grattacieli a New York



58th FLOOR

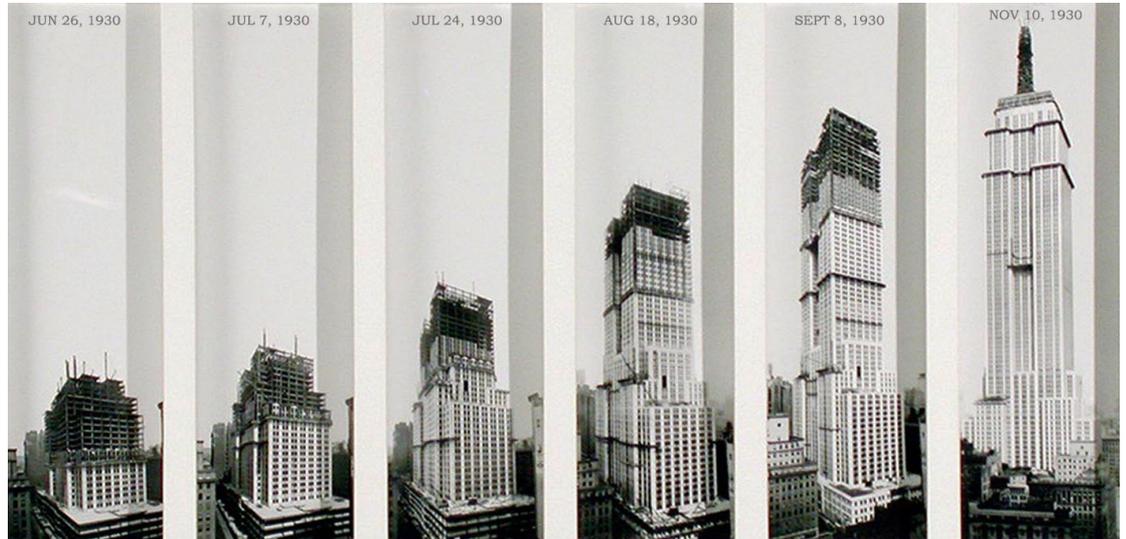
58TH FLOOR	25,713 RSF
CENTRAL	25,713
OFFICE	21
RECEPTION	28
TOTAL BROOKLYN	258,000
CONF ROOM	3
RECEPTION	1
RESTROOM	2
COPY ROOM	3
STAIR FLIGHT	3
STORAGE	1
IT	1
MECHANICAL	4

EMPIRE STATE BUILDING
350 FIFTH AVENUE
NEW YORK, NY 10118

58TH FLOOR

EMPIRE STATE REALTY TRUST
www.empirestaterealtytrust.com

ESRT
NYSE REBNY



Empire state building 1931
(Shreve – Lamb – Harmon)

Dal dopoguerra agli anni '60

Dopo una pausa dovuta alla seconda guerra mondiale, la costruzione degli edifici alti in acciaio riprese con un approccio maggiormente minimalista.



860 & 880 North Lake Shore Drive – Chicago
(Mies van der Rohe - 1951)

Dal dopoguerra agli anni '60



Lever House – New York 1952
(Skidmore, Owings & Merrill)



Alcoa Building – San Francisco 1964
(Skidmore, Owings & Merrill)

Gli anni '70

Ulteriori progressi si ebbero negli anni '70, quando la disponibilità dei primi *supercomputer* (Cray Computer) fornì la potenza di calcolo necessaria per la modellazione di edifici ancora più complessi.

Ulteriori avanzamenti, inoltre, furono dovuti alla nascita di nuove discipline, come l'*ingegneria del vento* e l'*ingegneria geotecnica*, che consentirono lo sviluppo di soluzioni sempre più ardite.



John Hancock Tower – Chicago 1969
(Skidmore, Owings & Merrill)



Willis Tower – Chicago 1973
(Skidmore, Owings & Merrill)

L'uso del calcestruzzo armato

Nello stesso periodo SOM svilupparono soluzioni diverse mediante l'uso del conglomerato cementizio armato. Una maggiore comprensione delle caratteristiche fisiche e meccaniche del calcestruzzo, insieme a un incremento della resistenza a compressione, condussero a soluzioni economicamente vantaggiose, alternative all'uso dell'acciaio strutturale per la realizzazione di edifici alti.



Brunswick Building – Chicago 1964
(Skidmore, Owings & Merrill)

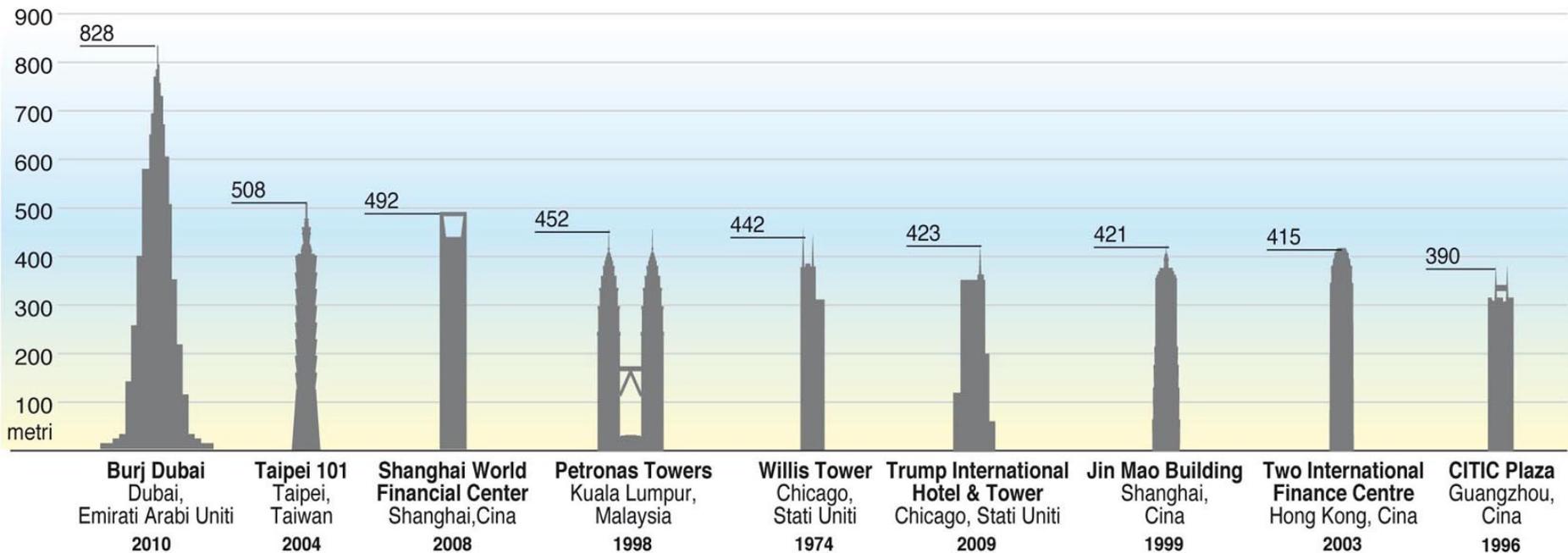


Chestnut-Dewitt Tower – Chicago 1965
(Skidmore, Owings & Merrill)

Altezza

L'altezza di un grattacielo dipende da:

- Resistenza del materiale
- Condizioni del sito
- Sistema strutturale
- Capacità di modellazione analitica
- Comprensione del comportamento strutturale dell'edificio
- Limitazioni finanziarie
- Esigenze simboliche e di rappresentatività



Caratteristiche del sito

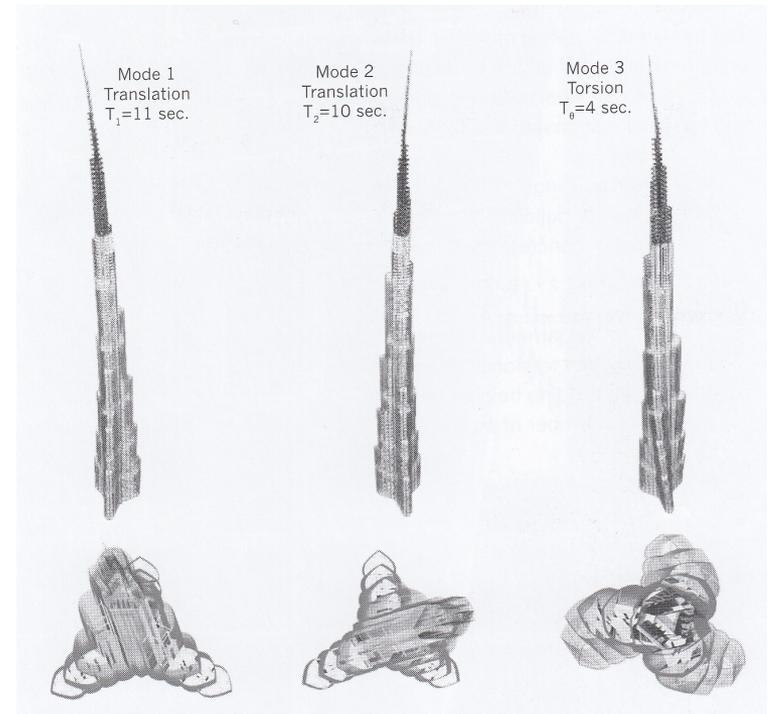
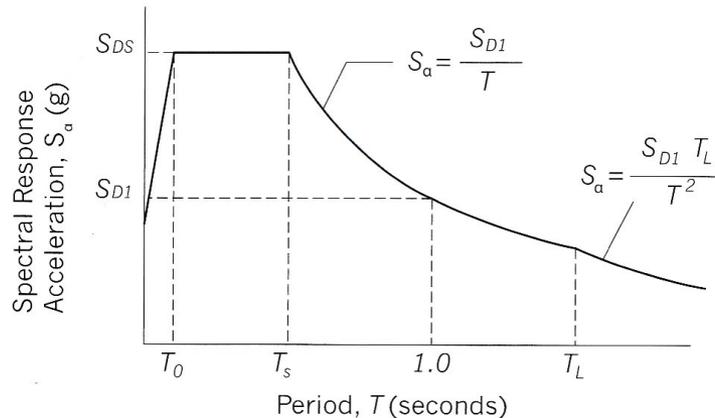
Le caratteristiche del sito includono gli effetti del **vento** di un eventuale **sisma** e del **suolo** di fondazione (condizioni geotecniche).

Il comportamento strutturale di edifici alti più di 200 m e realizzati in zone anche a forte sismicità è controllato dagli effetti del vento, piuttosto che da quelli sismici. Questo è vero anche nel caso di edifici in calcestruzzo, che hanno una massa molto maggiore di quelli in acciaio.

Gli edifici alti, infatti, sono in genere molto flessibili e presentano un periodo fondamentale di vibrazione molto lungo, anche superiore a 5 s. Per questa ragione sono soggetti a forze d'inerzia in proporzione molto più piccole di quelle di edifici bassi, caratterizzati da un periodo di vibrazione molto più corto.

$$T = 0,085 \cdot H^{0,75} \text{ per edifici in acciaio}$$

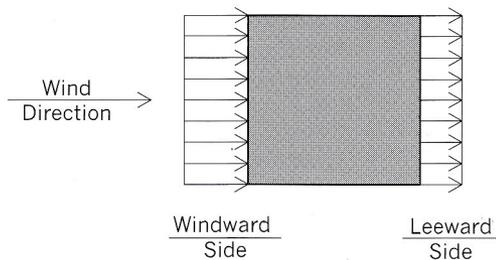
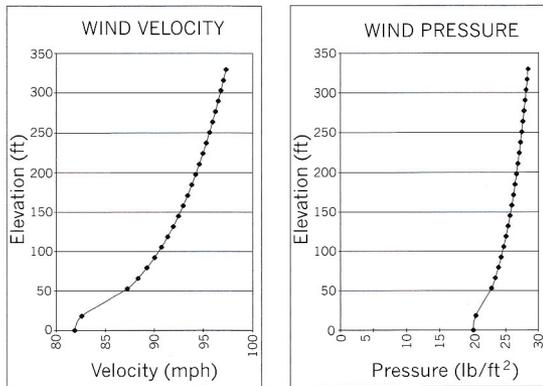
$$T = 0,061 \cdot H^{0,75} \text{ per edifici in calcestruzzo}$$



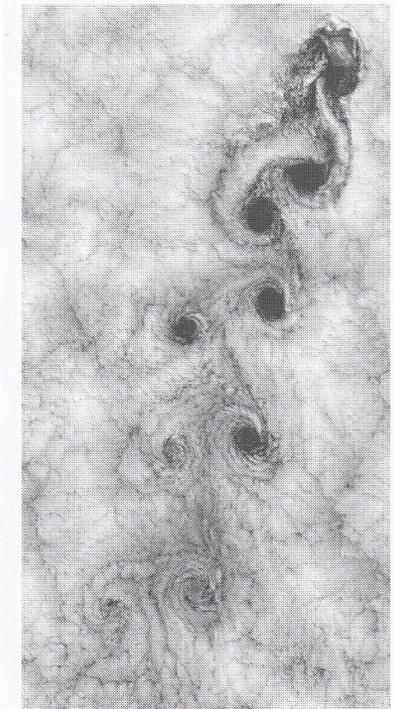
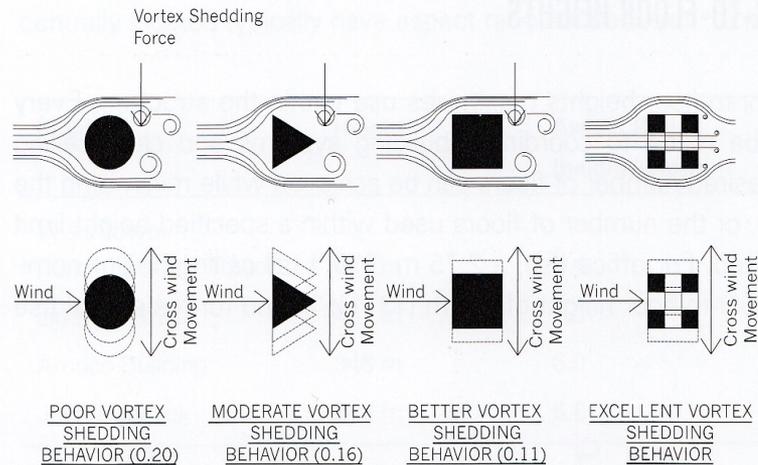
Effetti del vento

La massa d'aria in movimento esercita una pressione sulla parte dell'edificio direttamente investita e provoca una depressionione su quella opposta. Sulle parti parallele alla direzione del vento si ha un'azione di trascinamento. Molto importante è anche l'effetto dell'eventuale distacco di vortici, che provoca l'effetto di forze variabili trasversali.

Le azioni del vento sono di tipo dinamico (variabili nel tempo) e determinano una vibrazione dell'intero edificio, influenzando le condizioni di confortevolezza al suo interno.

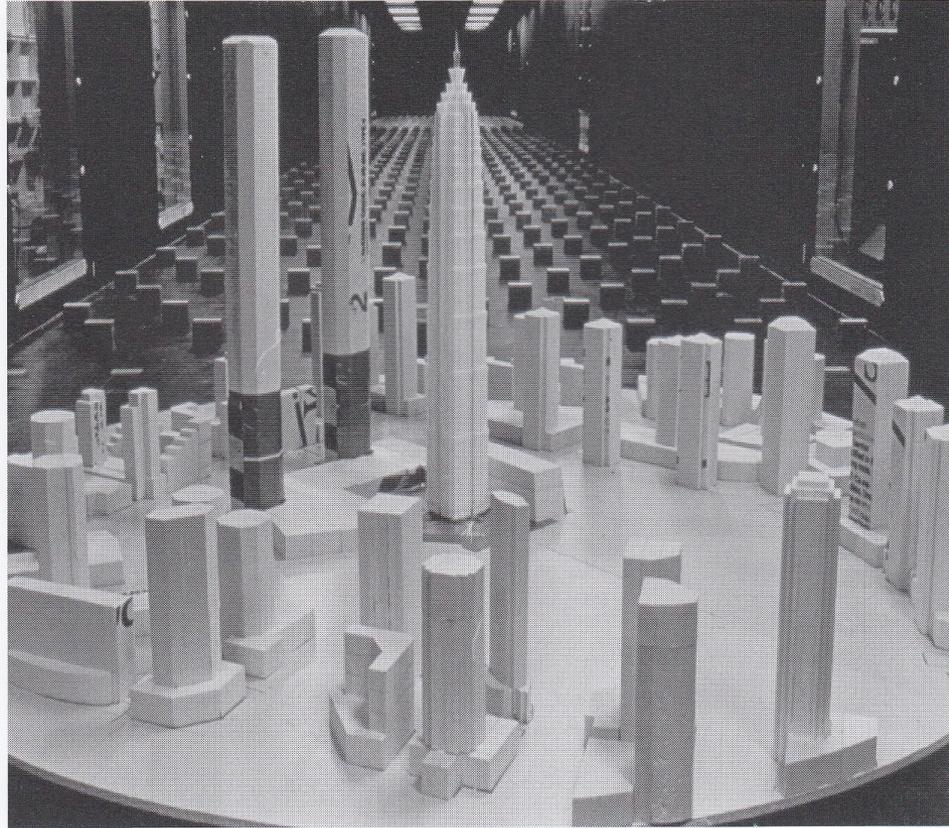


Una buona aerodinamica della forma dell'edificio contribuisce a ridurre le forze del vento



Effetti del vento

L'entità delle azioni del vento possono essere quantificate attraverso le prescrizioni normative. Inoltre, molto efficaci possono anche essere gli studi condotti in galleria del vento, specialmente quando la presenza di altri edifici alti realizzati in zone limitrofe può esercitare una notevole influenza. In questo modo la valutazione delle forze esercitate dal vento possono essere molto più precise.



Jin Mao Tower Wind Tunnel Testing

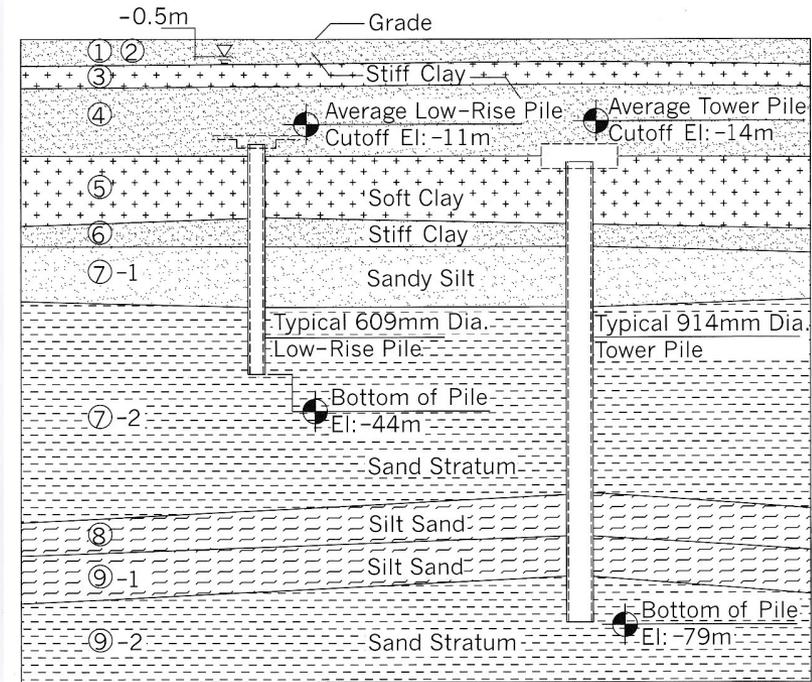
Suolo di fondazione

La natura del suolo influenza notevolmente la scelta del tipo di fondazione. Molto importanti sono gli aspetti legati al consolidamento del suolo e di eventuali cedimenti differenziali, nonché quelli di un'eventuale liquefazione durante un forte terremoto.

Le fondazioni possono essere superficiali (a piastra) o profonde (pali battuti o trivellati) per raggiungere strati profondi di migliori caratteristiche meccaniche.



Mat Foundation Prior to Concrete Pour,
Burj Khalifa, Dubai, UAE

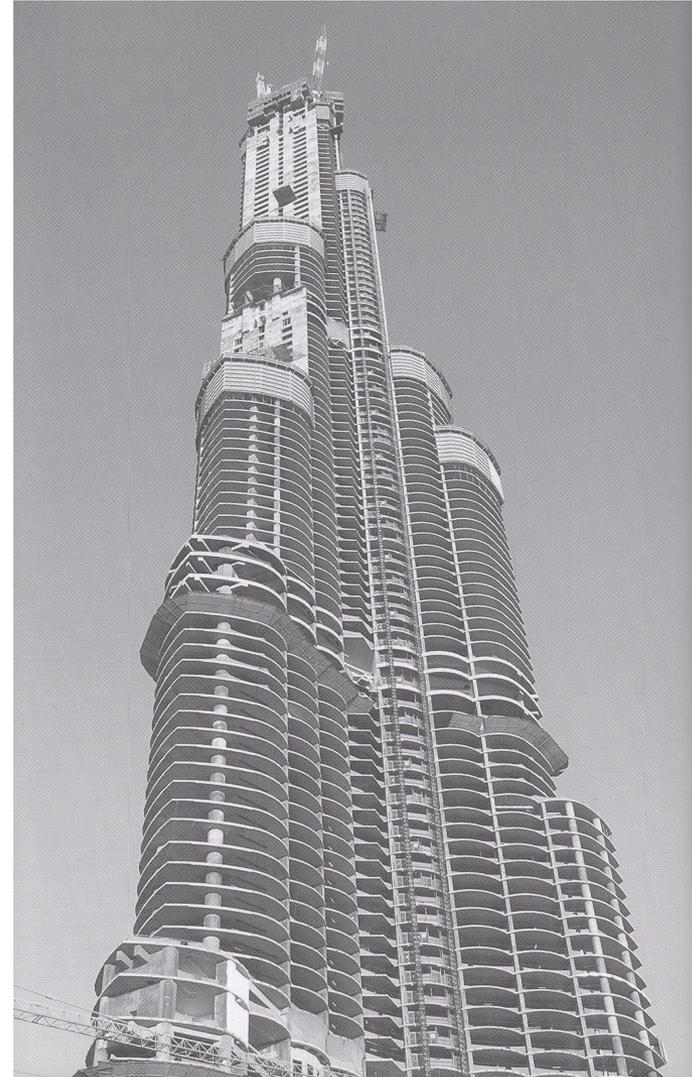


Aspetti rilevanti per la progettazione

Gli edifici alti, così come tutti gli altri tipi di costruzioni, devono possedere un'adeguata **resistenza** ed essere in grado di **svolgere la funzione** per cui sono stati progettati. Tutto questo richiede un'attenta considerazione delle questioni riguardanti:

- l'entità degli spostamenti lungo l'altezza
- le accelerazioni indotte dal vento
- lo smorzamento
- gli accorciamenti elastici
- la viscosità
- il ritiro

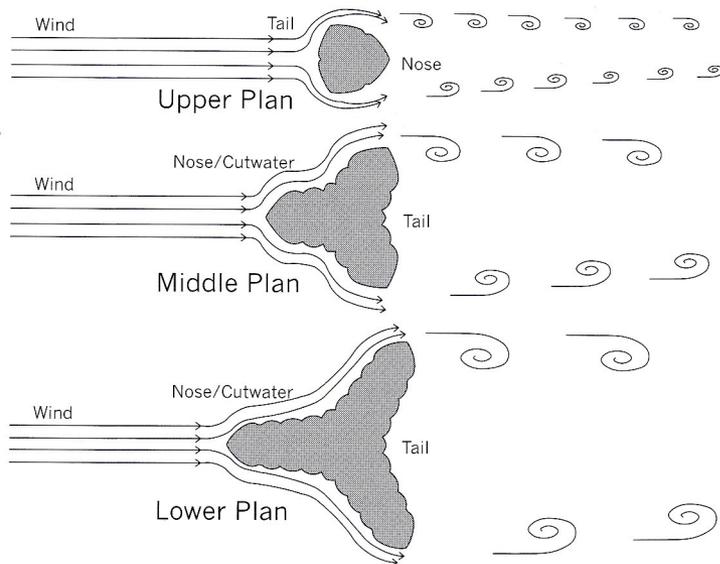
La chiara comprensione delle proprietà meccaniche dei materiali e del comportamento globale dell'edificio sotto i carichi applicati sono fondamentali per valutare la fattibilità del progetto e le condizioni d'uso della costruzione.



