



POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Architettura e Società

Corso di Laurea Magistrale in Progettazione Architettonica

Tesi di Laurea

La risposta strutturale dell'acciaio nella progettazione degli edifici alti

Relatore: Prof. Mola Franco
Correlatore: Prof. Schiaffonati Fabrizio

Di Vicino Valeria
Matr. 765757

Anno accademico 2012/2013

Indice

Indice	2
1. L'edificio a torre: breve introduzione	4
1.1 Tipologia e morfologia	5
1.2 L'edificio a torre attraverso i principali esponenti del Movimento Moderno	6
1.3 Grattacieli in Italia	10
1.4 La querelle al giorno d'oggi	13
1.5 La sfida dell'uomo	17
2. Cenni generali sulle strutture	32
2.1 Le strutture in architettura	32
2.1.1 Evoluzione storica del rapporto tra ingegneria e architettura	33
2.1.2 L'innovazione tecnologica: i grattacieli	37
2.1.3 La gestione dell'innovazione tecnologica del progetto	45
2.2 Materiali	46
2.2.1 Cenni generali	46
2.2.3 L'acciaio: cenni storici	48
2.2.4 Produzione dell'acciaio	50
2.2.5 Caratteristiche dell'acciaio	52
2.2.6 L'acciaio strutturale	55
2.3 Semilavorati in acciaio	58
2.3.1 Elementi laminati a caldo	58
2.3.2 Elementi sagomati a freddo	58
2.3.3 Elementi costruttivi	58
2.4 Differenze tra strutture in c.a. e strutture in acciaio	62
2.4.1 Perché scegliere l'acciaio.	62
2.4.2 Differenze principali con il cemento armato.	63
3. Tipologie strutturali degli edifici alti	79
3.1 Introduzione	79
3.2 Cenni Storici	81
3.3 Schemi statici degli edifici alti	83
3.4 Elementi strutturali degli edifici alti	97
3.4.1 Fondazioni	97
3.4.2 Nucleo di irrigidimento	105
3.4.3 Colonne e Travi	105
3.4.4 Solai	107
4. Caso studio: Torre Residenziale in acciaio con nucleo in c.a.	111
4.1 Definizioni delle azioni e misura della sicurezza	111
4.1.1 Stati Limite	112
4.1.2 Classificazione delle Azioni	115
4.1.3 Combinazioni delle Azioni	117
4.1.4 Azioni nelle verifiche agli Stati Limite	118
4.2 Descrizione del Progetto	121
4.2.1 Normative di Riferimento	122
4.2.2 Analisi delle Azioni	123
4.2.3 Analisi strutturale tramite modello ad elementi finiti	124
Bibliografia e Sitografia	131
Indice delle immagini	132

1. L'edificio a torre: breve introduzione

Il **grattacielo** è un edificio di grandi dimensioni ed espanso in senso verticale verso l'alto, costituito da un gran numero di piani abitabili.

E' considerato un grattacielo qualsiasi edificio di altezza superiore ai 100 metri anche se, al di là della misurazione dell'altezza in metri, è di uso comune considerare come grattacieli tutti quegli edifici che superino i 15 piani di altezza.

L'etimologia del termine, che deriva dall'inglese *skyscraper*, significa letteralmente "che gratta il cielo". Sin dagli inizi del XX secolo e in tutta l'era moderna e contemporanea, il termine *skyscraper* indica tuttavia una particolare tipologia di edificio, la più imponente costruzione fisica concepita dagli esseri umani: la torre moderna caratterizzata da una struttura metallica con scansione in piani.

La tipologia a torre rappresenta un *archetipo* fondamentale nell'immaginario collettivo. Immediatamente riconoscibile per la sua verticalità, la torre restituisce riconoscibilità anche al luogo e al paesaggio in cui si trova: essa, infatti, secondo Mies, "svolge il doppio ruolo di guardare lontano ed essere vista da lontano".

Pisa, Bologna, San Gimignano, ma anche quartieri di città come La Defence, Manhattan, i Docklands di Londra devono la loro riconoscibilità agli edifici a torre.

La torre è un segno verticale per eccellenza, la sfida dell'uomo nei confronti della gravità, un segno artificiale in antitesi alla linea naturale dell'orizzonte, un'imposizione dell'uomo nei confronti della natura.

Per alcuni metafora dell'uomo stesso, simbolo della propria individualità, alla torre spesso vengono collegati molti significati, tra tutti resta innegabile il fatto che essa sia carica di profonda semantica e indiscutibile fascino.

Punto di osservazione privilegiato, osservatorio unico per la conoscenza visiva e percettiva del suo intorno e del territorio, luogo di eccellenza per il controllo delle aree circostanti, alla torre storicamente sono state associate molte funzioni: civica, militare, religiosa, terziaria, e non ultima, soprattutto con l'avvento del Movimento Moderno, quella abitativa.

Entrata prepotentemente nella toponomastica territoriale è, da sempre, elemento costitutivo del territorio, *landmark* dell'orizzonte urbano.

Oggi persistono, nell'immaginario collettivo, alcune mistificazioni riguardo all'idea di torre. Innanzitutto si tende ad identificare nella tipologia a torre il prodotto di un'operazione connessa al capitale finanziario che, per l'alto livello di investimento necessario per la sua realizzazione e per la forte valenza espressiva, ha assunto la torre come elemento a simbolo della propria immagine.

In secondo luogo, questa tipologia è sempre stata identificata come caratteristica della cultura americana, perché da lei è stata prodotta ed esportata, in chiave moderna, in tutto il mondo.

Infine la cultura europea ha da sempre collegato alle torri il carattere pubblico senza dar vita ad un possibile sviluppo della funzione privata e residenziale.

Un corretto approccio al tema impone, quindi, una nuova reinterpretazione della torre come elemento di misura del territorio, di rivitalizzazione della città contemporanea, come un valido modello insediativo, in contrasto con gli attuali orientamenti urbanistici, come in Asia e America, che propongono una indiscriminata proliferazione territoriale delle torri slegandole da un effettivo e coerente rapporto territoriale.

1.1 Tipologia e morfologia

La residenza è l'oggetto urbano preminente nella composizione della città.

L'aspetto residenziale è sempre stato presente in tutte le città, e, nell'evoluzione contemporanea, tutte le modificazioni sono andate a vantaggio della residenza che ha occupato sempre più spazi rispetto alla città plurifunzionale del passato: prima con la distruzione del rapporto di vicinato con l'industria; dopo con quello col commercio al minuto, funzioni che sono state espulse dalla città consolidata verso aree periferiche attestate sui grandi assi di comunicazione.

La forma con cui si realizzano i tipi edilizi residenziali, l'aspetto tipologico che li caratterizza, è strettamente legato alla forma urbana, come ampiamente documentato dalla letteratura in materia.

La localizzazione della residenza dipende da molti fattori: geografici, morfologici, storici, economici, strutturali.

Nella conformazione della città ottocentesca esiste una correlazione stretta tra la struttura urbana e la struttura tipologica: ai tipi edilizi (costruzioni a blocco, corpi liberi, case unifamiliari, torri) corrispondono zone di città tra loro diverse, in una sorta di zoning.

Le costruzioni a blocco sono tipiche di una conformazione classica del tessuto urbano, e costituiscono la forma più integrale di sfruttamento del suolo, in quanto gli indici di impermeabilità dei suoli risultano elevati.

Con le costruzioni a corpo libero la strada non è più l'elemento ordinatore dell'orientamento e degli allineamenti dei corpi di fabbrica: questa tipologia edilizia è piuttosto dettata da esigenze di esposizione eliotermica e dal rapporto con gli spazi liberi e verde, e quindi si instaura un preciso rapporto col suolo.

Questa tipologia ha avuto molta fortuna tra i razionalisti del Movimento Moderno, in quanto essa rappresenta, oltre che un modello spaziale, anche un modello sociologico.