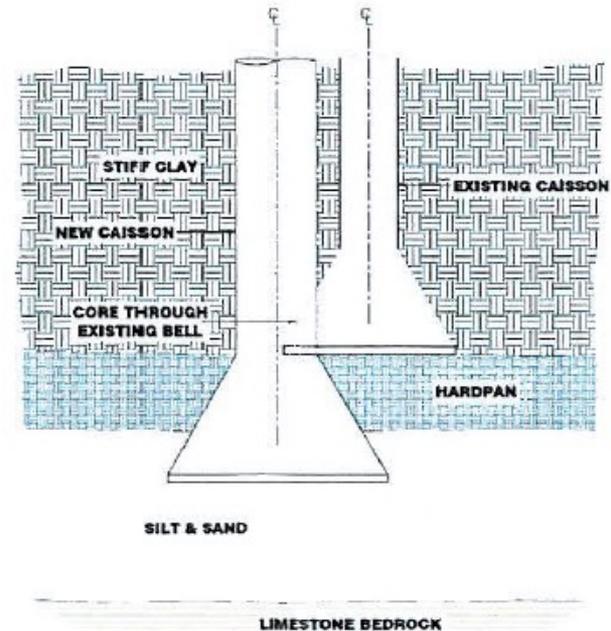
Resistenza dei materiali

Oltre che sui carichi gravitazionali, il progetto strutturale è di solito basato sulle azioni del vento che presentano un periodo di ritorno di 50 anni e su azioni sismiche che hanno la probabilità del 10% di essere superate in 50 anni. Le azioni del vento possono essere ridotte attraverso una scelta adeguata delle proprietà aerodinamiche dell'edificio.

Negli ultimi anni i materiali da costruzione si sono notevolmente evoluti. Oggi si possono impiegare calcestruzzi con resistenza a compressione fino a 110 MPa e acciai strutturali con resistenza allo snervamento di 450 MPa. L'aumento della resistenza disponibile ha consentito progetti più efficienti ed efficaci, con l'impiego di elementi strutturali più snelli rispetto al passato.



Disruption of Organized Vortex Shedding,
Burj Khalifa, Dubai, UAE



Funzionalità

Insieme alla resistenza, la **funzionalità** è il principale requisito di una corretta progettazione. L'aspetto più critico è legato all'**accelerazione** dovuta al moto indotto dal vento. La percezione del moto da parte degli occupanti dipende dall'uso dell'edificio, nonché dalla **rigidezza**, dalla **massa** e dallo **smorzamento** del sistema strutturale.

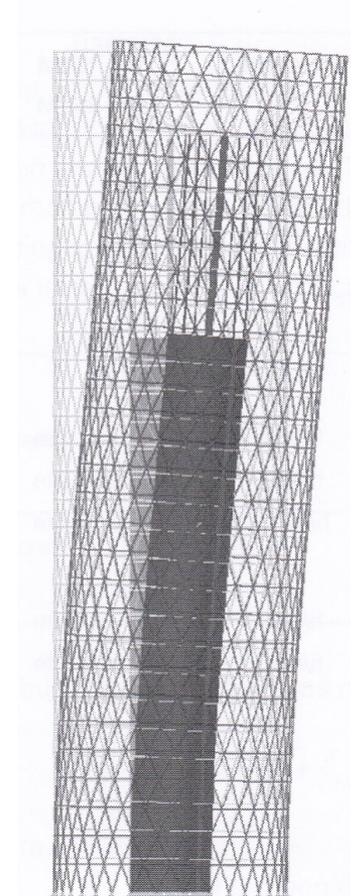
Spostamento massimo in sommità

Oggi gli edifici alti si progettano per uno spostamento elastico massimo di $h/500$ per effetto di un vento con periodo di ritorno di 50 anni. Questo criterio consente di definire la **rigidezza** del sistema strutturale in funzione della **massa** e dello **smorzamento** della costruzione.

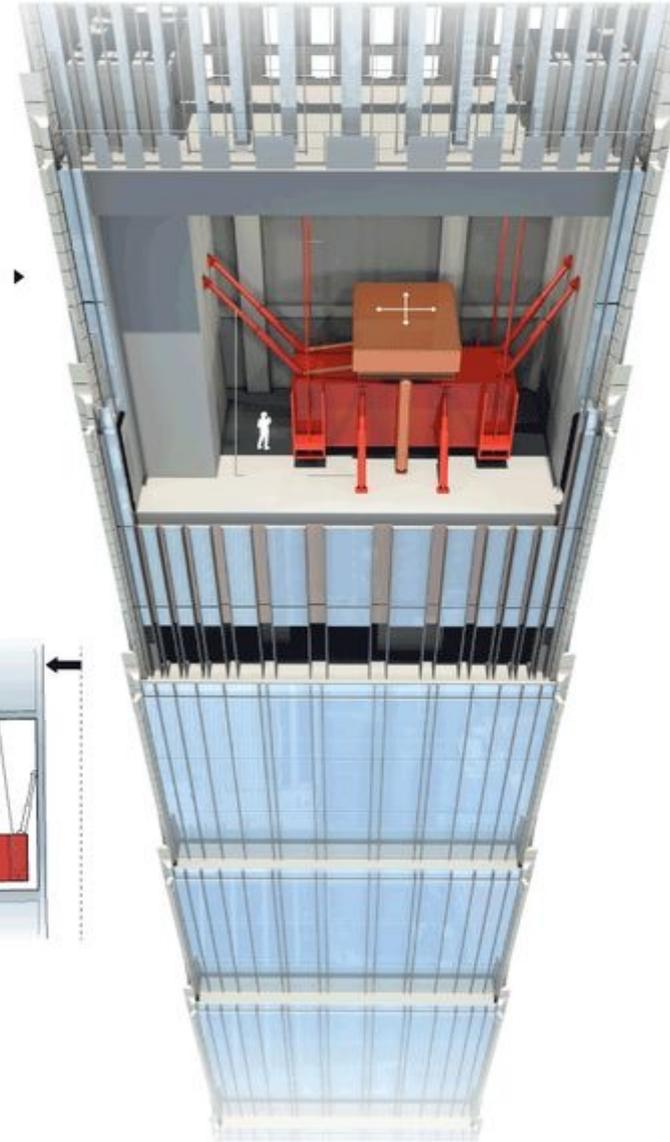
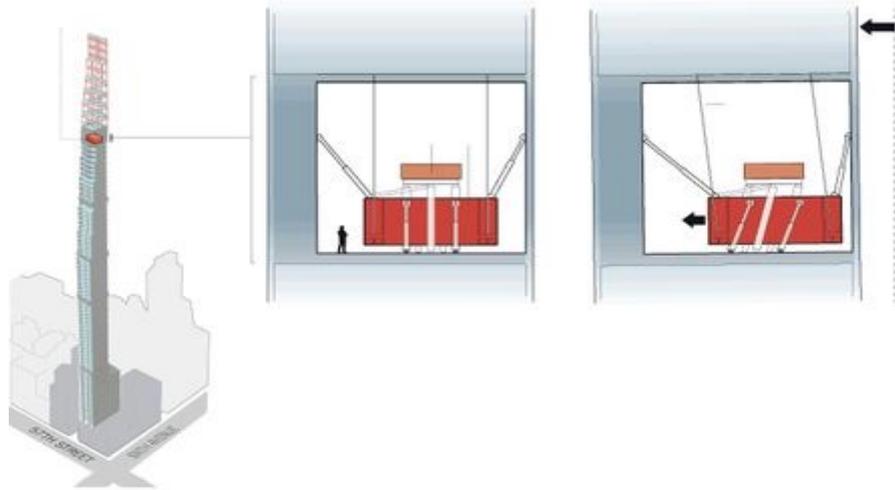
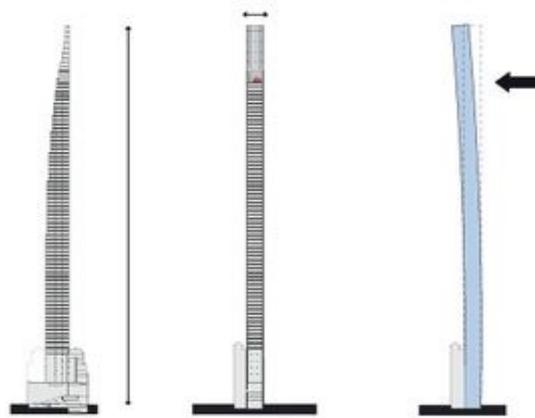
Negli edifici alti, lo spostamento laterale può causare un effetto P- Δ significativo, che può determinare un notevole aumento degli spostamenti e delle sollecitazioni negli elementi resistenti verticali.

Lo smorzamento, cioè la capacità di dissipare energia durante le vibrazioni, ha un ruolo significativo sulla valutazione delle forze di progetto e sull'entità delle accelerazioni indotte dal vento.

Può essere dovuto ai cicli di isteresi dei materiali strutturali e non-strutturali, agli effetti aeroelastici, alla presenza di specifici elementi dissipativi (dissipazione supplementare). Questi ultimi possono essere convenientemente utilizzati per ridurre l'accelerazione e garantire condizioni di maggiore benessere e comodità.



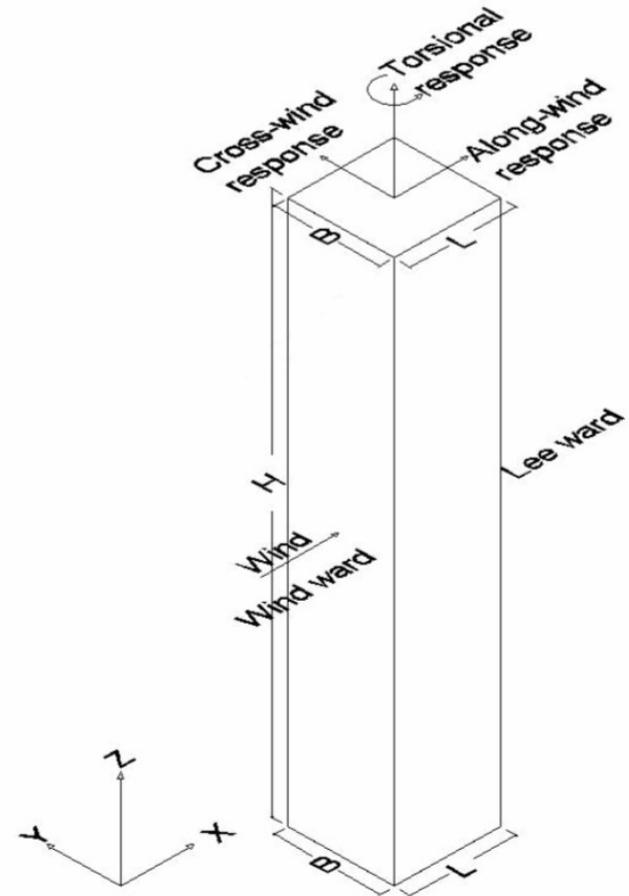
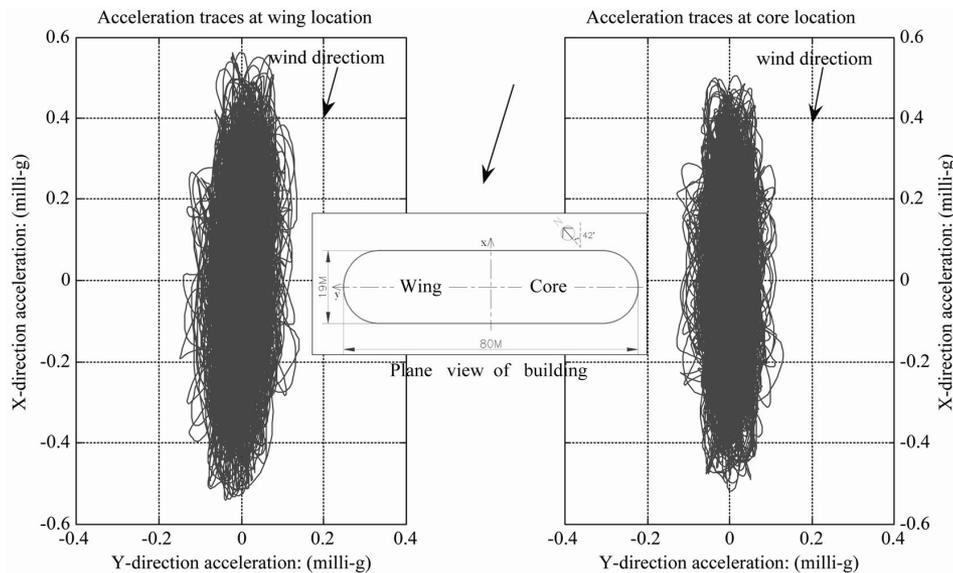
Dissipazione supplementare



Accelerazione

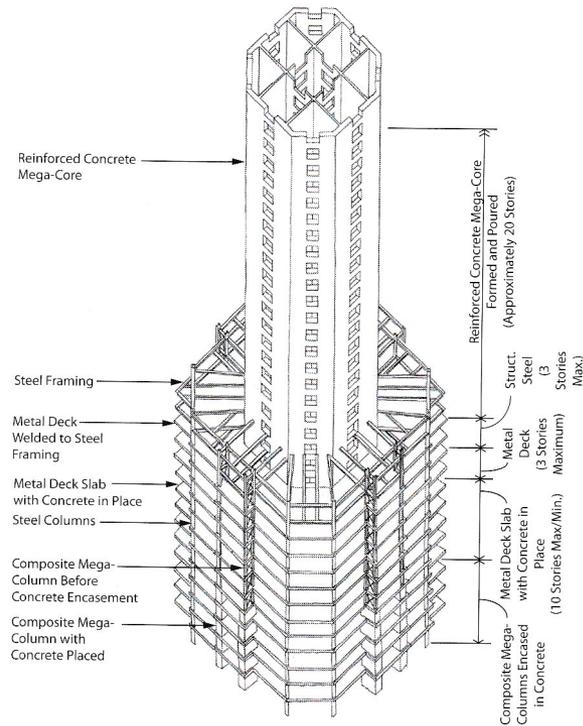
Un edificio alto può non essere utilizzabile se l'accelerazione indotta dal vento supera una certa soglia. Di solito le accelerazioni trasversali alla direzione del vento sono maggiori di quelle longitudinali. La percezione del moto rispetto agli edifici vicini, soprattutto nel caso di moti torsionali, può creare disagio e anche nausea. Il limite accettabile di velocità torsionale è pari a 3,0 milli-radiani/sec, mentre i limiti di accelerazione percettibile sono espressi in funzione del periodo di ritorno del vento come segue:

Occupancy type	Horizontal accelerations return wind period	
	1 year	10 year
Office	10–13 milli-g's	20–25 milli-g's
Hotel	7–10 milli-g's	15–20 milli-g's
Apartment	5–7 milli-g's	12–15 milli-g's

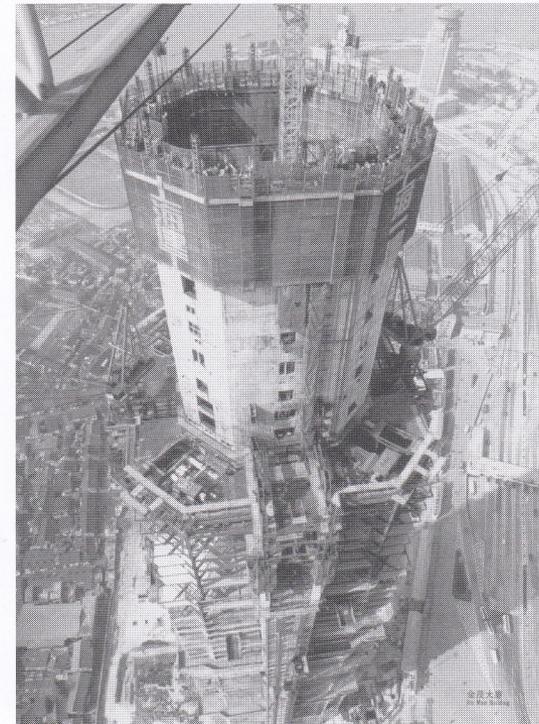


Viscosità, ritiro e accorciamenti elastici

Gli elementi strutturali verticali degli edifici alti sono soggetti ad accorciarsi a causa dei notevoli carichi sopportati. Il processo di accorciamento inizia all'atto della costruzione e può continuare per lungo tempo. Questi spostamenti possono influenzare gli elementi non strutturali e gli impianti. Tuttavia questi fenomeni possono essere previsti e i loro effetti possono essere messi in conto durante la sequenza costruttiva.



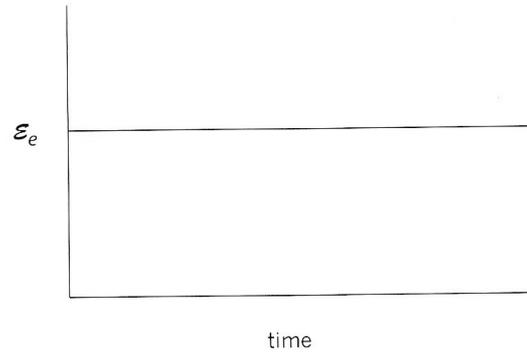
Mixed Use of Structural Materials/Construction Sequence,
Jin Mao Tower, Shanghai, China



Construction Image,
Jin Mao Tower, Shanghai, China

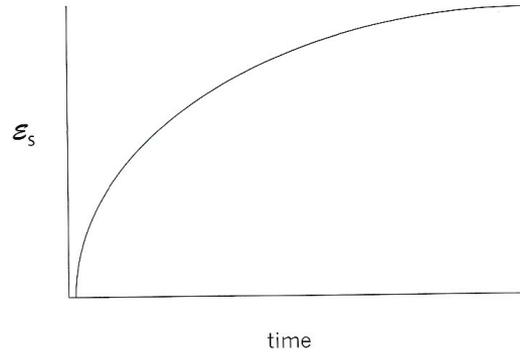
Viscosità, ritiro e accorciamenti elastici

$$\varepsilon_{e_i} = \frac{P_{g_i}}{A_{t_i} E_{c_i}} + \varepsilon_{e_{i-1}}$$



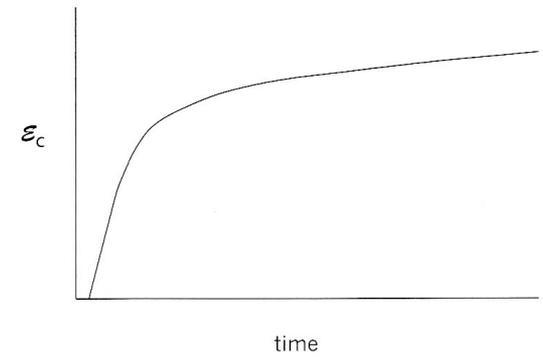
Deformazioni elastiche

$$\varepsilon_{e_i} = (\varepsilon_{s_i w} - \varepsilon_{s_{i-1} w}) R_{cf_i} + \varepsilon_{e_{i-1}}$$



Deformazioni da ritiro

$$\varepsilon_{c_{(i-1) \rightarrow ij}} = (\varepsilon_{c_i w_j} - \varepsilon_{c_{(i-1) w_j}}) R_{cf_i}$$

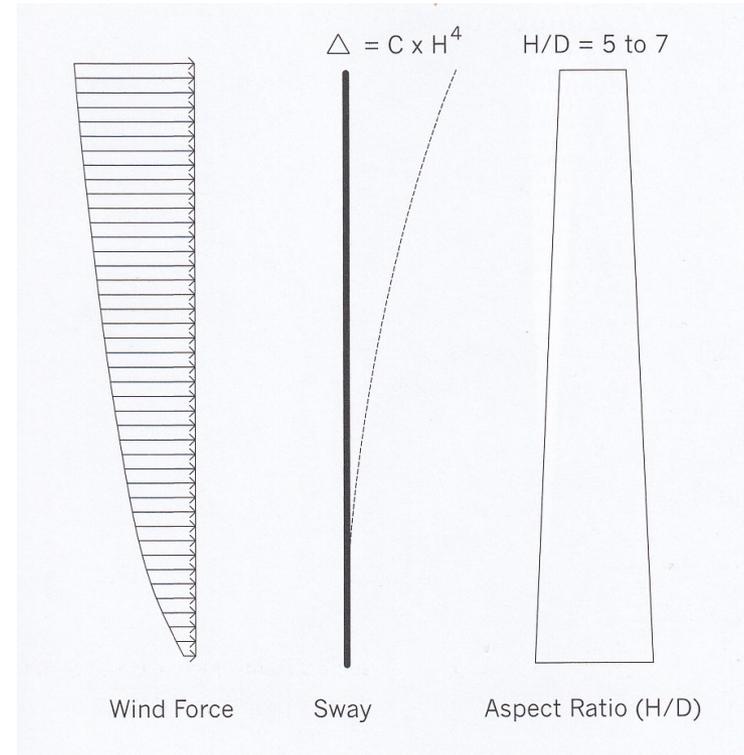


Deformazioni viscosi

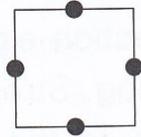
Rapporto tra altezza e larghezza (snellezza)

Quando il sistema strutturale è posto sul perimetro di un edificio alto, il rapporto ottimale tra altezza e larghezza varia tra 6 e 8. Per rapporti maggiori è opportuno ricorrere a dispositivi per la dissipazione di energia per ridurre l'ampiezza delle oscillazioni indotte dal vento. Per i nuclei irrigidenti centrali (*core*) il rapporto può anche essere pari a 15.

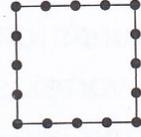
Building	Height	Aspect Ratio (height/width)	Material
Willis Tower (formerly Sears Tower)	445 m	6.4	Steel
Jin Mao Tower	421 m	7.0	Mixed
Amoco Building	346 m	6.0	Steel
John Hancock	344 m	6.6	Steel



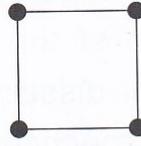
50%



50%



67%



100%

Efficienza del posizionamento del sistema strutturale

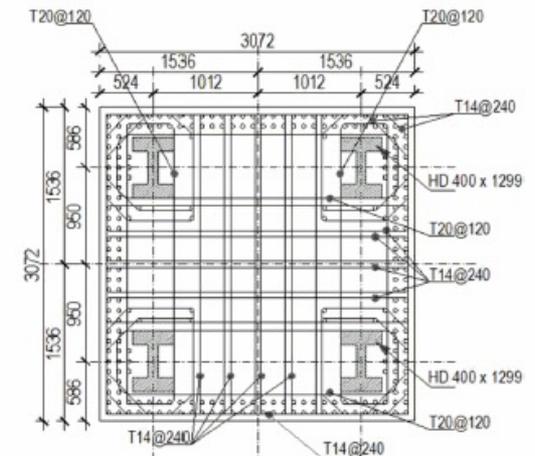
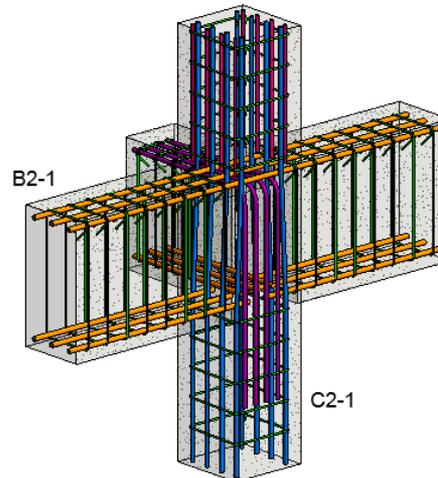
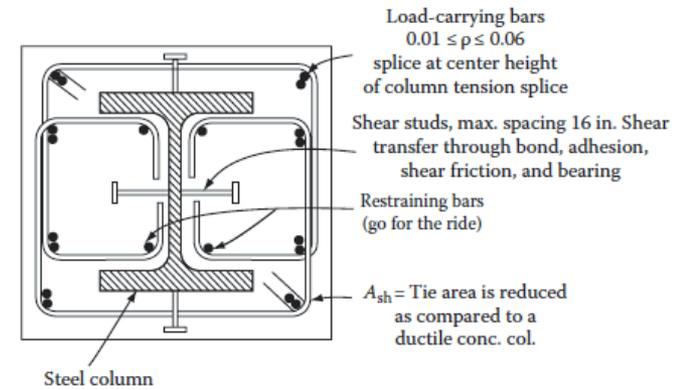
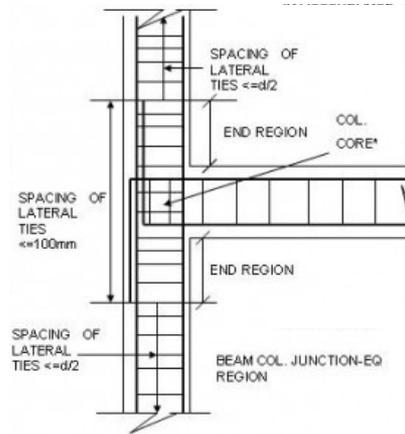
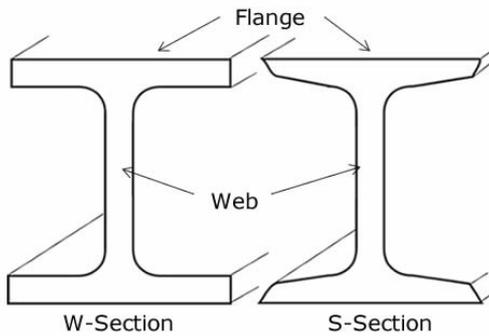
Jinao Tower – Nanjing – China (h = 231 m - 2013)



Materiali e sistemi strutturali

I fattori più importanti che devono essere considerati nella scelta del materiale e del sistema strutturale per un edificio alto riguardano la *sicurezza*, il *comfort* e il *costo*. I materiali che possono essere utilizzati sono:

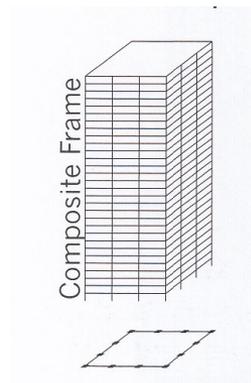
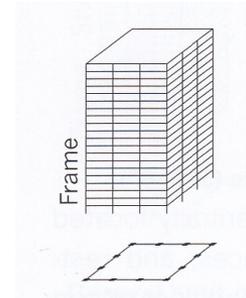
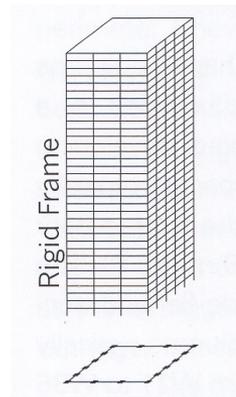
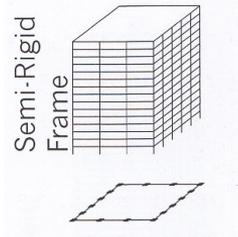
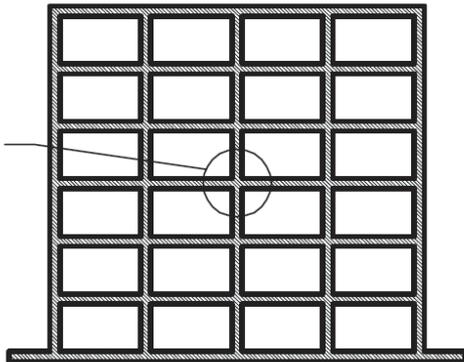
- acciaio strutturale,
- conglomerato cementizio armato, generalmente ad alta resistenza
- sistemi compositi acciaio-calcestruzzo



Telai rigidi e semi-rigidi

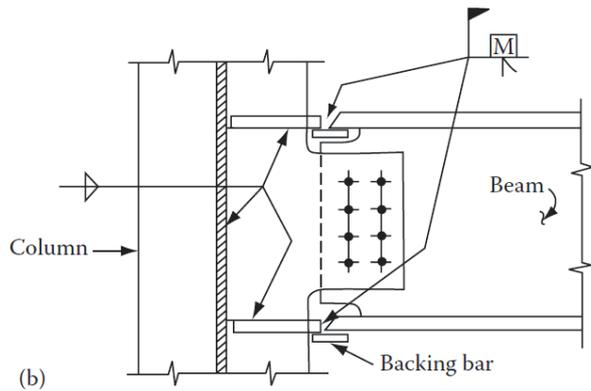
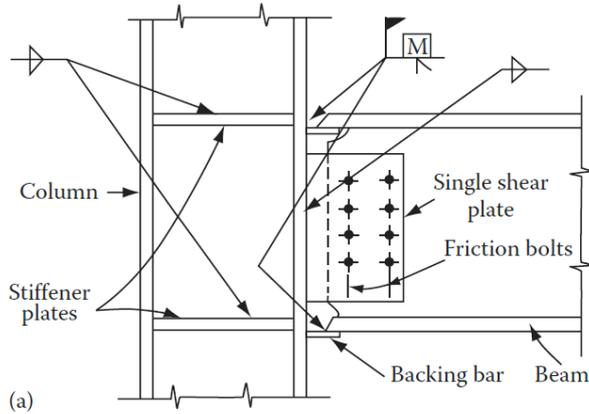
Un telaio è costituito da travi e colonne collegate tra loro con giunti rigidi o semi-rigidi in grado di ripartire il momento flettente determinato dalle azioni esterne.

Tipo	Limite del numero di piani	Limite di altezza (m)	Connessioni	Altezza d'interpiano (m)	Interasse colonne (m)
Telaio in acciaio a nodi semi-rigidi	15	62	Parzialmente rigide	4,50	$4,50 < i < 9,00$
Telaio in acciaio a nodi rigidi	35	142	Rigide	4,50	$4,50 < i < 9,00$
Telaio in calcestruzzo armato	20	66,8	Rigide	3,20	$4,50 < i < 9,00$
Telaio composito	30	122	Rigide	4,00	$4,00 < i < 8,00$

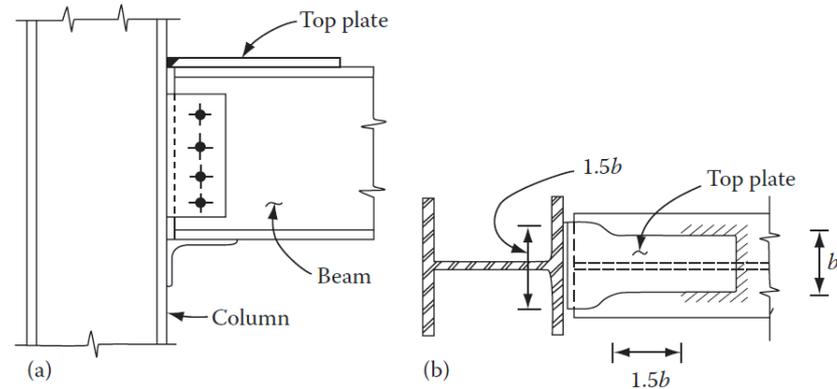


Connessioni rigide e semi-rigide

Per sistemi strutturali in acciaio, i collegamenti possono essere realizzati o con bulloni ad attrito ad alta resistenza, o mediante saldature, o mediante bullonatura/saldatura.



Connessione rigida



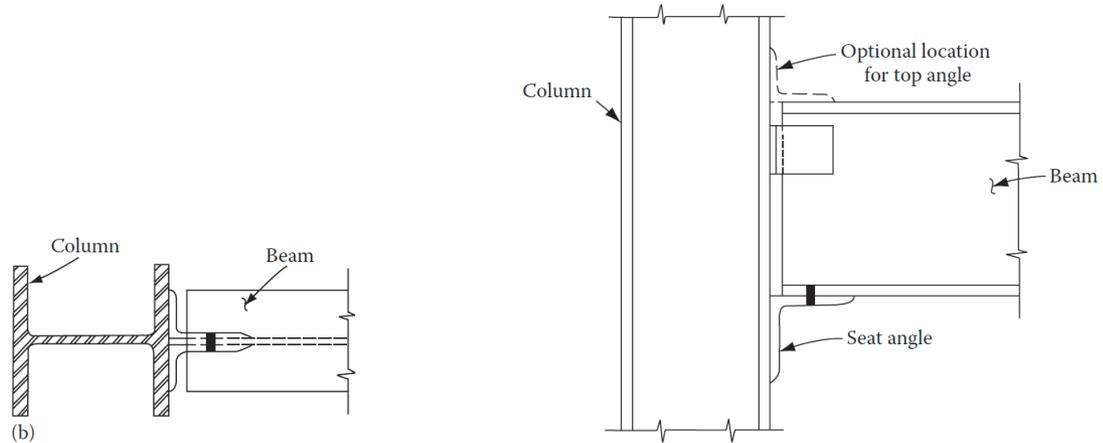
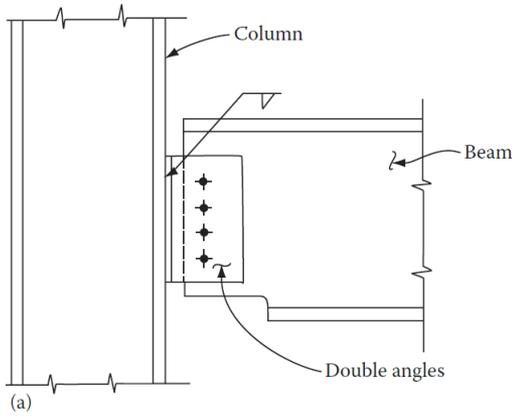
Connessione semi-rigida

La resistenza del telaio alle azioni laterali dipende da come nei nodi viene ripartito il momento flettente tra le colonne e le travi.

Le connessioni parzialmente rigide non sono in grado di impedire completamente la rotazione relativa tra trave e colonna. In questo caso è ridotta anche la capacità di trasferire il momento tra travi e pilastri, ma il telaio mantiene una certa resistenza alle azioni orizzontali.

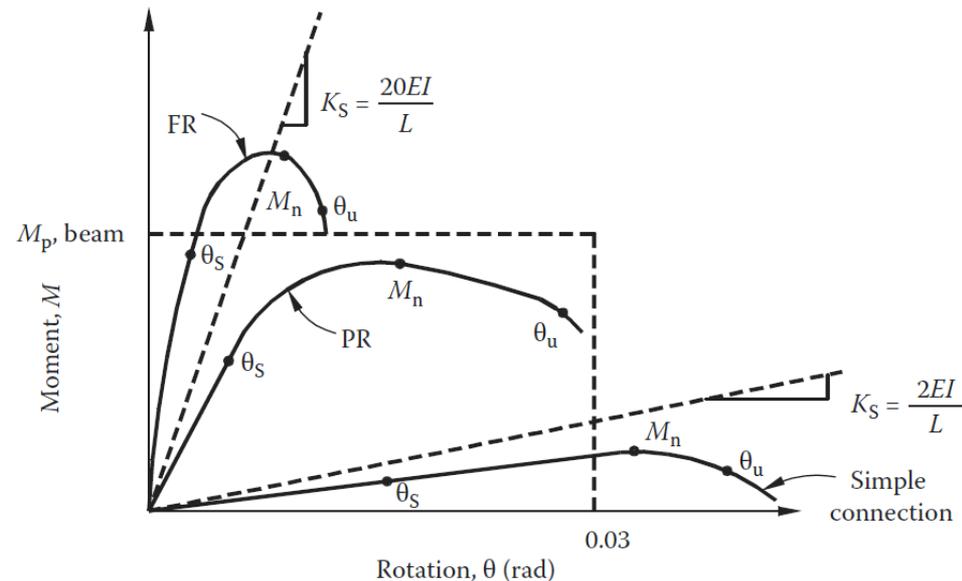
Connessioni semplici

Quando la capacità di trasferire il momento è minima, il comportamento della connessione è molto simile a quello di un semplice appoggio, che può solo trasmettere lo sforzo di taglio e lo sforzo assiale. Le figure seguenti mostrano due esempi di connessioni semplici.



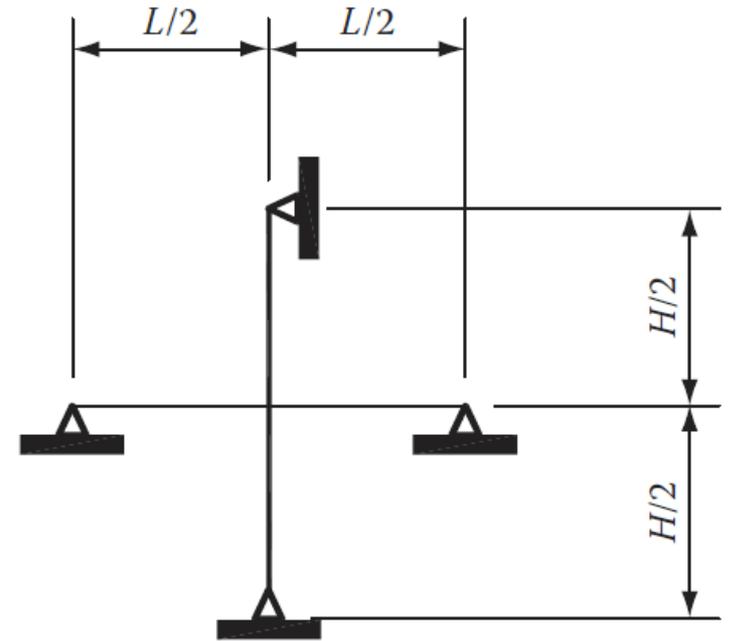
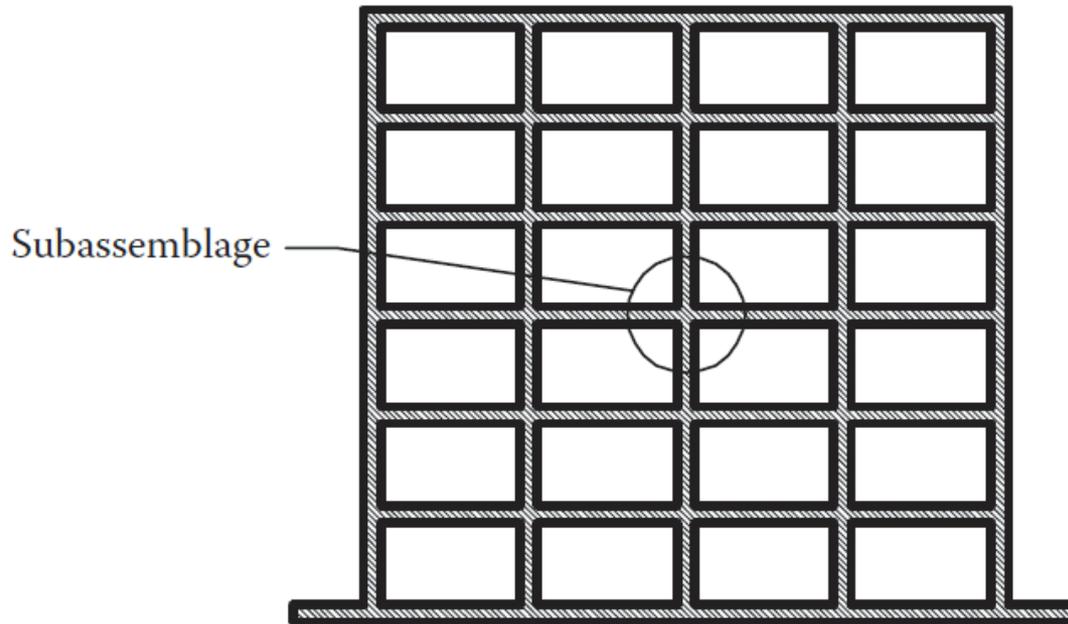
In generale, le connessioni sono caratterizzate dalla resistenza e dalla duttilità, specificate dal legame momento-rotazione.

Per le connessioni parzialmente rigide tali legami, che devono essere inclusi nell'analisi strutturale, sono disponibili in diversi database.



Comportamento strutturale di telai rigidi e semi-rigidi

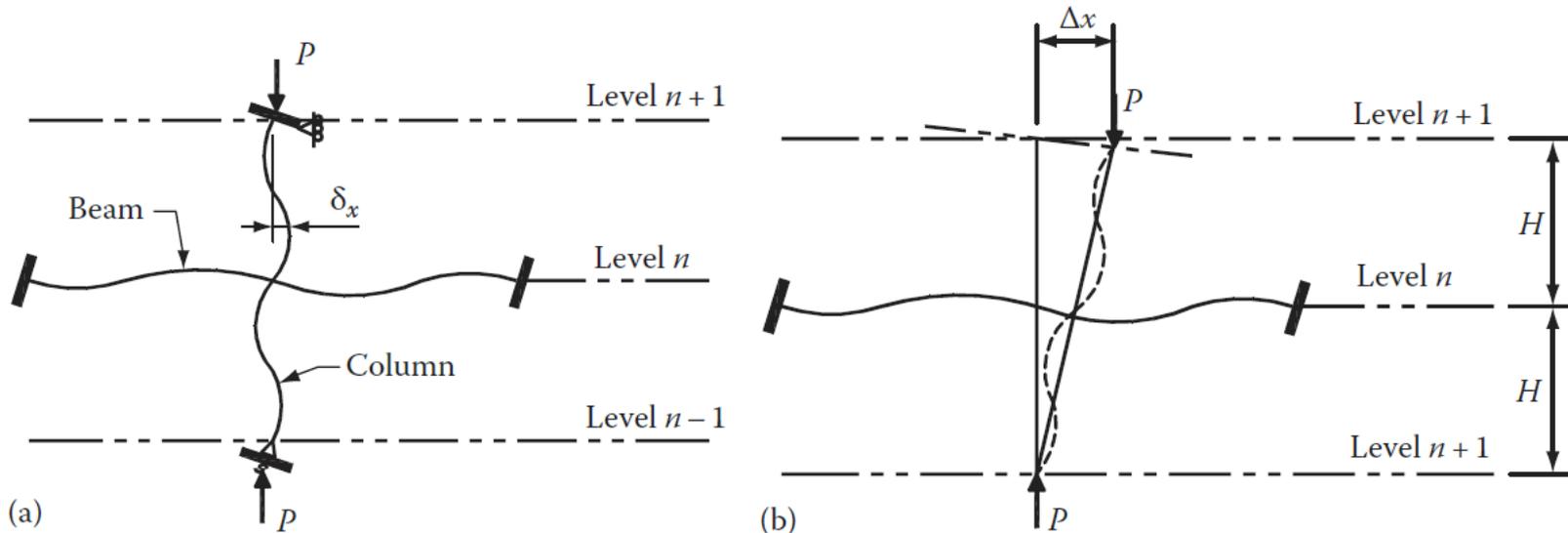
Il comportamento strutturale del telaio può essere evidenziato osservando la ripartizione dello sforzo assiale e del momento flettente tra le travi e le colonne collegate in un nodo.



Rotazione di un nodo e ripartizione dei momenti

Se il telaio è a nodi fissi, cioè se lo spostamento laterale è impedito, il momento flettente si ripartisce tra i quattro elementi convergenti in proporzione della loro rigidezza flessionale, mentre lo sforzo assiale, prevalentemente dovuto agli sforzi di taglio trasmessi dalle travi, è sostenuto solo dalle colonne. La presenza dello sforzo normale nelle colonne provoca anche un incremento del loro momento flettente a causa dell'effetto $P-\delta$.

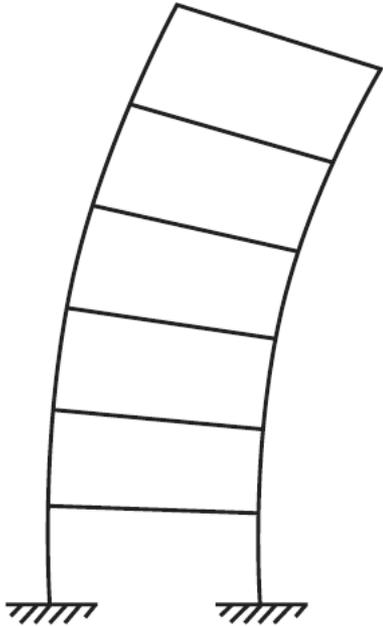
Se il telaio è a nodi spostabili, cioè se lo spostamento laterale non è impedito, l'effetto di amplificazione del momento flettente nelle colonne è ancora maggiore, a causa dell'effetto $P-\Delta$.