Per le case unifamiliari isolate, le ville, e per analogia le tipologie abitative a torre (a scala più grande) si pone in modo ancora più stretto il rapporto con la natura e l'ambiente circostante, con la campagna, mediante l'autorappresentazione formale e il distacco dai modelli insediativi ad alta densità tipici delle zone urbanizzate consolidate.

Le sperimentazioni urbanistiche del Movimento Moderno, in antitesi con un modello di città convenzionale ad alta densità, adotteranno questa tipologia per formulare un'idea di "città sparsa nella natura", conformata da una zona a destinazione produttiva ed intorno, con un forte legame naturalistico, edifici residenziali ed edifici pubblici.

L'edificio a torre ad uso residenziale contiene molte analogie con la casa isolata e la villa: entrambe sviluppano una geometria riconducibile alla forma del poligono quadrato, libero su tutti i lati; la prima è lo sviluppo, in scala più grande (sia in verticale che in orizzontale) dell'impianto della seconda; hanno entrambe una distribuzione interna estroversa nei confronti del contesto circostante; la torre abitativa contemporanea è l'evoluzione in verticale della villa grazie all'uso delle nuove tecnologie costruttive e dal diverso valore economico dei suoli urbani edificabili rispetto al passato.

La torre abitativa sviluppa il bisogno primario della casa come "rifugio", come luogo da vivere privatamente (*domus romana*), ma al contempo si basa anche sul secondo aspetto basilare della forma abitativa: il necessario rapporto col luogo e con l'intorno.

Si sono configurati, agli inizi del '900, due principali modelli dettati da una concezione nuova e rivoluzionaria dell'abitare: il primo delinea una grande incidenza di spazi verdi ma ad uso quasi esclusivamente privatistico, nella Città Giardino di *Howard*, con una disposizione residenziale di tipo orizzontale; il secondo individua enormi polmoni verdi ad uso comune, secondo le utopie razionaliste del Movimento Moderno, inserendo in essi l'uso di tipologie residenziali sviluppate e concentrate verticalmente.

La Carta d'Atene (1933), manifesto del Movimento Moderno per un nuovo modello di città, detta il giusto rapporto tra volumi costruiti e spazi liberi: i primi dovranno concentrarsi volumetricamente in altezza a favore delle aree libere dedicate allo sviluppo delle diverse attività comuni.

Le tipologie consigliate (torri e blocchi isolati - "Unitès", "Redents") possono soddisfare determinate condizioni di vista piacevole, aria pura, completa esposizione al sole.

La disposizione rada delle unità abitative non permette alcuna interferenza visiva, gli alloggi residenziali sono così completamente immersi nel verde, l'Unitè, metaforicamente, viene paragonata da *Le Corbusier* come una nave con attorno a sé l'elemento naturale (il verde metafora del mare), unicamente variato da altre navi all'orizzonte.

Questo rappresenta un modello di città in contrapposizione alla città ottocentesca ove era possibile la frammistione funzionale tra residenza e le altre attività anche di tipo produttivo, strutturata secondo principi localizzativi fortemente legati alla maglia viaria infrastrutturale, senza presupposti igienico-ambientali.

La novità fondamentale delle utopie urbanistiche di Le Corbusier, oltre al delinarsi di un disegno urbano che anticipa l'idea di una città lineare, è che la residenza si riappropria delle parti urbane più pregiate (quelle centrali e meglio accessibili) e adotta, sviluppandosi verticalmente, una tipologia, costituita da enormi grattacieli.

[..] Le Corbusier affida al verde come spazio costruito, il ruolo di definire il contesto dell'abitazione, in rapporto alle diverse forme del costruito, dalle grandi corti alle case a torre, che diventano gli elementi di formazione e possibile riconoscimento dei luoghi specifici [..] (*Monestirolì*).