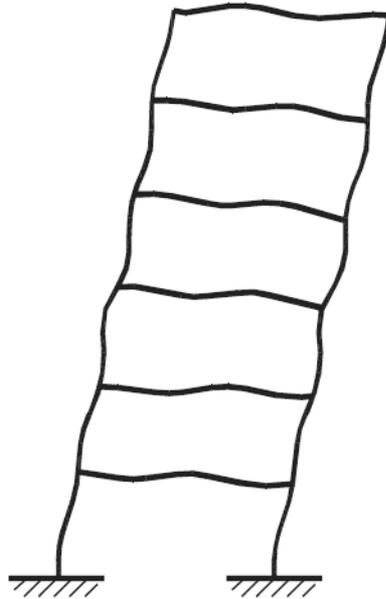
La crisi del collegamento può essere dovuta o alla rottura del materiale o all'instabilità del nodo, o all'instabilità della colonna. L'analisi strutturale richiede il calcolo delle sollecitazioni dovute ai carichi gravitazionali e laterali, il calcolo dello spostamento laterale d'interpiano, la verifica di stabilità.

Spostamenti laterali

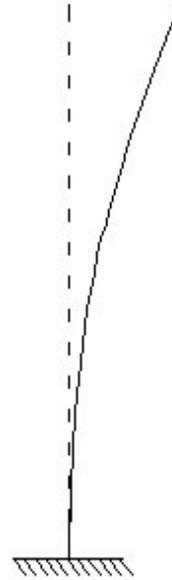
Lo spostamento laterale di un telaio può essere pensato come somma di due componenti, simili a quelli che si verificano in una trave prismatica a mensola. Una componente è dovuta alla deformazione flessionale, mentre l'altra alla deformazione tagliante. Al contrario di quanto accade per le travi prismatiche, per i telai la deformazione tagliante (70%) è predominante rispetto a quella flessionale (30%), specialmente nel caso di telai non troppo alti.



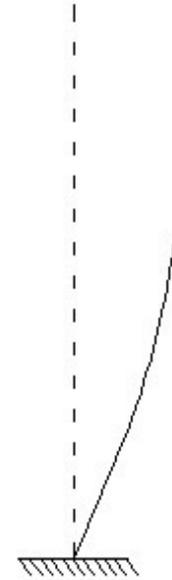
*Deformazione
flessionale (30%)*



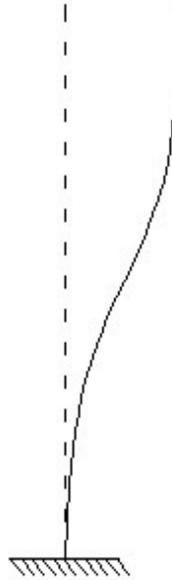
*Deformazione
tagliante (70%)*



*Deformazione
flessionale*



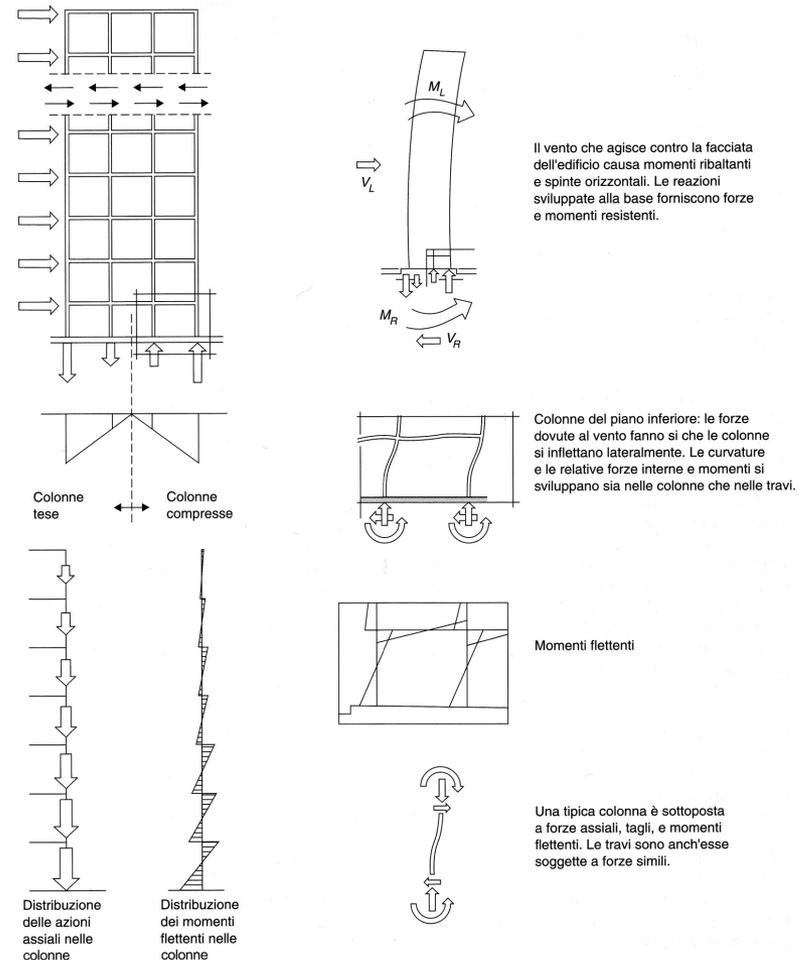
*Deformazione
tagliante*



*Deformazione
complessiva*

Osservazioni

- La **deformazione flessionale** si esplica attraverso la variazione di lunghezza delle colonne, causata dallo sforzo assiale che equilibra il momento ribaltante delle forze orizzontali. Le colonne sopravento si allungano, mentre quelle sottovento si accorciano.
- La **deformazione tagliante** è dovuta alla flessione delle colonne e delle travi. Il taglio di piano si ripartisce tra tutte le colonne del piano e causa lo loro flessione con doppia curvatura e punto di flesso intorno alla mezzeria. Il momento ai nodi si ripartisce anche agli estremi delle travi che si deformano come le colonne.



Le strutture a telaio non sono in generale molto efficienti, perché le azioni orizzontali sono equilibrate prevalentemente dalla flessione degli elementi strutturali e non dallo sforzo assiale. Ciò implica l'impiego di notevoli quantità di materiale, soprattutto nel caso di altezze considerevoli. In tali casi è preferibile ricorrere ad altre tipologie strutturali.

Esempi

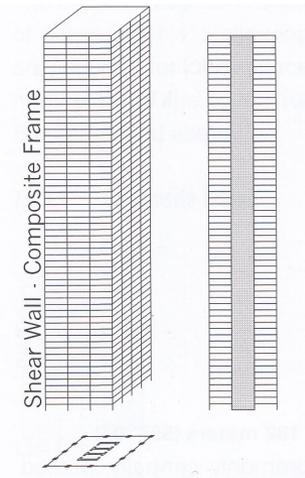
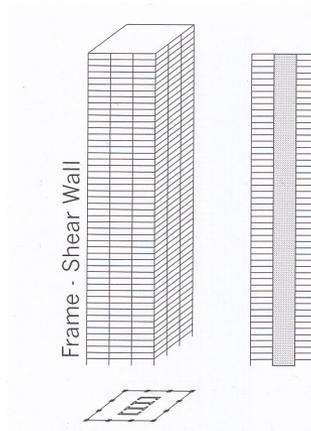
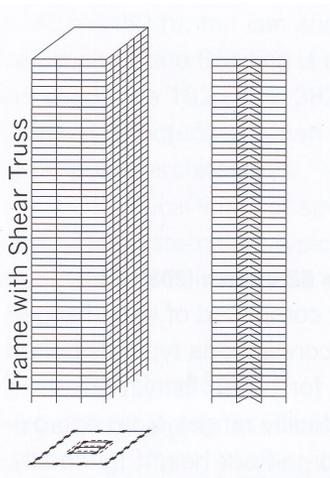


Lever House, New York, 1952

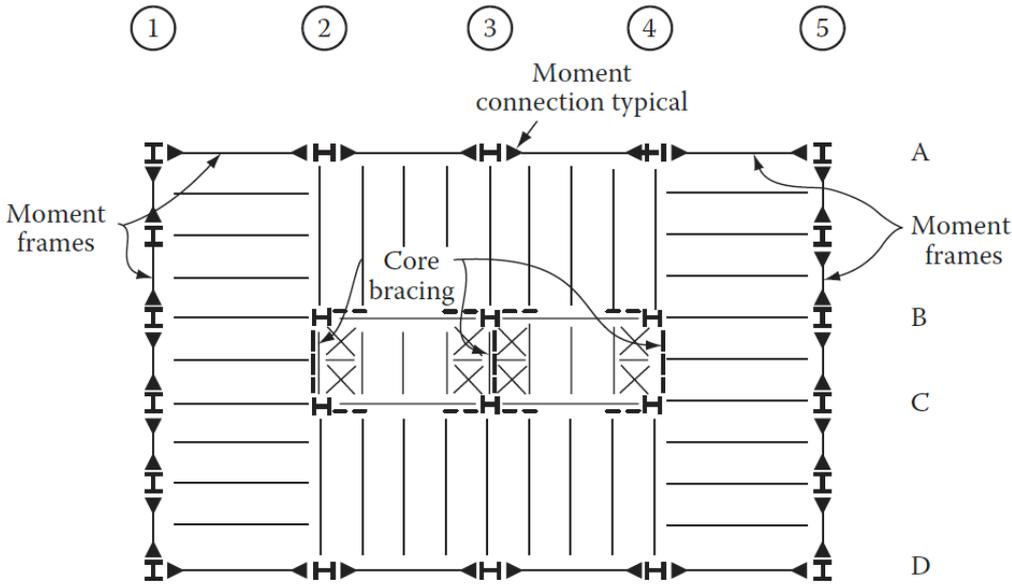
Telai a nodi rigidi con controventi o setti irrigidenti

Oltre a richiedere l'impiego di elementi strutturali di notevoli dimensioni, le strutture a telaio con più di 15 piani presentano spostamenti laterali troppo elevati. In questi casi, l'impiego di controventi o di setti irrigidenti migliora l'efficienza strutturale, minimizzando la flessione nelle colonne e nelle travi e riducendo gli spostamenti orizzontali.

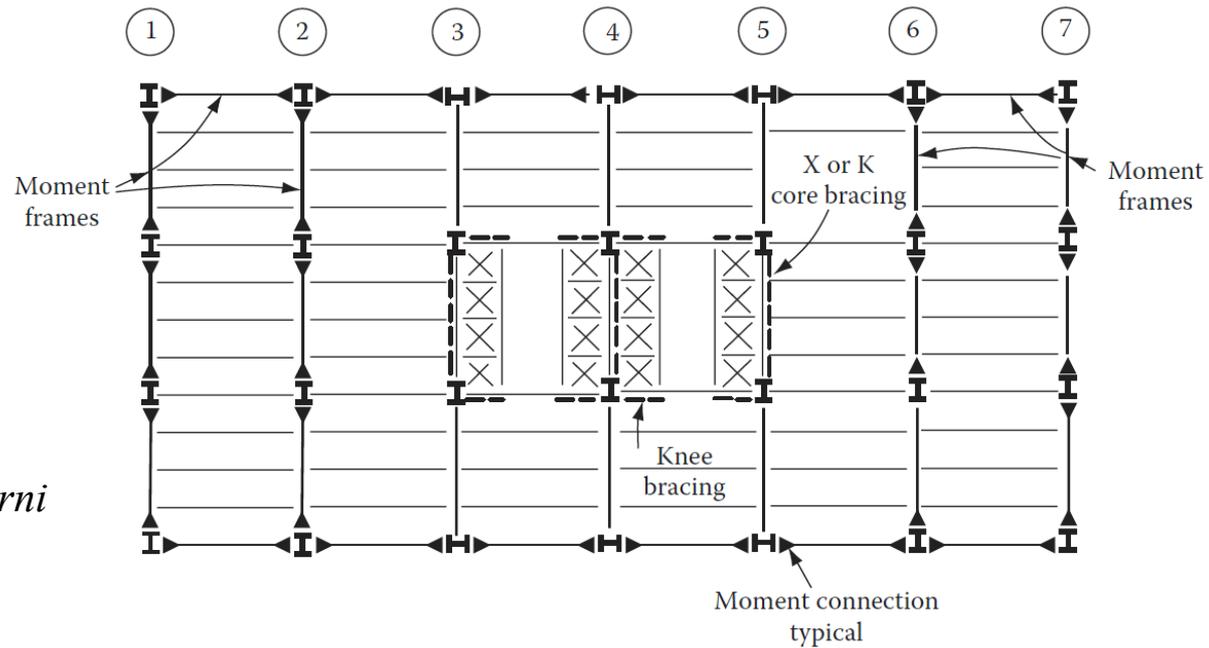
Tipo	Limite del numero di piani	Limite di altezza (m)	Altezza d'interpiano (m)	Interasse colonne (m)
Telai in acciaio a nodi rigidi con controventi	50	200	4,00	$4,50 < i < 9,00$
Telai in calcestruzzo armato con setti irrigidenti	50	160	3,20	$4,50 < i < 9,00$
Telai in composito con setti irrigidenti	60	240	4,00	$4,50 < i < 9,00$



Disposizione in pianta

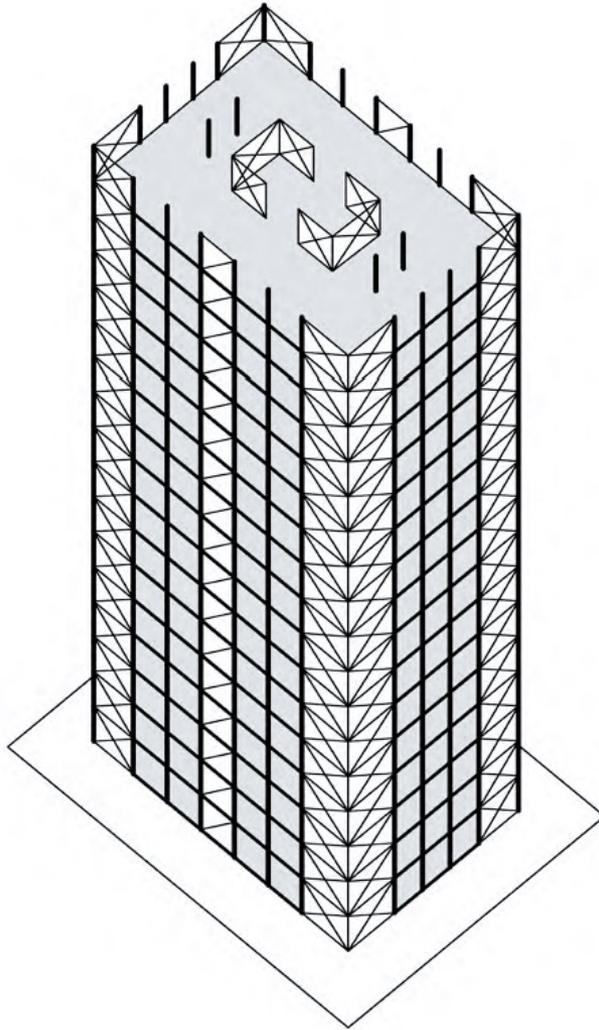


Telai solo perimetrali

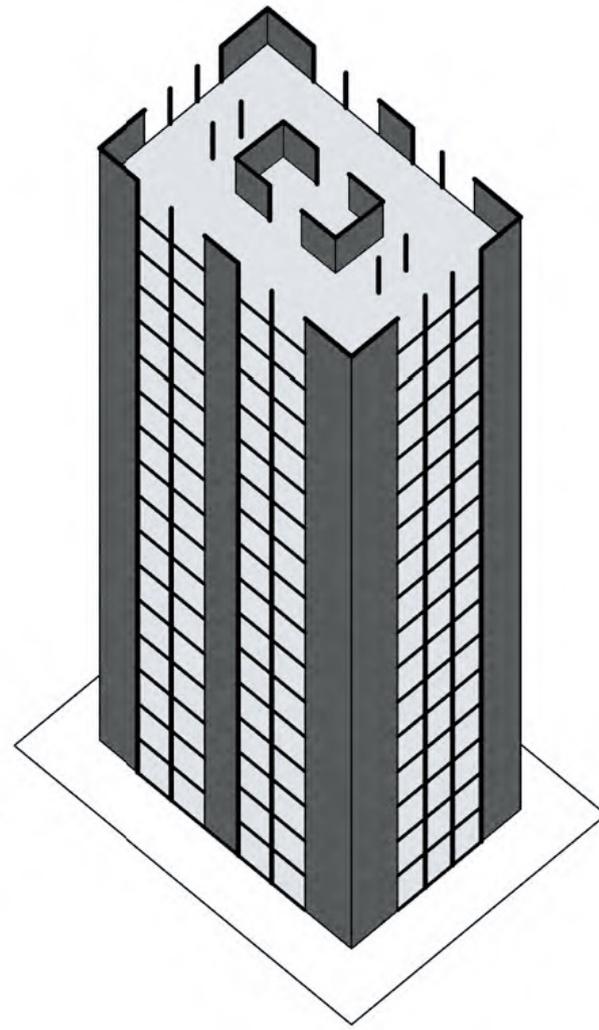


Telai perimetrali e interni

Disposizione ottimale dei controventi



(a)

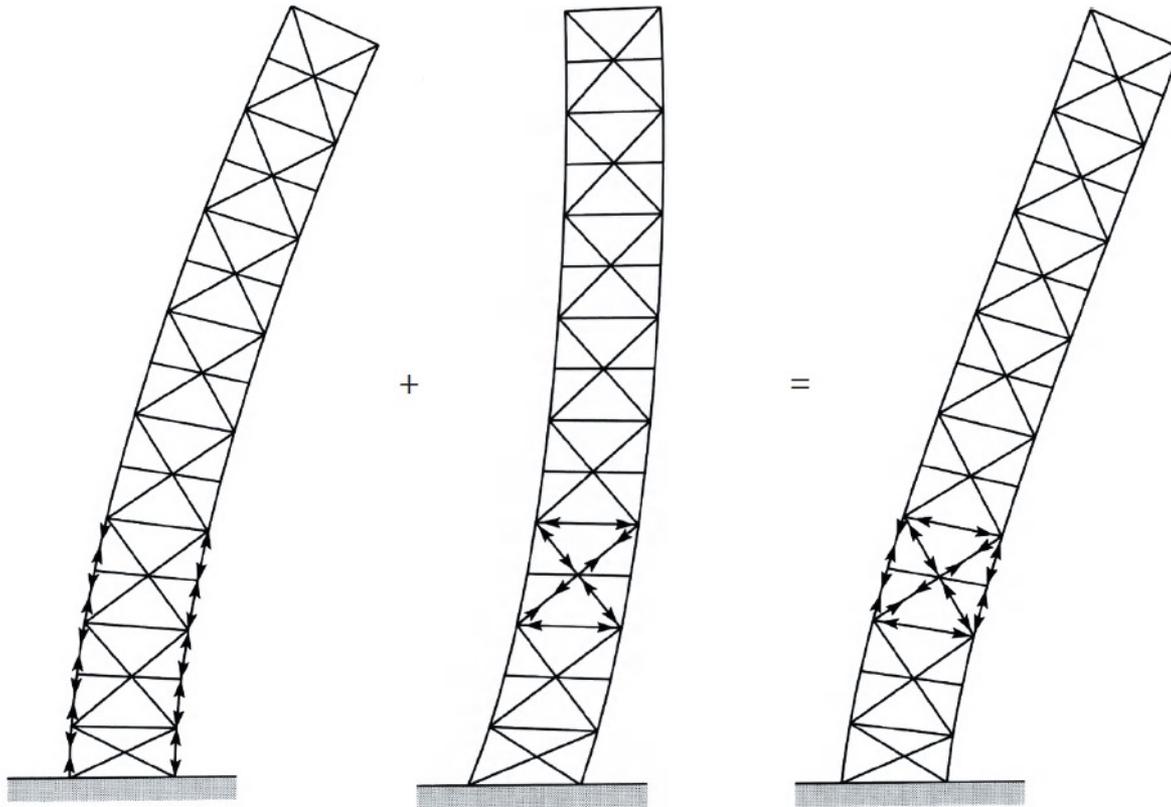


(b)

Comportamento dei controventi

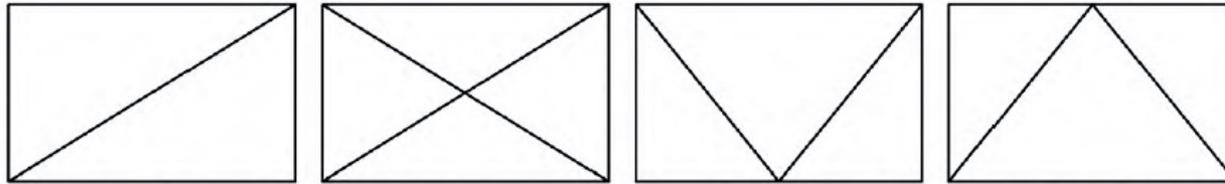
Un controvento può essere considerato come una trave reticolare verticale soggetta a forze orizzontali, in cui le colonne si oppongono al momento ribaltante e gli elementi diagonali allo sforzo di taglio.

Le deformazioni assiali nelle colonne determinano una deformazione di tipo flessionale con la concavità disposta sottovento e massima pendenza in sommità, mentre le deformazioni assiali negli elementi diagonali determinano una deformazione “tipo taglio” con concavità disposta sopravento con massima pendenza alla base.



Tipi di controvento

I controventi possono essere disposti in molti modi, a seconda della necessità di realizzare aperture. I controventi possono essere concentrici o eccentrici.

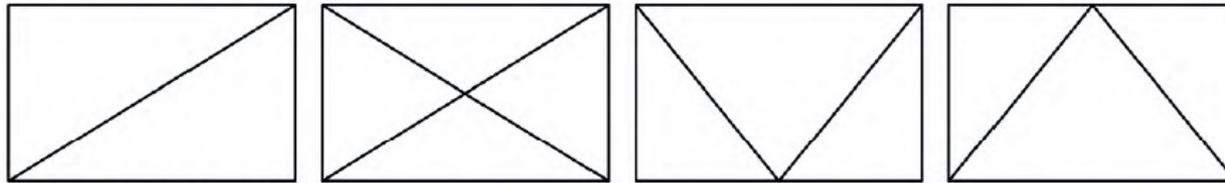


Diagonal-bracing

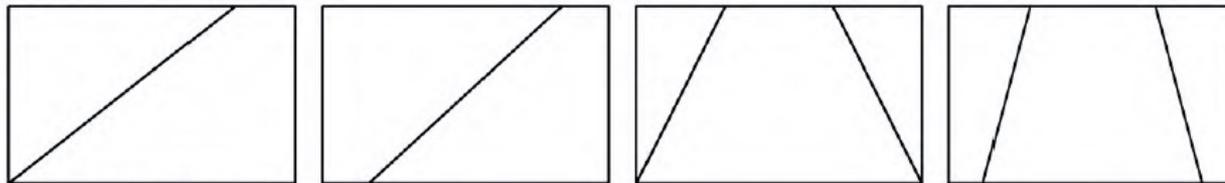
X-bracing

Chevron-bracing (V-bracing)

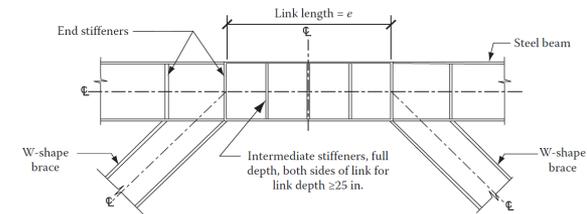
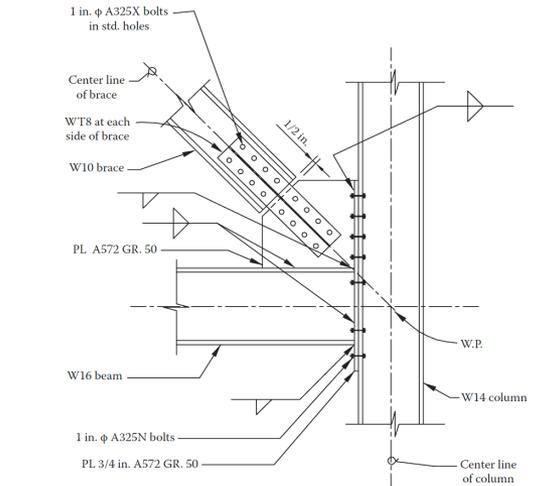
(a)



Concentric-bracing

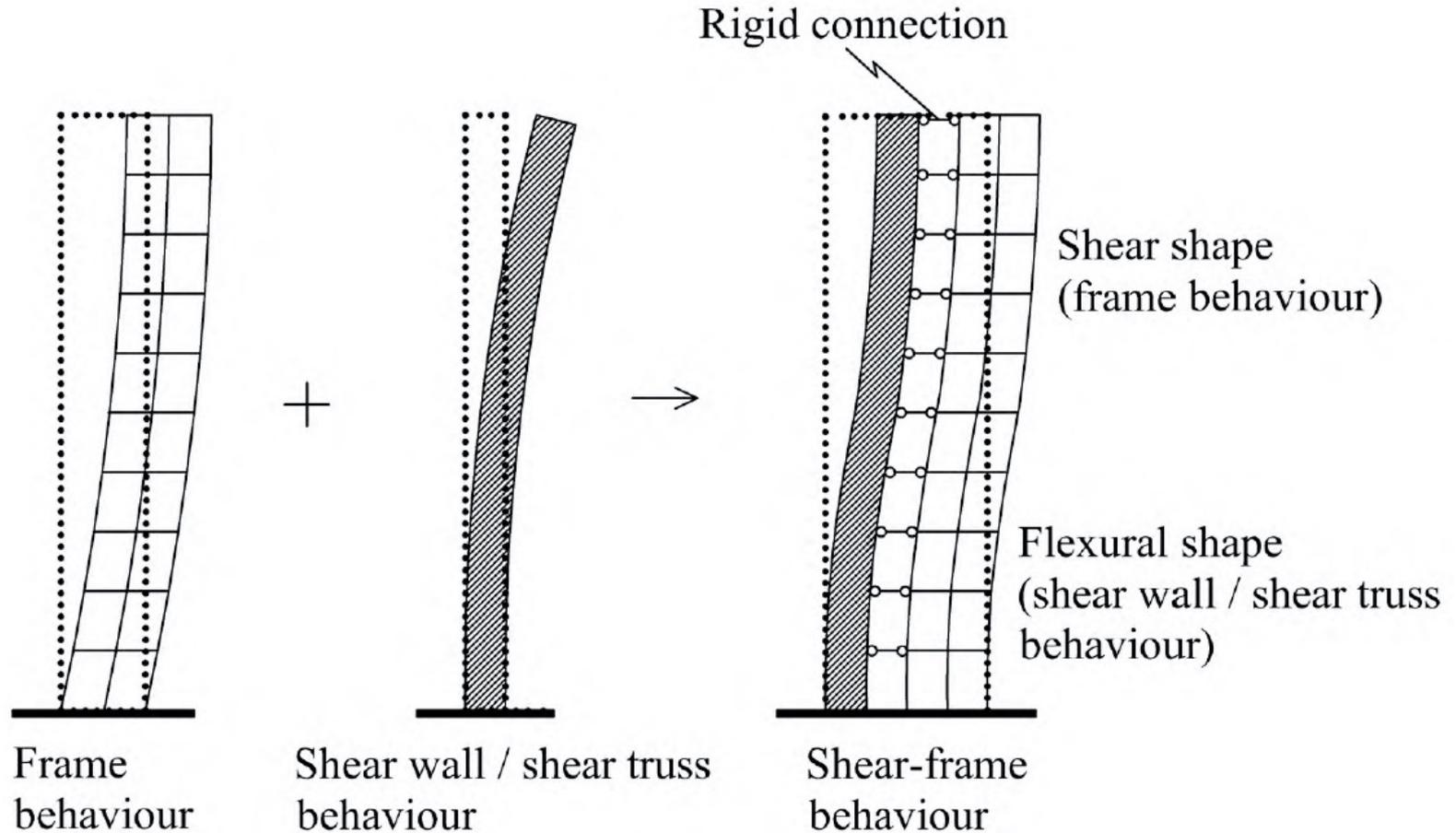


Eccentric-bracing



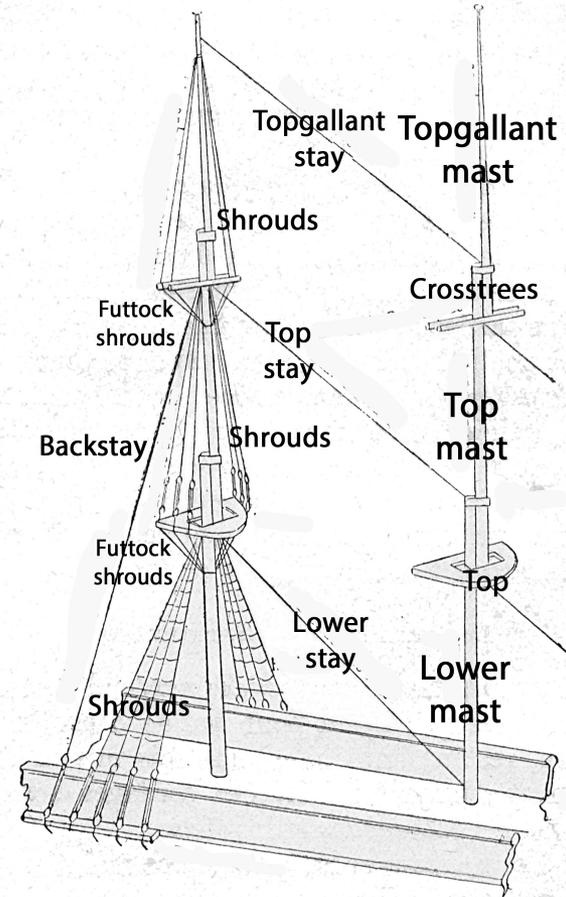
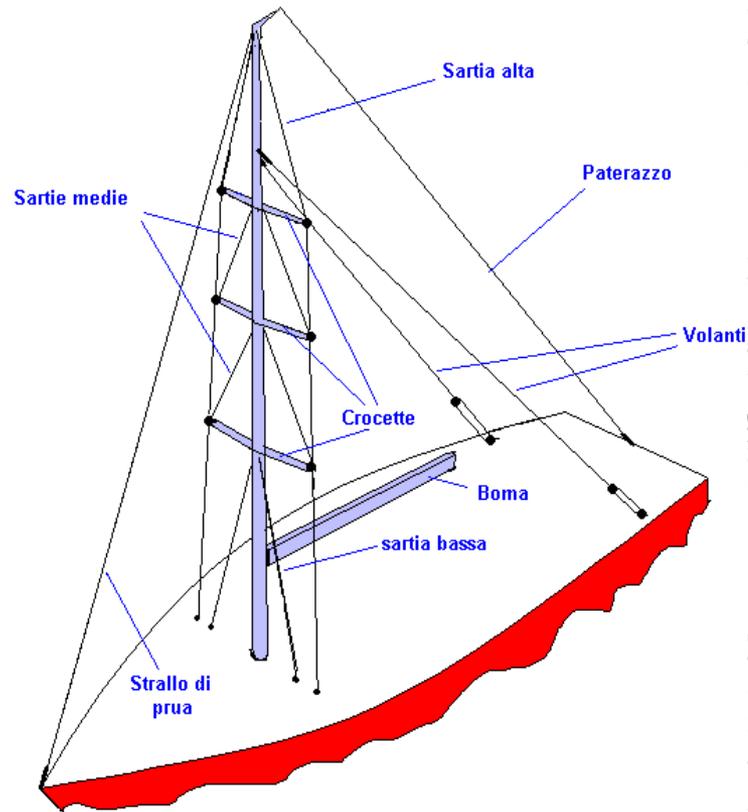
Telai con setti di irrigidimento (shear-walls)

Un setto di irrigidimento si comporta come un controvento. La sua interazione con un telaio a nodi rigidi consente una riduzione complessiva degli spostamenti orizzontali.



Sistemi di stabilizzazione e nuclei di irrigidimento

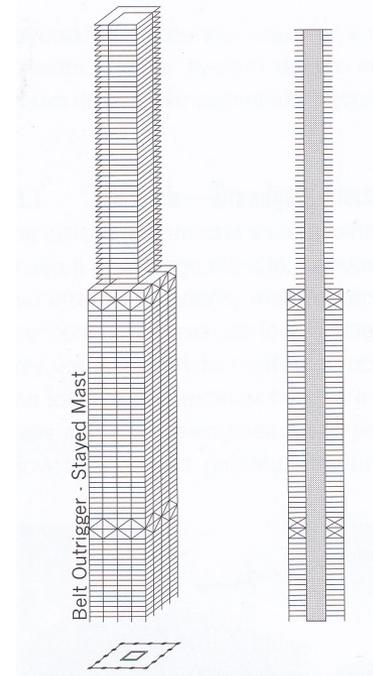
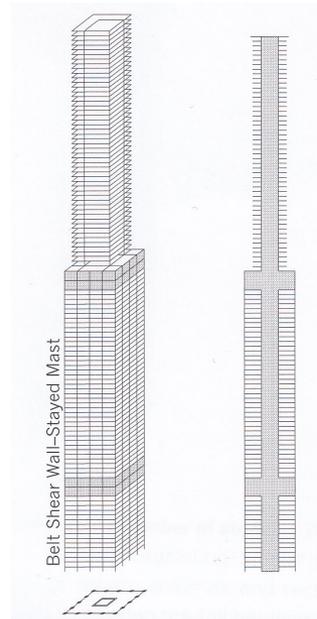
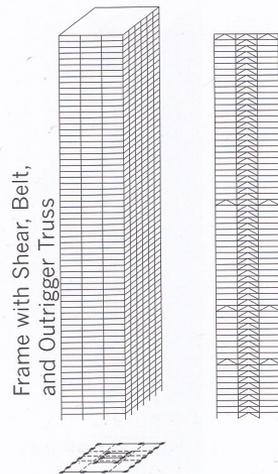
I sistemi di stabilizzazione sono impiegati nella costruzione di edifici alti da circa 40 anni. Tuttavia, come elementi strutturali hanno una storia molto più lunga. Già negli antichi velieri, infatti, gli stabilizzatori sono stati utilizzati per aiutare le vele a resistere alle azioni del vento e consentire, in tal modo l'uso di alberi maestri il più snelli possibili. Collegati alle sartie, gli stabilizzatori riducono notevolmente il momento flettente ribaltante alla base dell'albero.



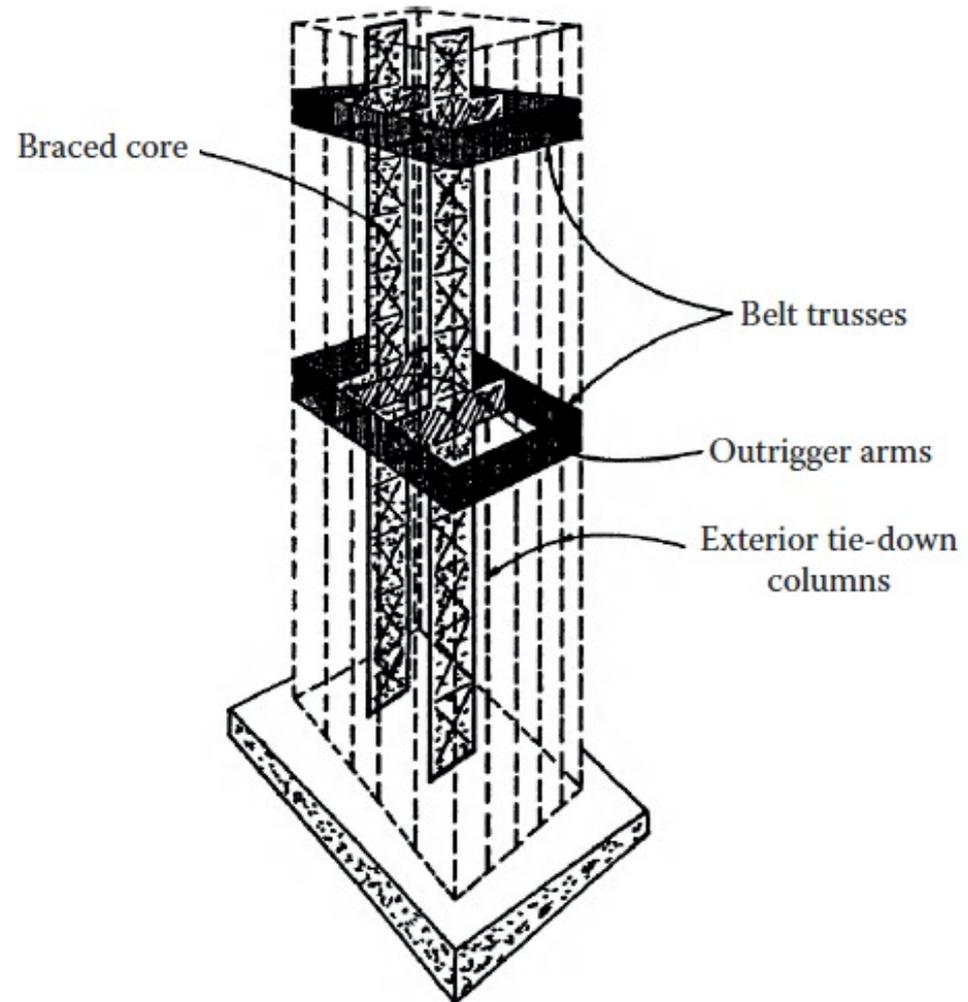
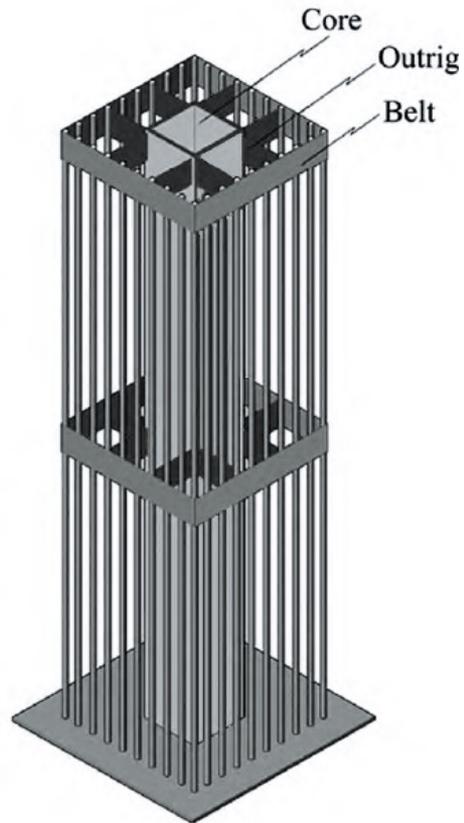
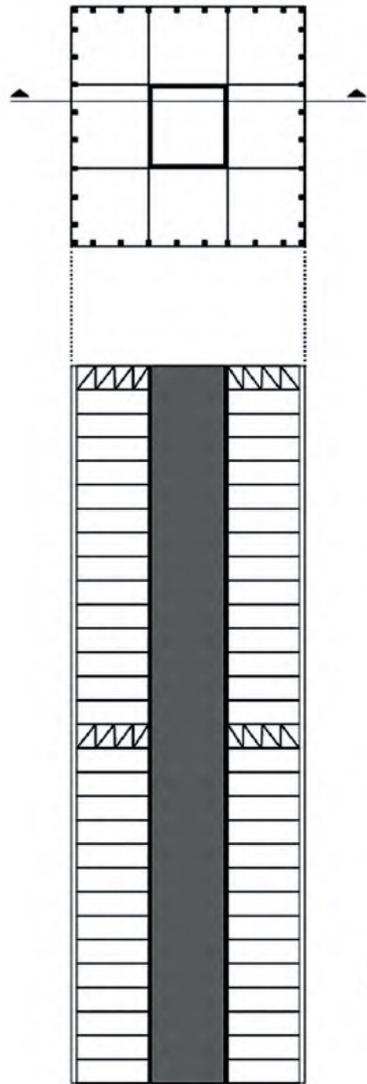
Sistemi di stabilizzazione e nuclei di irrigidimento

Negli edifici alti il nucleo irrigidente svolge il ruolo dell'albero della nave, mentre le colonne perimetrali, collegate al nucleo attraverso i sistemi di stabilizzazione, hanno la funzione delle sartie. Anche in questo caso i sistemi di stabilizzazione e le colonne perimetrali riducono il momento alla base del nucleo. Di solito gli stabilizzatori sono collegati da una trave perimetrale.

Tipo	Limite del numero di piani	Limite di altezza (m)	Altezza d'interpiano (m)
Telai in acciaio con nucleo irrigidente e stabilizzatori	65	260	4,00
Nucleo irrigidente e stabilizzatori in calcestruzzo armato	110	352	3,20
Nucleo irrigidente e stabilizzatori in composito	110	440	4,00

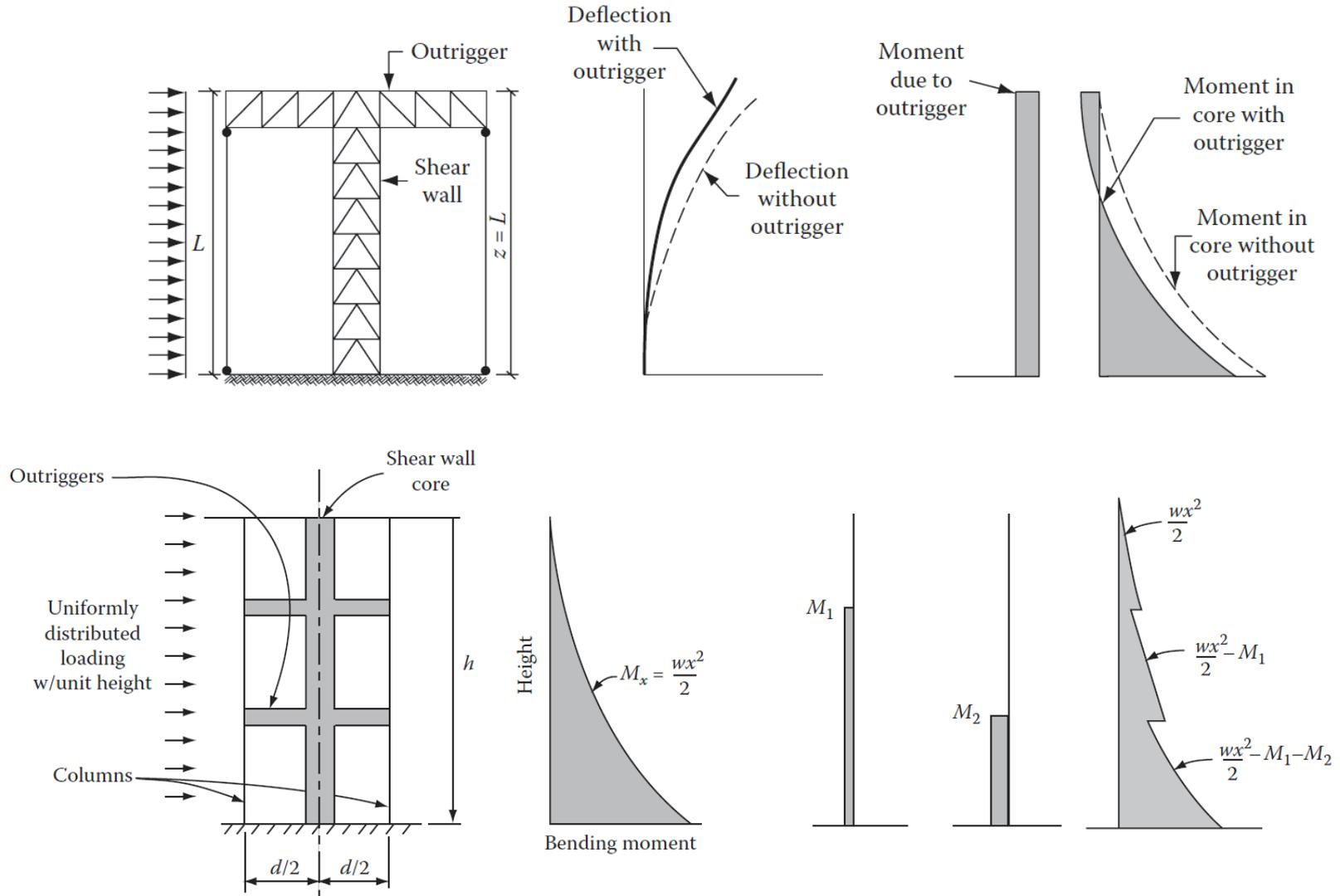


Il sistema strutturale

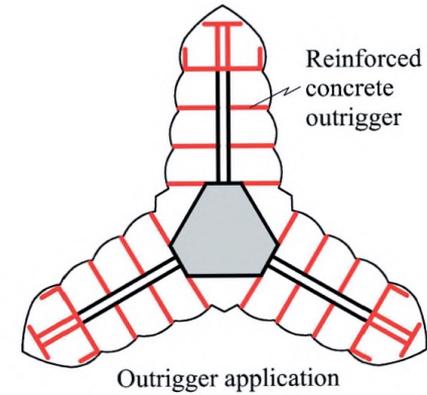
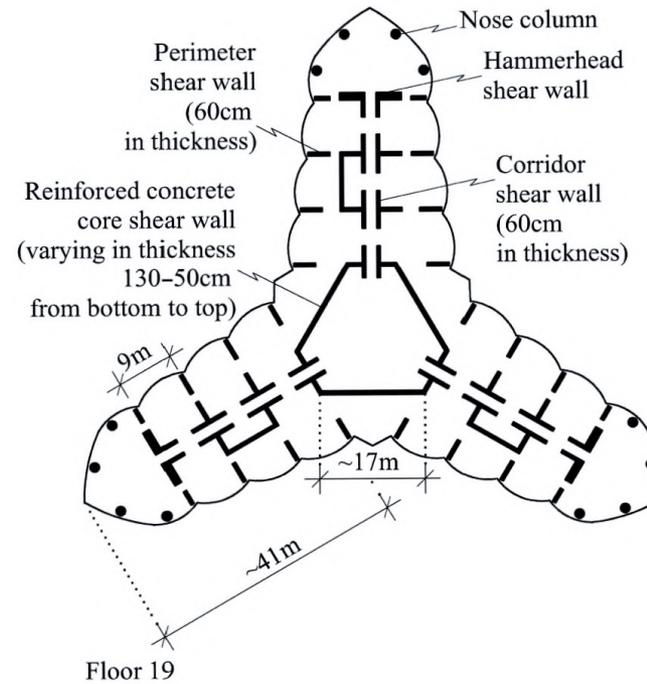


Comportamento strutturale

Il comportamento di un sistema strutturale costituito da un nucleo irrigidente e da stabilizzatori è illustrato nelle seguenti figure.