Per *Mies van der Rohe* [..] costruire grattacieli vuole dire liberare grandi aree da restituire alla natura. Il grattacielo sarà il luogo dei punti di vista della natura circostante. Vedrà altri grattacieli all'orizzonte, altri luoghi identificati della grande città-campagna. Di questi edifici si è impossessato il potere economico. Vanno restituiti alla collettività [..]

Le torri residenziali realizzate da Mies a Chicago esaltano il concetto di realizzare "una stanza sospesa tra lago e cielo", quintessenza del vivere in rapporto con la natura e il paesaggio.

Mies ribadisce la necessità di istaurare questo rapporto, che nella città evoluta moderna può essere risolto con l'adozione della tipologia a torre, della quale ne rivendica la funzione residenziale.

1.2 L'edificio a torre attraverso i principali esponenti del Movimento Moderno

Lo sviluppo di questa nuova tipologia di costruzioni interessò l'America prima dell'Europa, ancora legata intorno al 1880 a forme storiche tradizionali per motivi prevalentemente culturali oltre che tecnologici. L'America, invece, ricercava forme nuove ed è per questo motivo che le scoperte tecnologiche trovarono immediato utilizzo in un paese aperto all'innovazione. Inoltre la spinta ad uno sviluppo urbano in verticale si era resa, nel frattempo, necessaria, data la grande richiesta di edifici per uffici che saturavano i centri urbani. Il ferro e la ghisa entrarono nell'edilizia, mentre lo sviluppo della meccanica, dell'idraulica, dell'elettrotecnica permetteva la costruzione degli ascensori.

Il primo edificio a torre, costruito secondo i principi architettonici moderni, fu l'edificio a 10 piani della **Home Insurance Company**¹ a Chicago nel 1883, progettato da *William Le Baron Jenney*. Le caratteristiche del nuovo tipo di costruzione erano: fondazioni a zattera in conglomerato cementizio, scheletro in ferro e finestre estese orizzontalmente. Successivamente Jenney costruisce il primo edificio nel quale non esiste neanche un muro portante, il **Leiter Building**² nel 1889. L'esperienza della Scuola di Chicago si può riassumere nella sua torre di vetro, il **Reilance Building**³, un'anticipazione architettonica del futuro. Ma ad un certo punto vi fu il bisogno di caratterizzare gli edifici che si

innalzavano in ripetizione di moduli uguali: la nuova corrente di pensiero importata dall'Europa, l'"*Ecllettismo*", trovò espressione nella torre del **Chicago Tribune**⁴ del 1922.

Capisaldi del progresso dell'edificio a torre in suolo americano furono, successivamente, il **Singer Building**⁵, di cui lo stile gotico è il riferimento, il **Chrysler Building**⁶, considerato l'espressione pubblicitaria dell'architettura, l'**Empire State Building**⁷ che esprimeva la necessità di differenziazione di grattacieli sempre più ravvicinati tra loro e costruzioni telescopiche come il **Master Building**⁸. Punto d'arrivo fu l'edificio puramente tecnologico, il grattacielo laminare, simbolo della "città nella città", come il **Rockefeller Center**⁹.

Con il post razionalismo si arriva al grattacielo come struttura costante tubolare; l'acciaio viene incontro alle esigenze del terziario, consentendo la progettazione e la realizzazione di superfici libere e la costanza delle sezioni.

Il Movimento Moderno, da Wright ad Aalto, comincia a proporre, nella progettazione degli edifici a torre, diverse soluzioni tecniche architettoniche e differenti soluzioni urbanistiche.