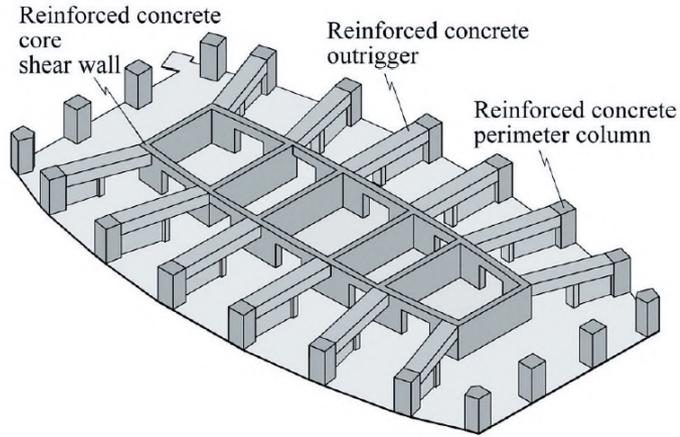


Esempi

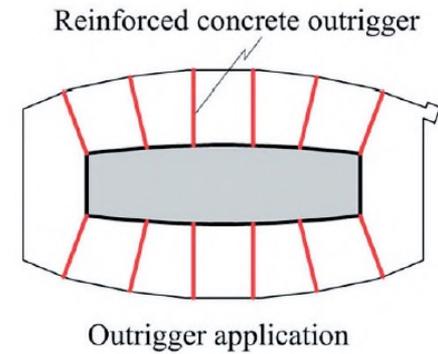
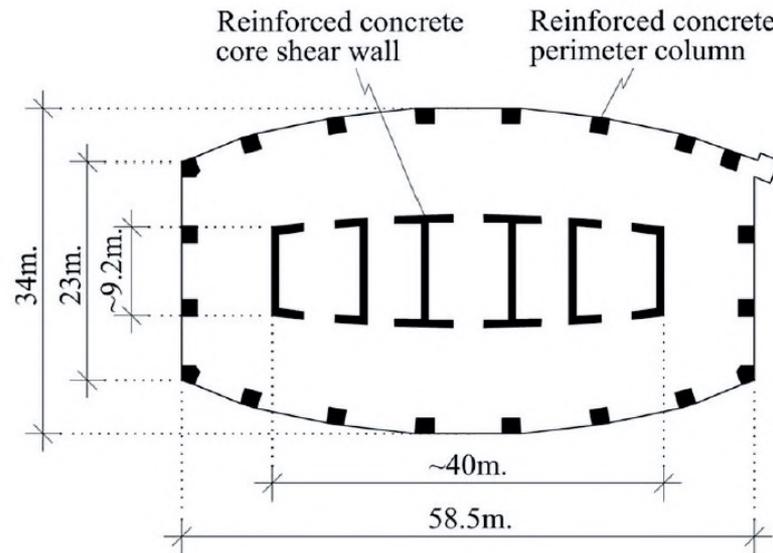


Burj Khalifa, Dubai, 2010

Esempi



Plaza 66, Shanghai 2001

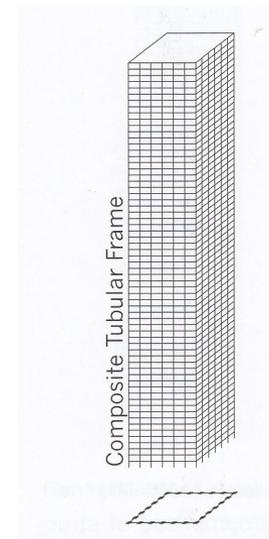
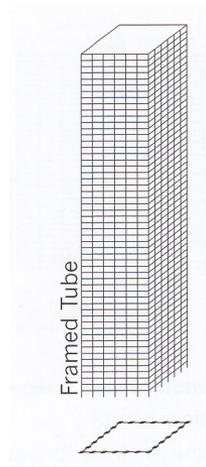
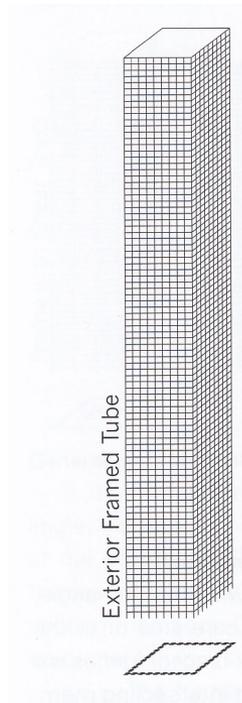


Sistemi a tubo

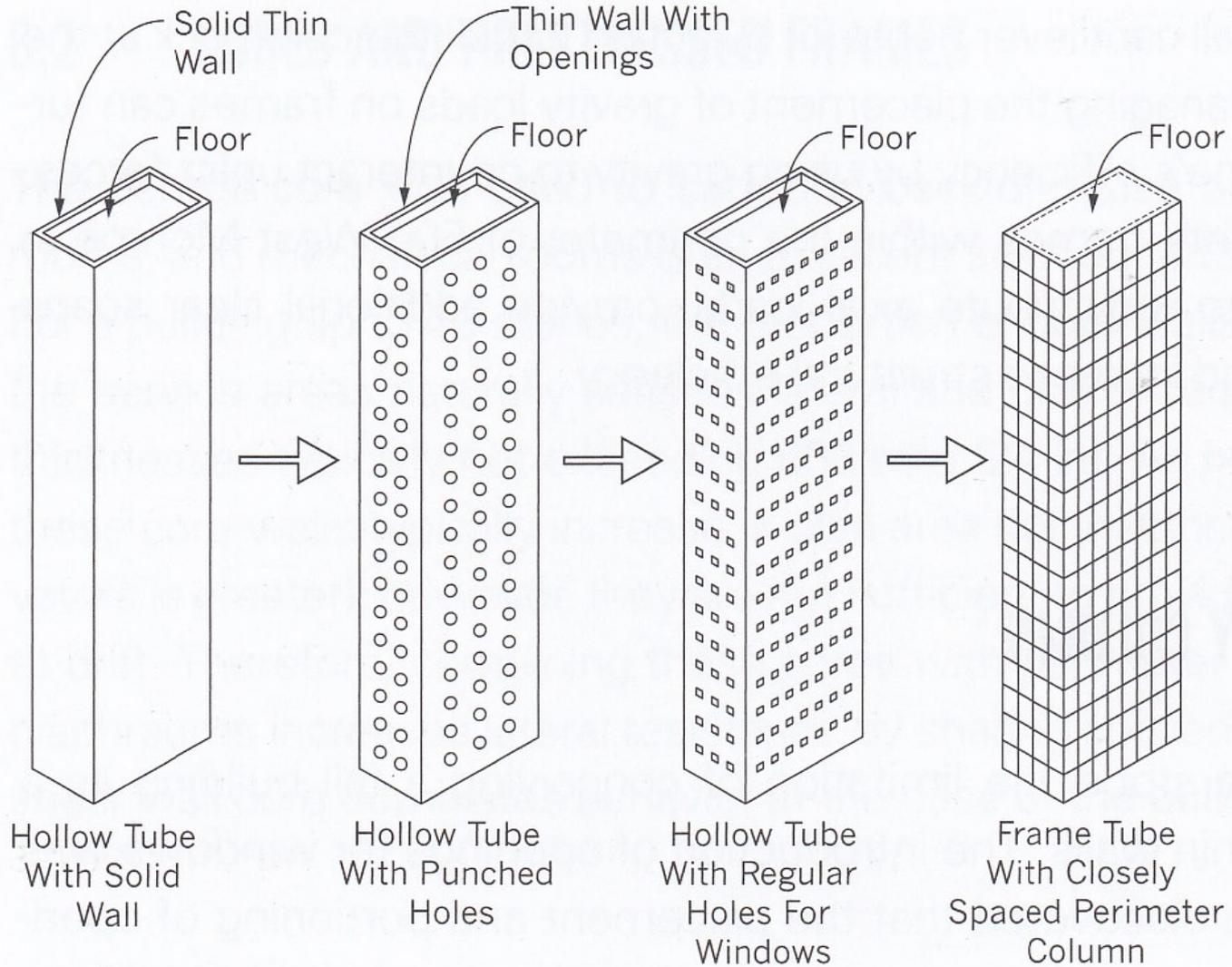
I sistemi a tubo sono stati sviluppati negli anni '60 da Fazlur Rahman Khan (SOM) e rappresentano un'evoluzione del telaio a nodi rigidi.

Un sistema a tubo può essere definito come un telaio tridimensionale a nodi rigidi disposto perimetralmente all'edificio.

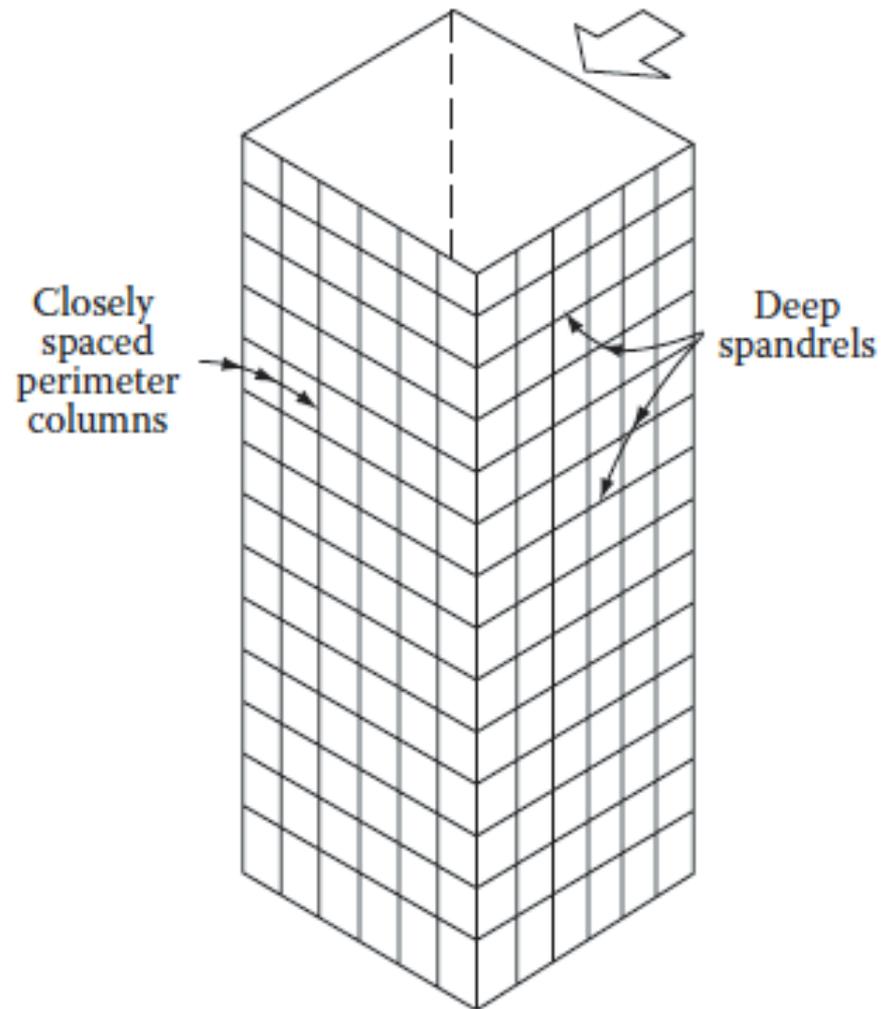
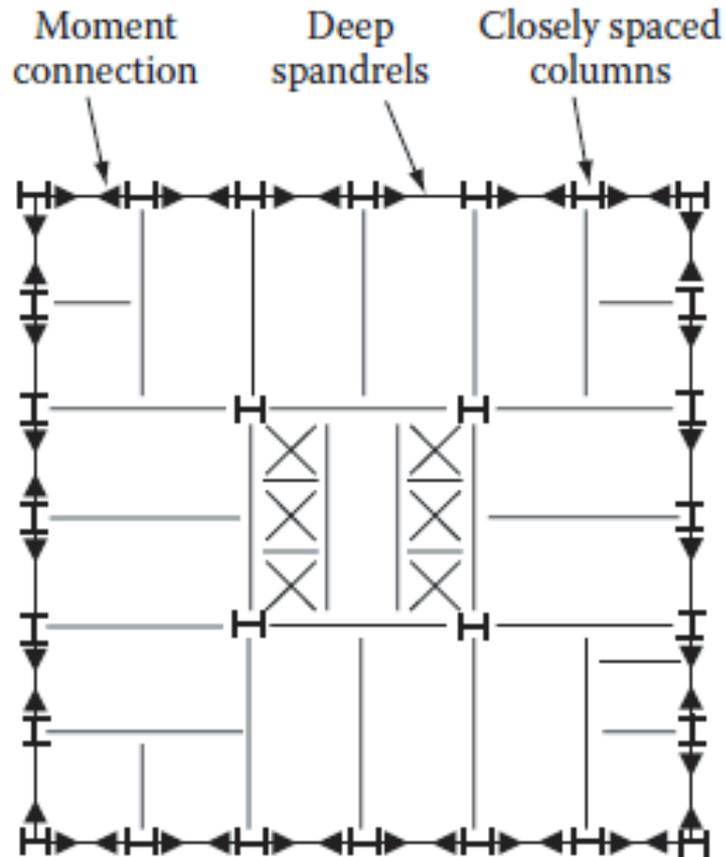
Tipo	Limite del numero di piani	Limite di altezza (m)	Altezza d'interpiano (m)
Tubo intelaiato in acciaio	90	360	4,00
Tubo intelaiato in acciaio in calcestruzzo armato	55	176	3,20
Tubo intelaiato in acciaio in composito	65	260	4,00



Genesi di un sistema a tubo a telaio perimetrale



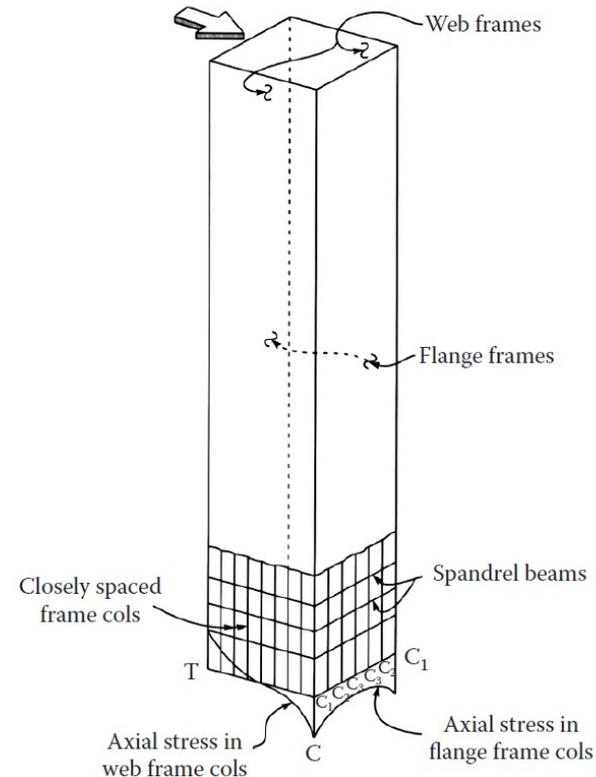
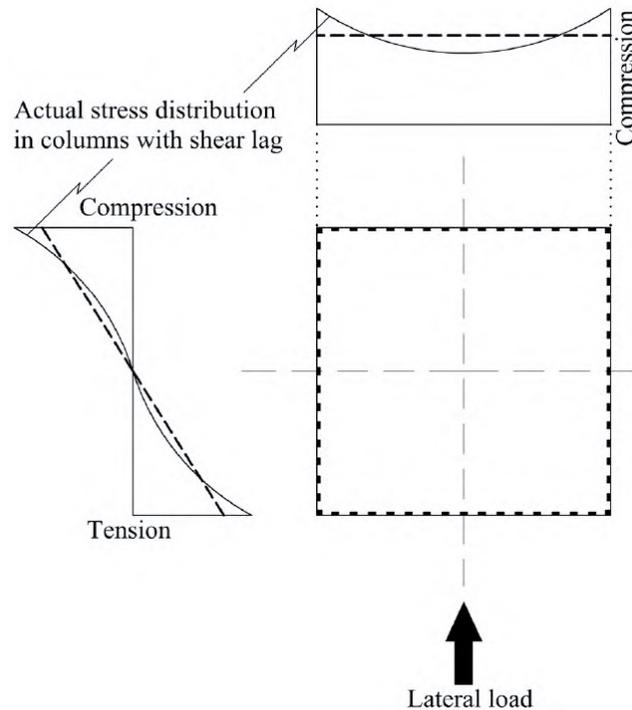
Disposizione degli elementi strutturali



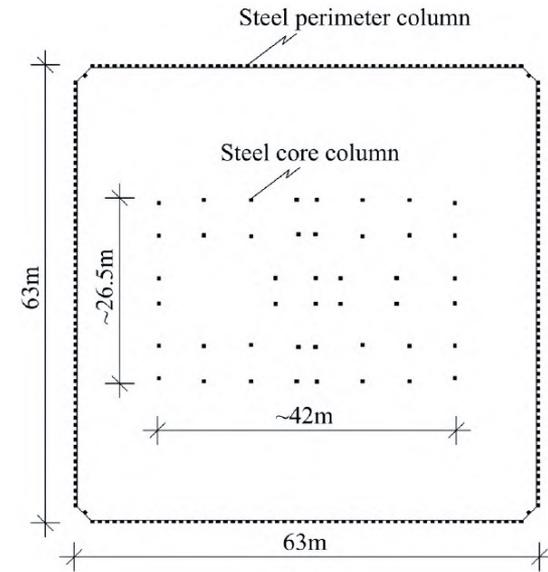
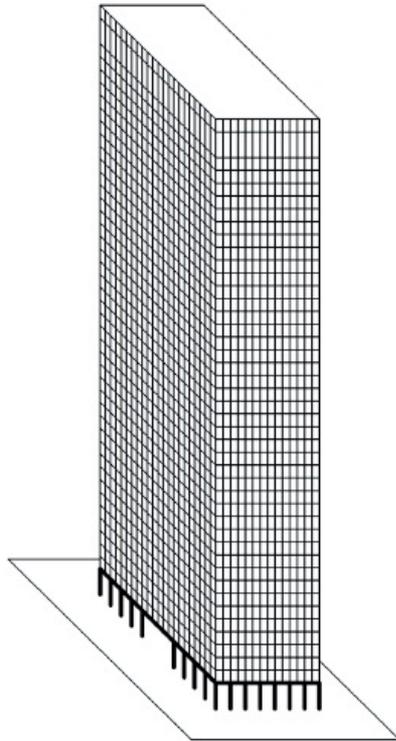
Efficienza strutturale

Un sistema strutturale si considera *efficiente* quando per la sua realizzazione si impiega una quantità minima di materiale. Per un sistema a tubo l'efficienza strutturale è legata alla distribuzione degli sforzi alla base per effetto di azioni orizzontali. Più la distribuzione è simile a quella di un tubo in parete piena, più il sistema strutturale è efficiente.

Nei sistemi a tubo, la deformazione flessionale delle travi di collegamento e delle colonne determina una disuniformità degli sforzi nelle colonne perimetrali (*shear lag*). Ciò implica che le colonne intermedie non sono sollecitate al massimo della loro resistenza. Per aumentare l'efficienza strutturale, le colonne perimetrali devono essere disposte con un interasse il più piccolo possibile e le travi di collegamento devono avere la maggiore rigidità flessionale possibile.



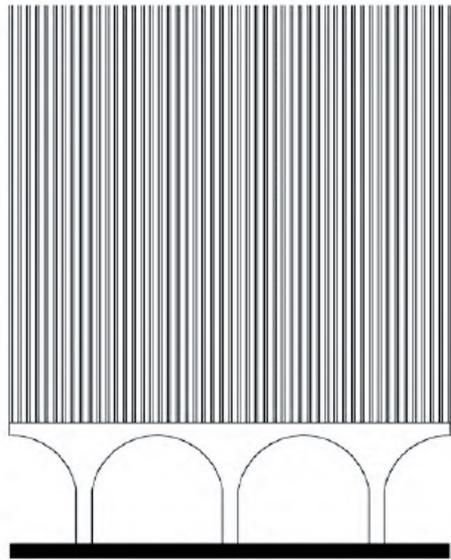
Esempi



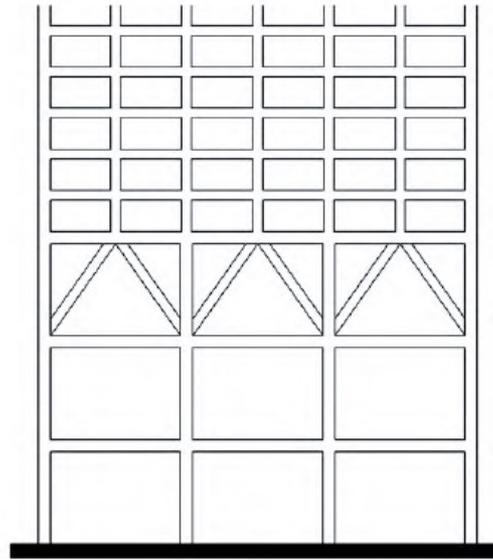
The Plaza on Dewitt, Chicago, USA, 1966

World Trade Center Twin Towers, New York, USA, 1972

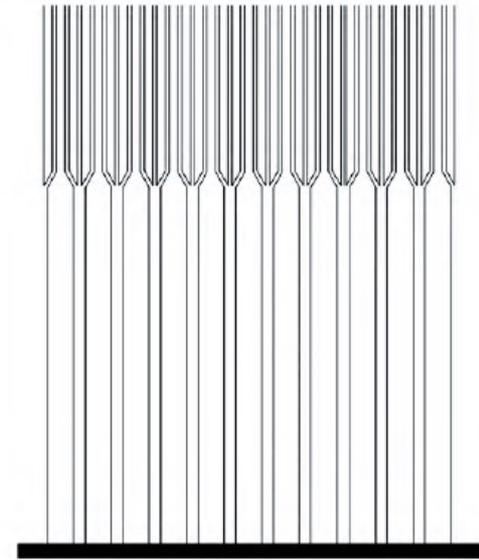
Soluzioni per l'attacco a terra



(a)



(b)



(c)

Configurations of the ground floor in the framed-tube system

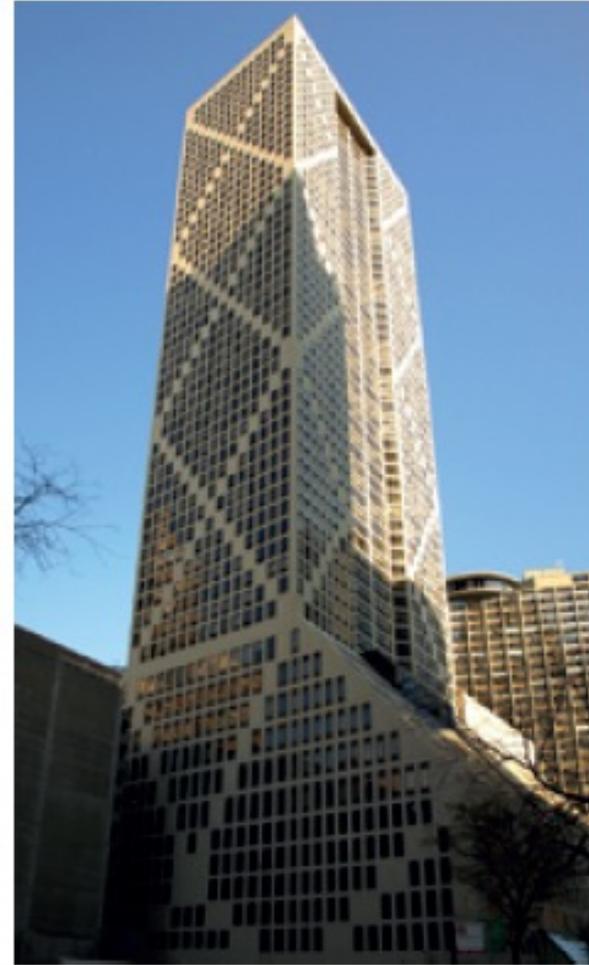


Sistema a tubo con controventi

L'aggiunta di elementi di controvento in facciata approssima maggiormente il comportamento a tubo ideale, riducendo l'effetto *shear lag* e migliorando l'efficienza del sistema. L'impegno di mega-controventi consente di realizzare edifici ancora più alti e di aumentare l'interasse delle colonne.



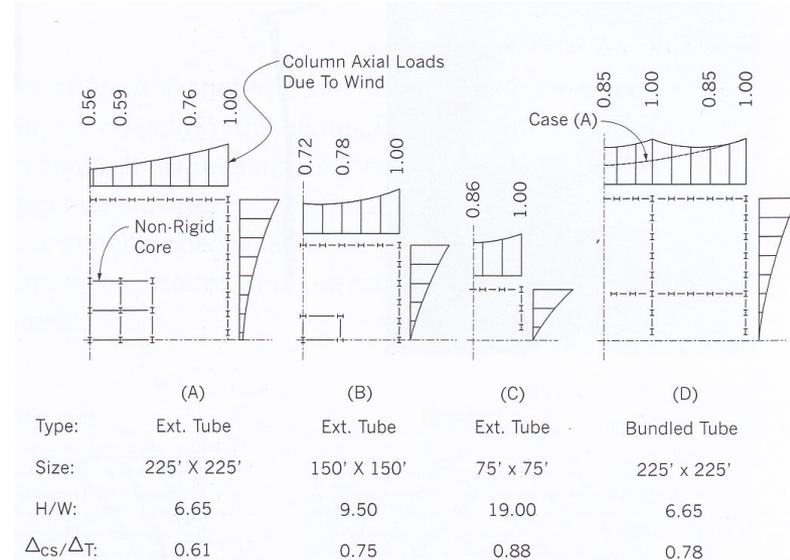
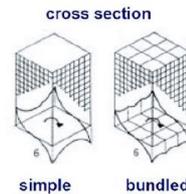
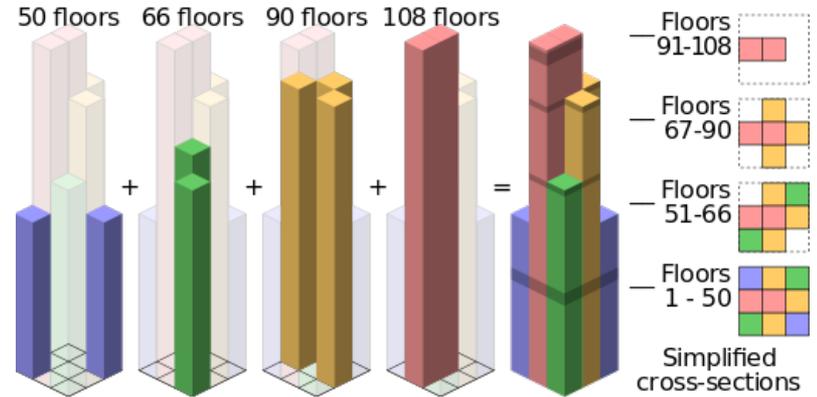
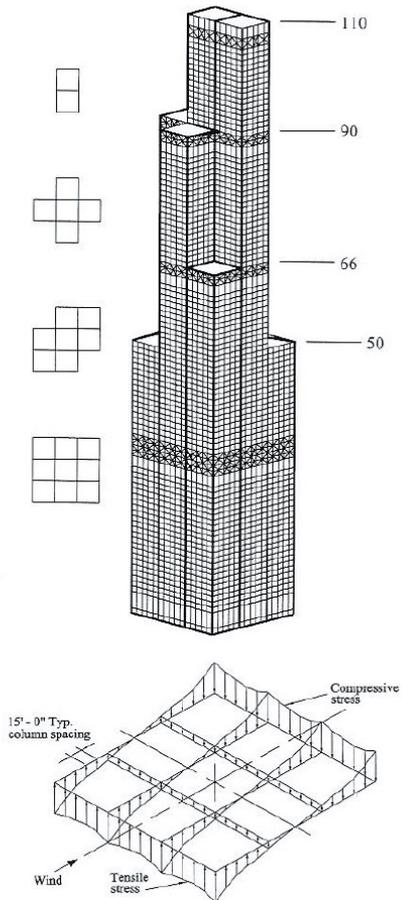
John Hancock Center, Chicago, 1969



Onterie Center, Chicago, 1986

Sistema a fascio di tubi

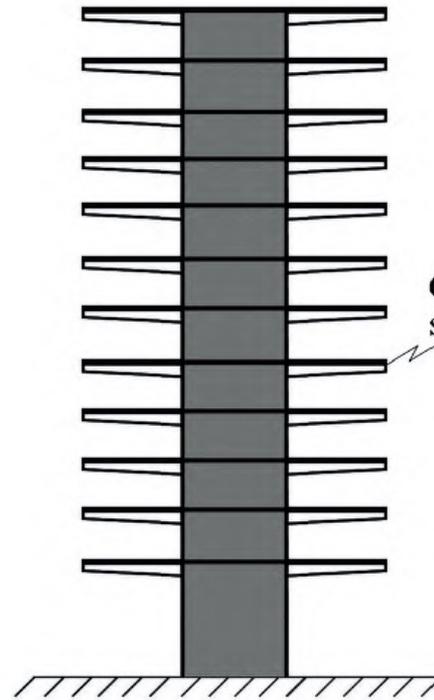
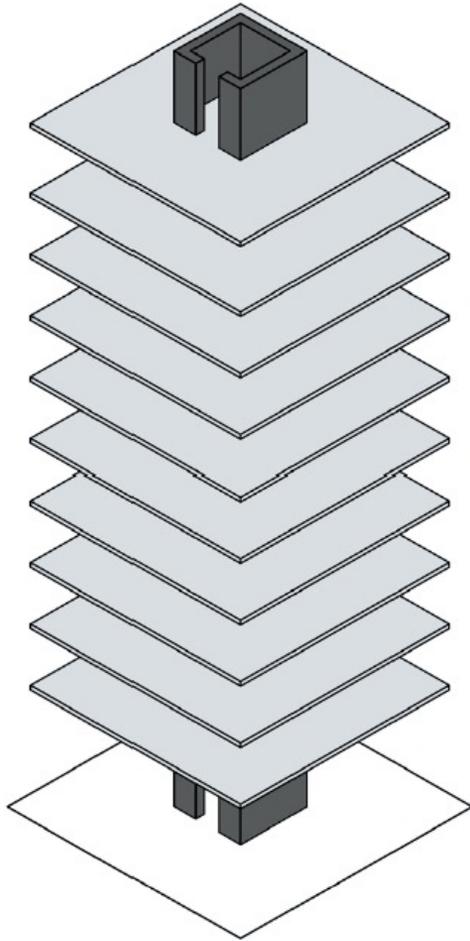
Un sistema a fascio di tubi è un insieme di tubi adiacenti di diversa altezza collegati tra loro. Questo sistema, introdotto da Fazlur Khan all'inizio degli anni '70, riduce l'effetto *shear lag*, permette brusche variazioni della pianta dell'edificio lungo l'altezza, consente un maggiore interasse delle colonne perimetrali e garantisce un maggior controllo degli spostamenti.



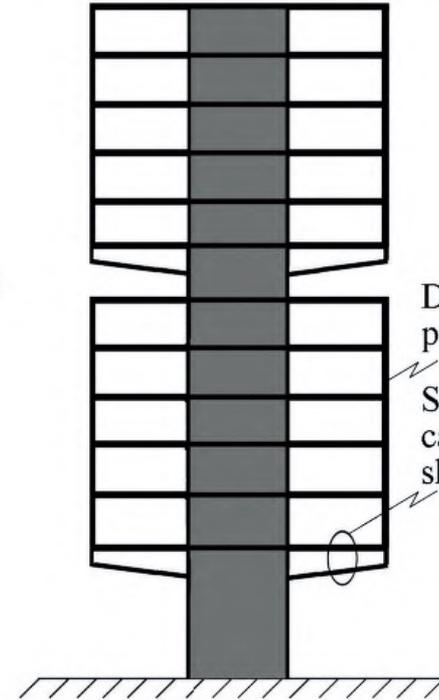
Willis Tower, Chicago, 1974

Sistemi a nucleo centrale

Sono utilizzati in edifici in calcestruzzo armato. Il nucleo resiste alle azioni orizzontali e deve essere sufficiente rigido da contenere gli spostamenti orizzontali entro limiti accettabili. I solai sono realizzati o tutti a sbalzo, o a moduli in cui le colonne perimetrali sono sostenute dal solaio inferiore, particolarmente rinforzato.



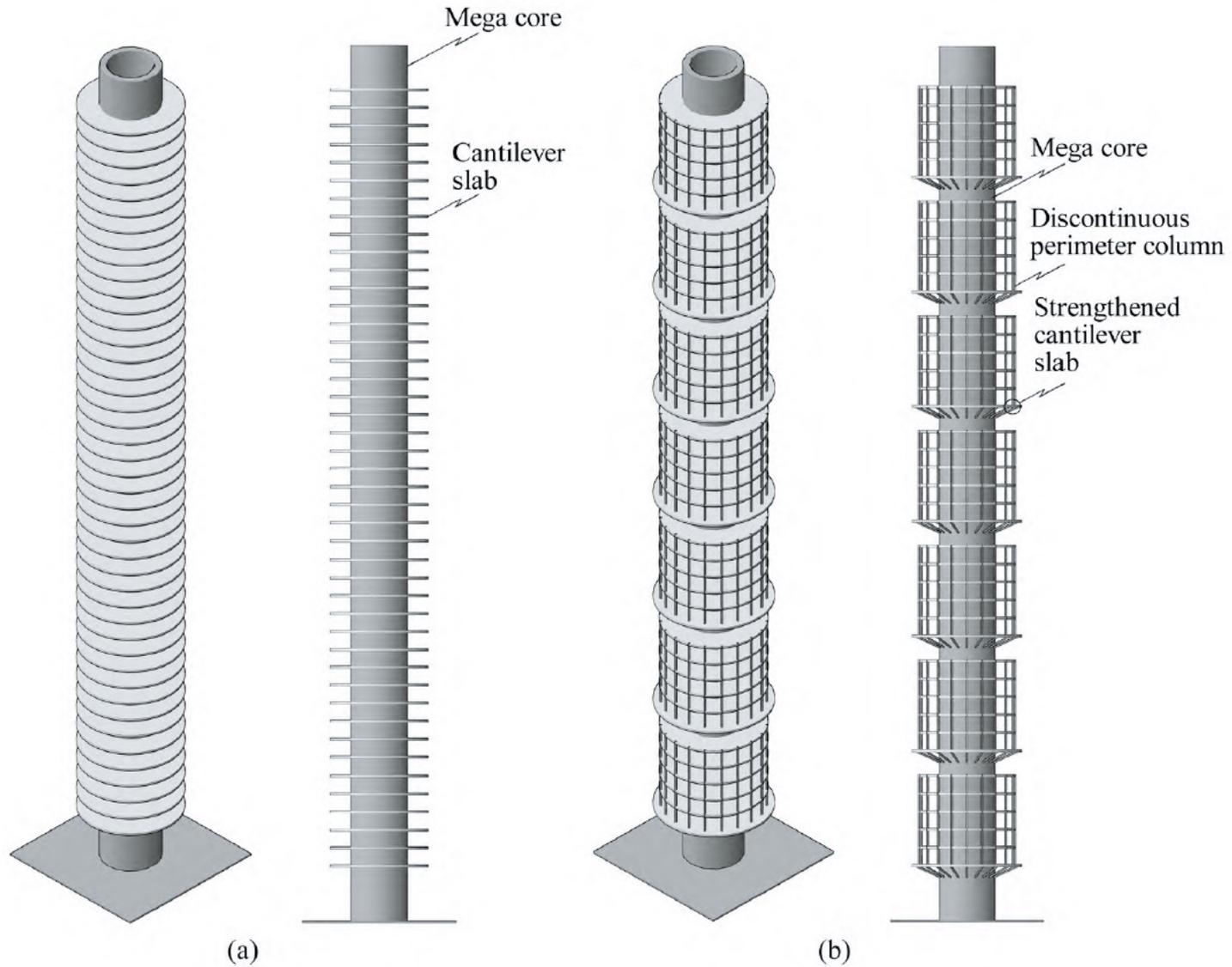
(a)



(b)

Slabs in core systems: (a) cantilever slabs, (b) strengthened cantilever slabs

Sistemi a nucleo centrale

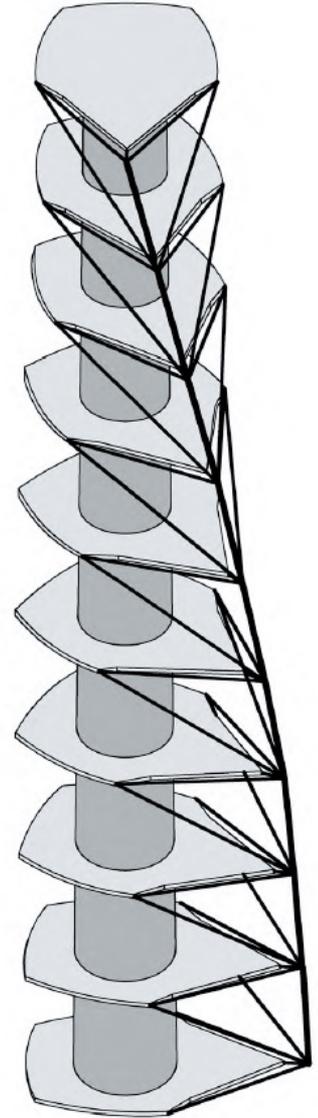
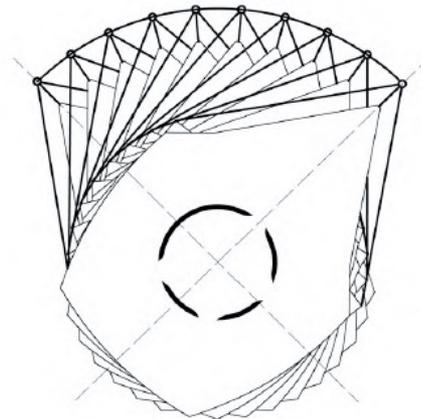
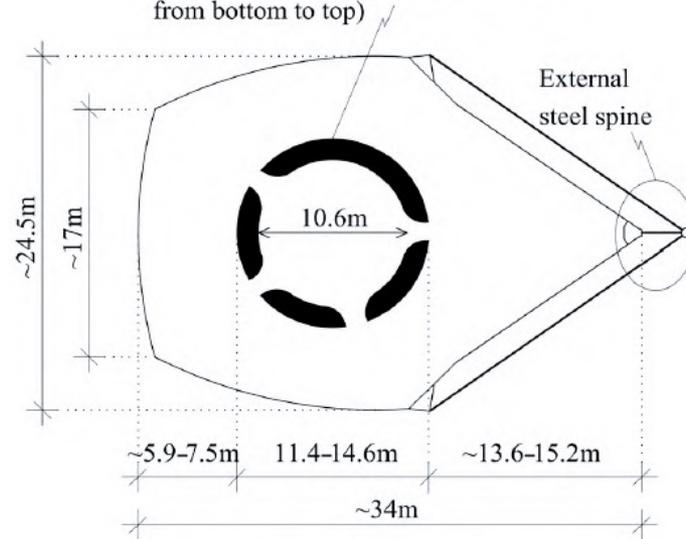


Slabs in the mega core system: (a) cantilever slab, (b) supported

Esempio



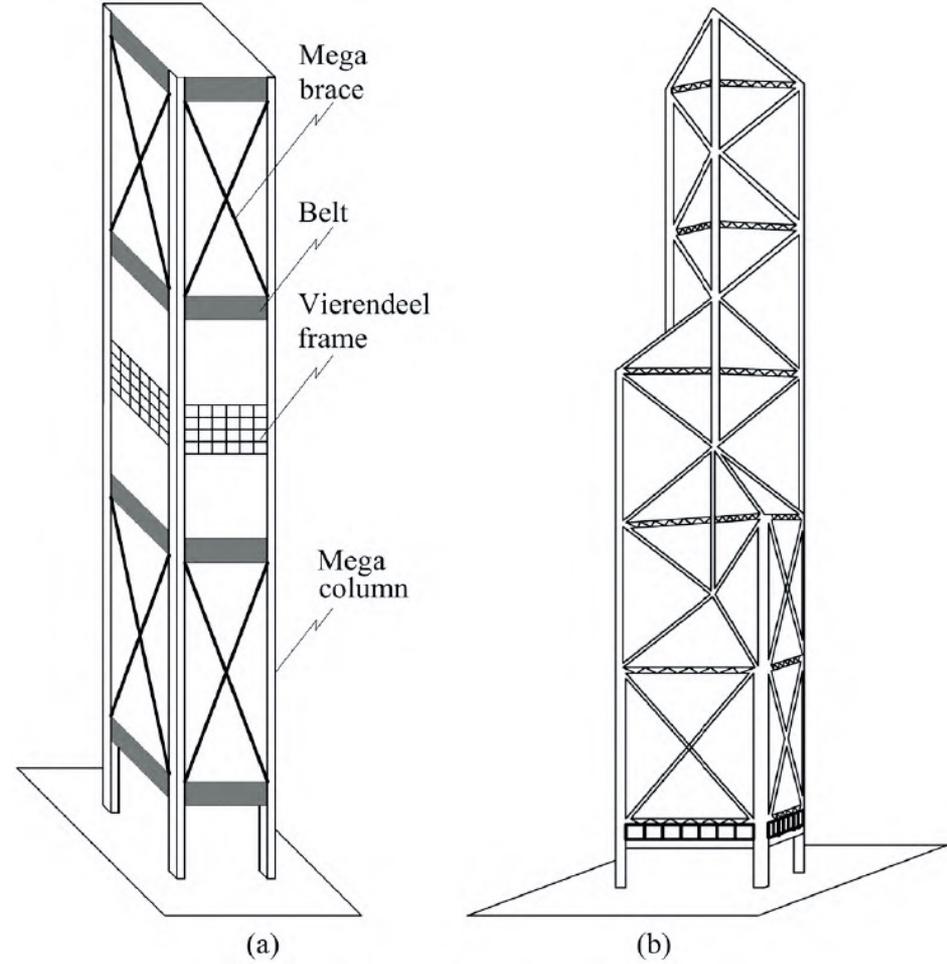
Reinforced concrete mega core
(circular cross-section with
internal diameter of 10.6m and
varying wall thickness of 2m to 40cm
from bottom to top)



HSB Turning Torso, Malmö, 2005

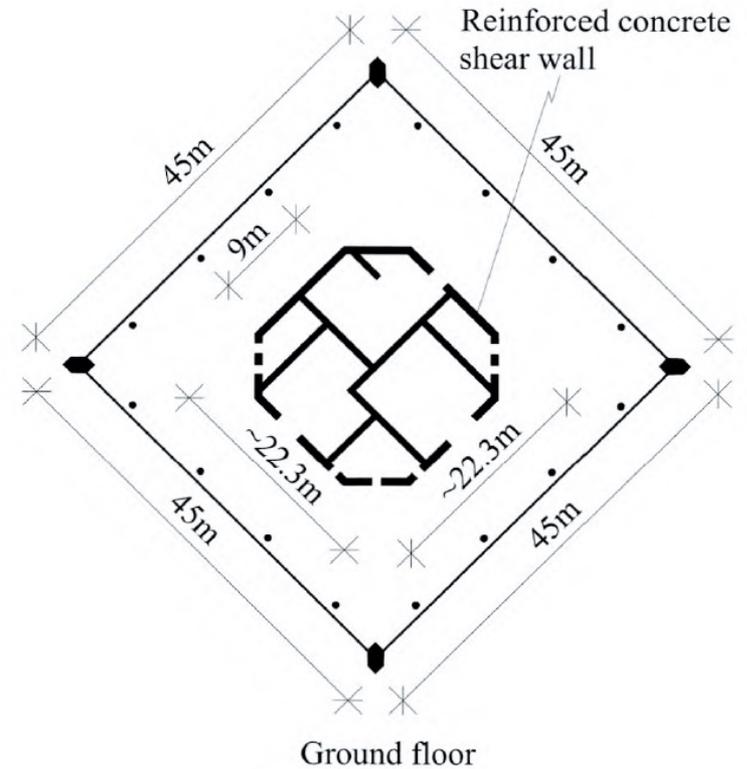
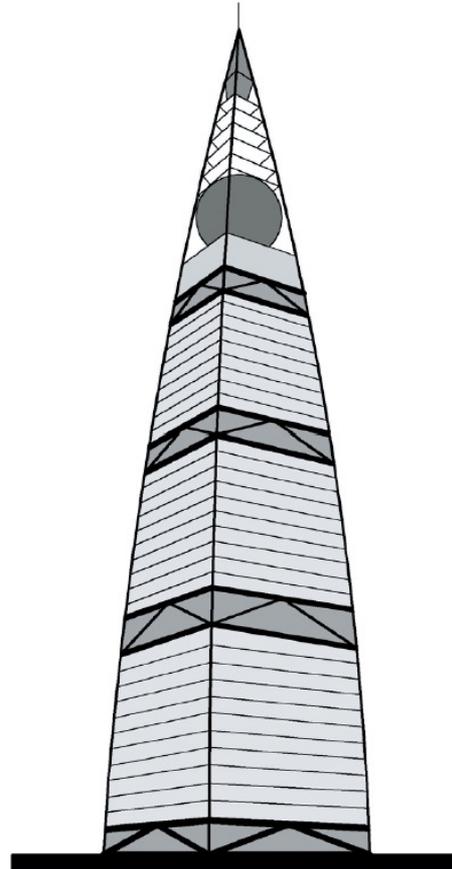
Sistemi con mega-colonne (mega-telai)

Questi sistemi sono costituiti da colonne o pareti di taglio, in calcestruzzo armato o in composito, aventi una sezione trasversale molto più grande del normale e che si estendono per tutta l'altezza dell'edificio. In questi sistemi, i collegamenti trasversali tra i mega-elementi verticali sono di primaria importanza per il raggiungimento di un'adeguata rigidità e resistenza laterale. A tale scopo si possono utilizzare o mega-controventi o travi perimetrali, reticolari o *vierendeel*.



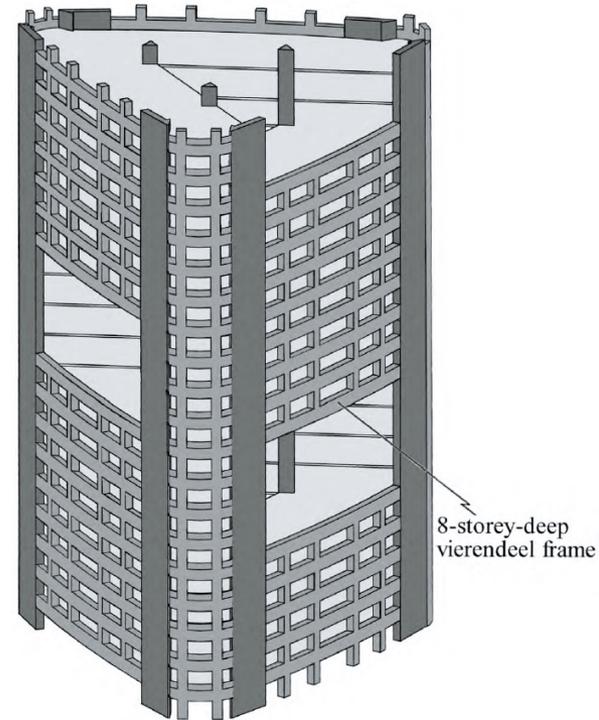
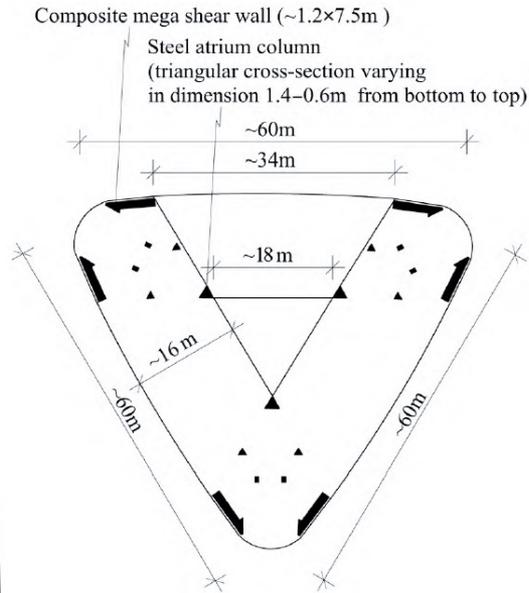
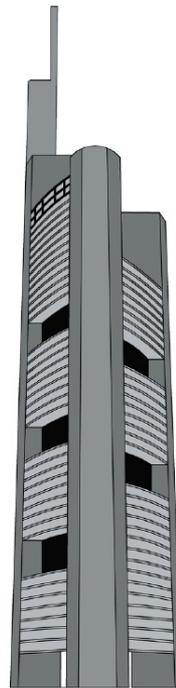
Mega column (mega frame, space truss) system

Esempio



Al Faisaliah Center, Riyadh, Saudi Arabia, 2000

Esempio

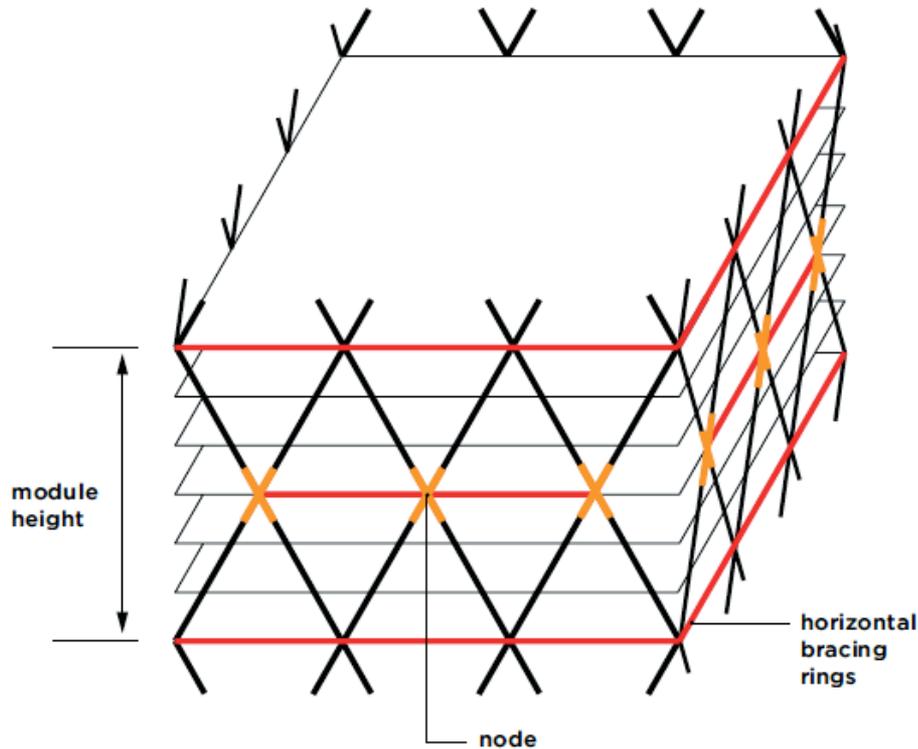


Commerzbank Tower, Frankfurt, Germany, 1997

Sistemi *diagrid* (*diagonal grid*)

Il termine *diagrid* è un acronimo per indicare i sistemi a griglia diagonale. Il sistema è costituito da elementi inclinati, normalmente in acciaio, collegati tra di loro in punti nodali. La griglia è disposta lungo il perimetro dell'edificio e consente di sostenere sia i carichi verticali sia quelli orizzontali, eliminando la necessità delle colonne verticali che hanno, in sé, una modesta capacità di opporsi alle forze verticali.

Il sistema è molto efficiente, perché riduce la flessione negli elementi strutturali, consentendo un notevole risparmio di materiale.



Esempi



Hearst Magazine Tower, New York, 2006



30 St. Mary Axe, London, 2004

Esempi

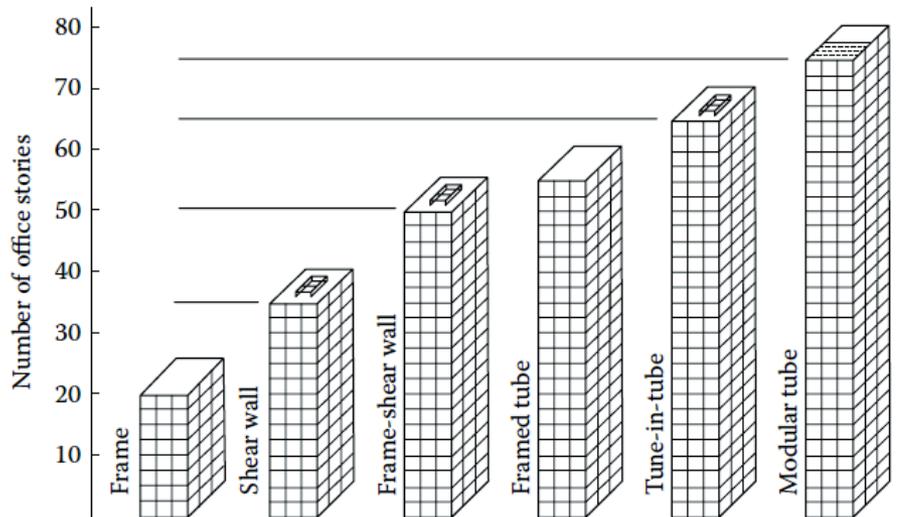
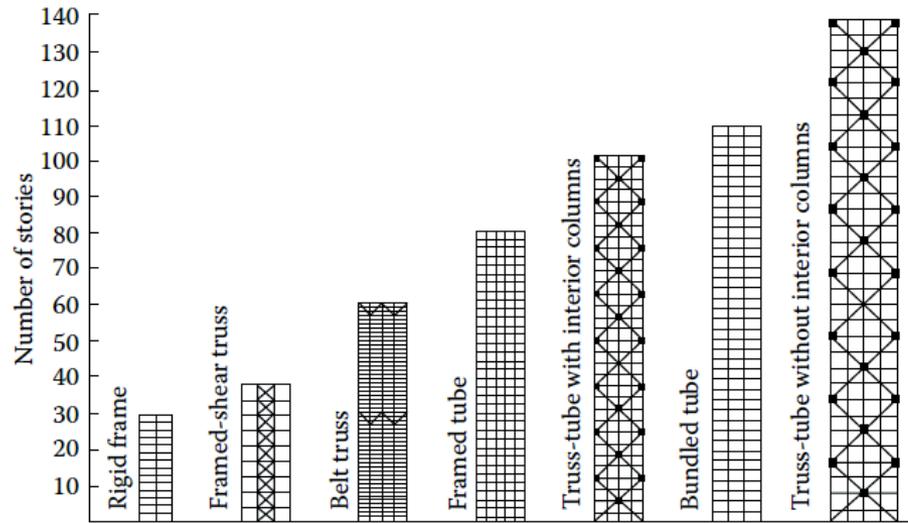


COR Building, Miami, 2011



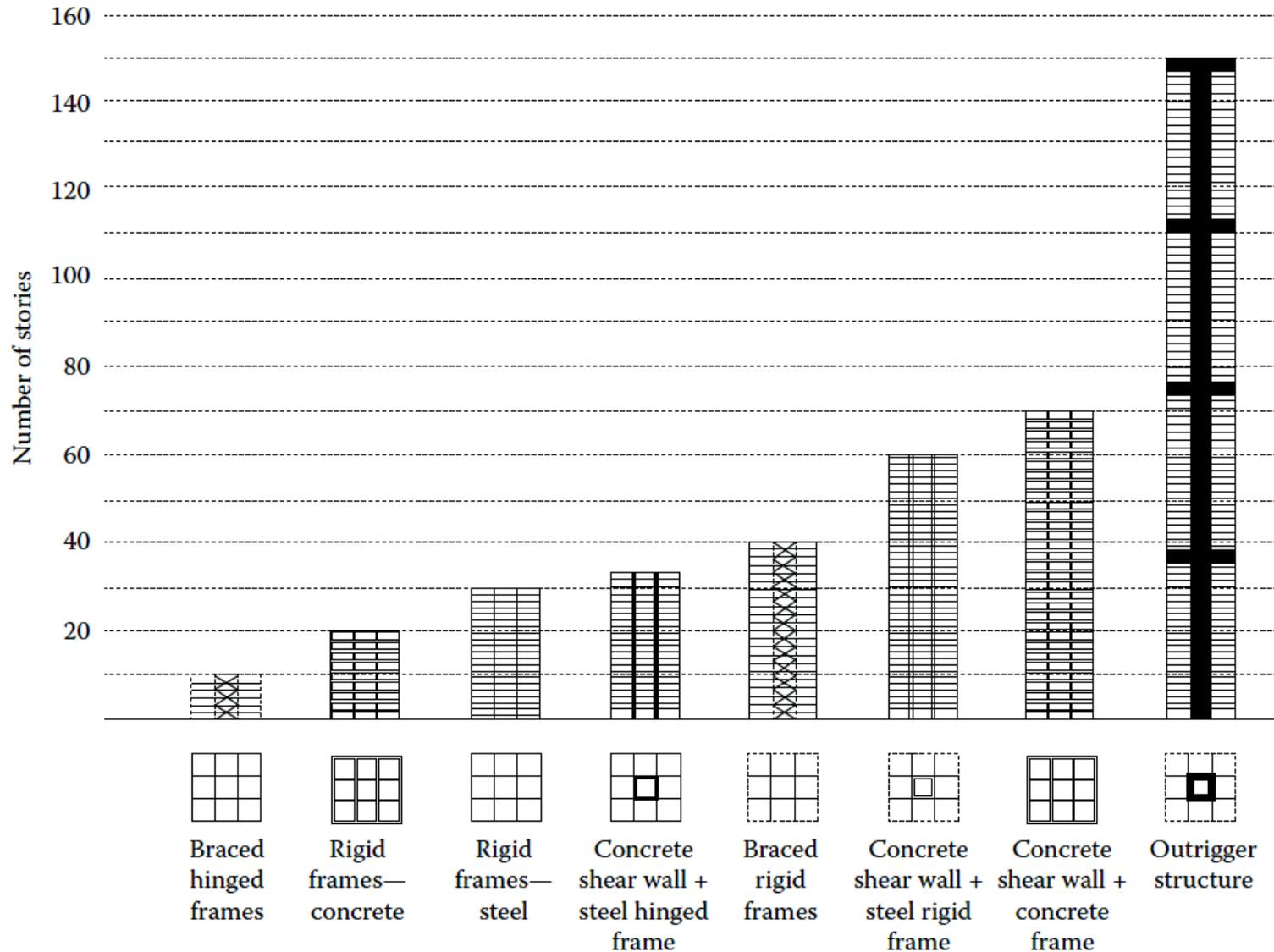
O-14 Tower, Dubai, 2009

Sintesi dei principali sistemi strutturali

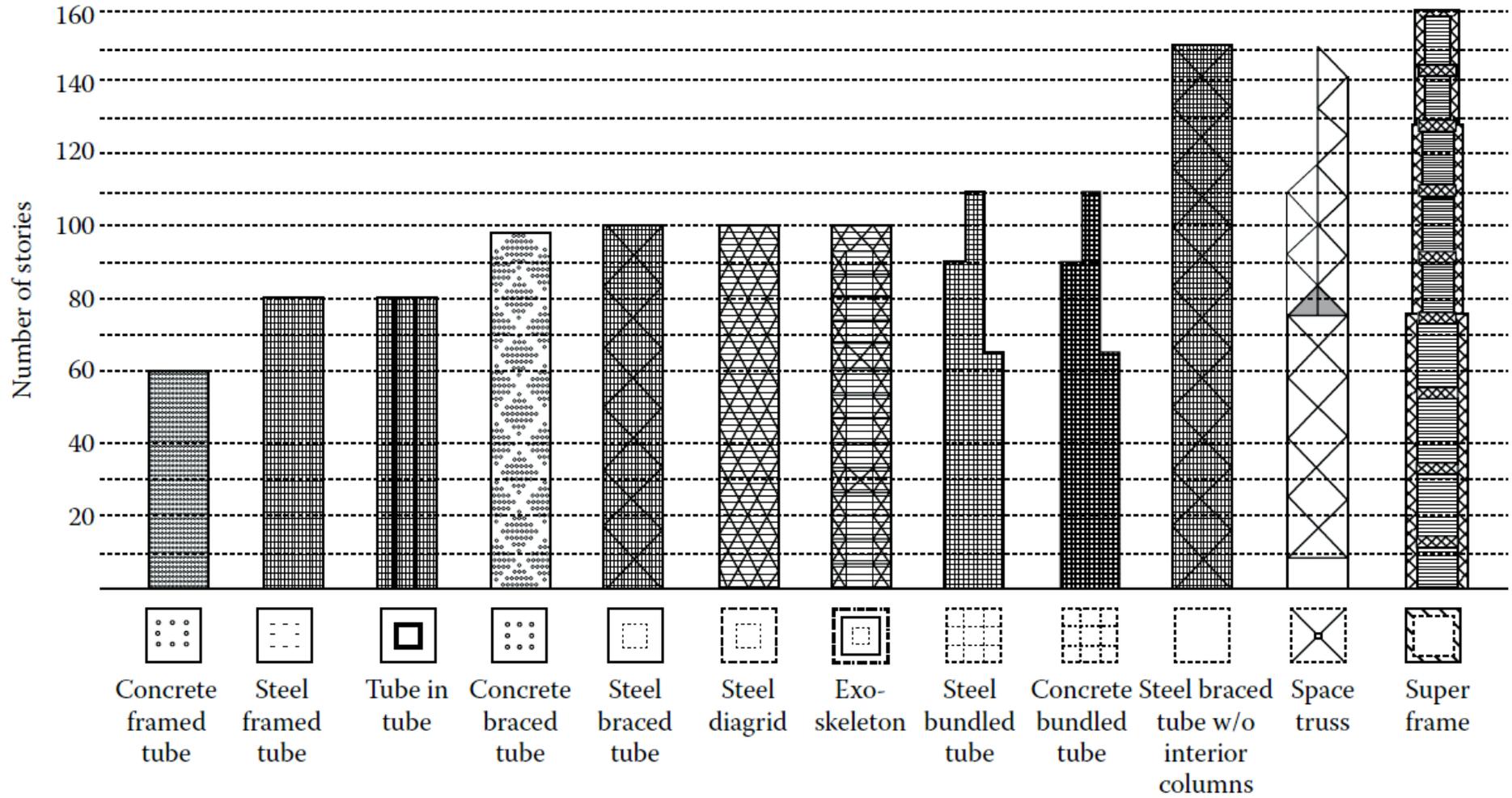


Classification of tall building structural systems. (After Khan, F.R. 1969. Recent structural systems in steel for high-rise buildings. *Proceedings of the British Constructional Steelwork Association Conference on Steel in Architecture*. British Constructional Steelwork Association, London, pp. 24–26)

Sistemi strutturali posti all'interno dell'edificio



Sistemi strutturali posti all'esterno dell'edificio



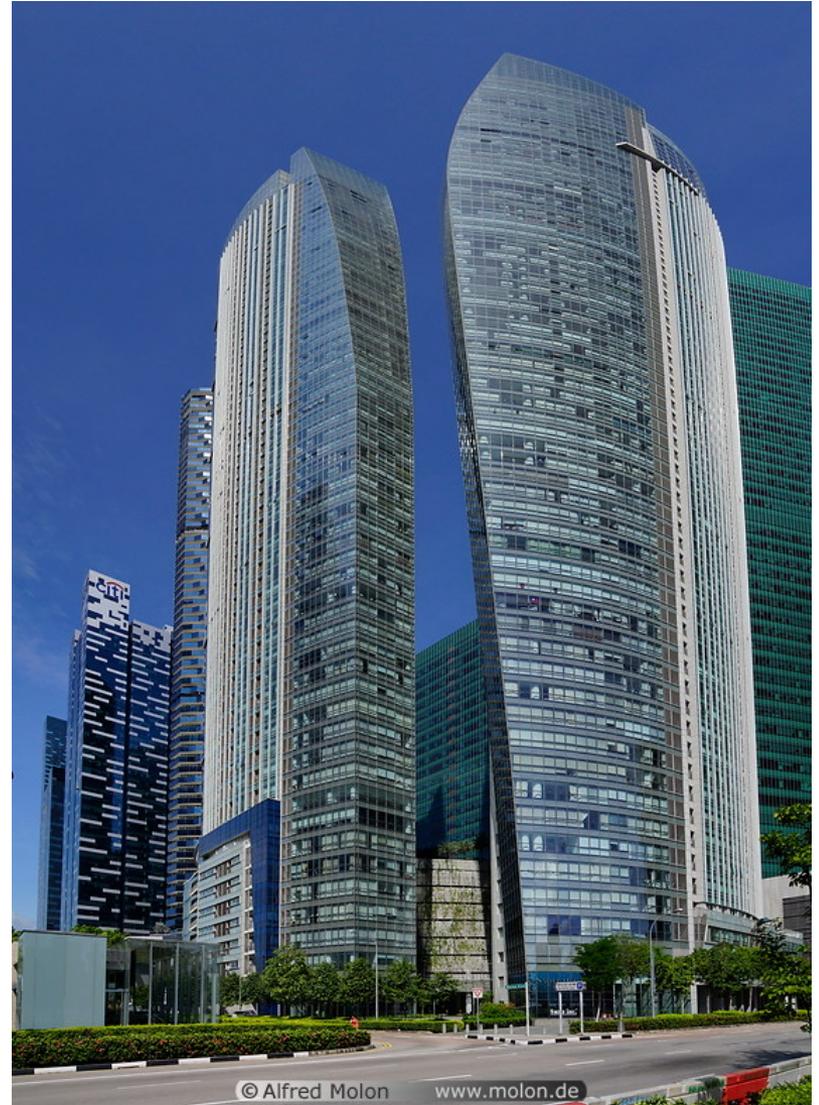
Sviluppi futuri



Phare Tower, Paris, to be built



Bionic Tower, Shanghai, and Millennium Tower, Tokyo, to be built



Sail at Marina Bay, Singapore, 2009

© Alfred Molon www.molon.de