Mies Van Der Rohe progetta la costruzione di grattacieli anche dal punto di vista emozionale: questa tipologia edilizia non trova riscontro in epoche precedenti e pertanto per questo egli è un grande architetto, capace di esprimere alla perfezione l'epoca in cui vive. Nelle sue costruzioni elimina l'ornamento, lasciando il compito di espressione e qualifica del volume al materiale impiegato, alla struttura che caratterizza l'edificio. Il vetro non è un semplice rivestimento ma un elemento, un filtro alla luce che crea mediante riflessioni, nuove forme. I primi esperimenti per esaminare le possibilità tecniche del vetro, si riscontrano nel progetto per un grattacielo a pianta poligonale nel 1919 a Berlino e nel grattacielo di vetro a superfici convesse nel 1920. I grattacieli sul lago Michigan mostrano gli elementi di costruzione ritenuti fondamentali da Mies Van Der Rohe, il volume dell'edificio e la struttura a travi e pilastri orizzontali e verticali, i serramenti come elementi di ulteriore suddivisione. I **Promontory Apartments**¹⁰, Chicago 1946, presentano la struttura a vista in conglomerato cementizio armato e i pilastri degradanti in sezione all'esterno per mantenere la costanza di dimensioni interne. In una versione progettuale successiva si passa alla facciata come involucro di vetro e acciaio, eliminando il tamponamento in mattoni; la costanza degli interassi strutturali permette l'uso di serramenti a struttura identica e pertanto la prefabbricazione, per ora parziale, della costruzione. I curtain wall, ossia le facciate a cortina, avvolgono l'intera facciata: ogni pannello ancorato alle due solette trasferisce la spinta del vento direttamente alla struttura principale. Nei **Lake Shore Drive Apartments**¹¹, Chicago 1948 - 1951, si nota come l'orientamento perde importanza per il miglioramento delle condizioni tecnologiche – quali condizionamento dell'aria, vetrate a schermo solare, illuminazione artificiale –; le due torri sono disposte ad angolo retto e l'orientamento è determinato dal tracciato stradale urbano. Si nota la crescita degli interassi fra i pilastri, cosicché la pianta libera consente diverse disposizioni degli alloggi senza variare l'aspetto esterno ed i servizi. La stessa facciata, a griglia di pannelli vetrati, si ripete costantemente su tutti i quattro fronti. Nel **Commonwealth Promenade Apartments**¹², Chicago 1953 – 1956, il curtain wall si sviluppa davanti a una struttura in conglomerato cementizio armato. I pilastri, la cui sezione alla base è maggiore, sono visibili dall'esterno senza influenzare l'effetto architettonico del curtain wall. Il **Seagram Building**¹³, New York 1954 – 1958, è l'edificio per uffici del quartiere degli affari a Manhattan. Arretrato rispetto ai fronti degli altri edifici, si erige su una piazza, staccandosi dalle costruzioni circostanti. La facciata è rivestita da curtain wall in bronzo e vetro scuro. L'interasse fra i pilastri è cresciuto notevolmente raggiungendo gli 8,50 m nelle due direzioni. Nella parte terminale dell'edificio è situato il piano tecnico con le attrezzature impiantistiche, motori ascensori, pompe serbatoi.

Gli edifici a torre di **Le Corbusier** trovano varie collocazioni nei piani urbanistici da lui progettati. Nel piano per una **città di tre milioni di abitanti**¹⁴ del 1922 dispone 24 edifici a torre a pianta cruciforme nel centro della città, opportunamente distanziati tra di loro da giardini. Ogni unità, sede della vita degli affari, può contenere da 10.000 a 50.000 impiegati. Le Corbusier attua un principio di proporzionalità fra attività differenti: il concentramento del terziario negli edifici a torre rende possibile lo sviluppo di unità residenziali in orizzontale, mantenendo ampi spazi di verde. Nel Piano di Algeri abbiamo una nuova proposta di edificio a torre, il **grattacielo del Quartier de la Marine**¹⁵ del 1938 con struttura a telaio indipendente, pareti in vetro, elementi frangisole. L'edificio, sede del centro degli affari, contiene parcheggi automobilistici su diversi livelli. Il grattacielo secondo Le Corbusier deve servire per ridare il verde alla città, non ad eliminarlo addensando le costruzioni. In uno studio su New York pensa a dei grattacieli molto alti in modo da ridurre lo spazio costruito in orizzontale e ridonare alla città ampi spazi di verde. Questo discorso sarà ricorrente nell'**Unites d'Habitation**¹⁶. L'edificio amministrativo ricorrente nei progetti di Le Corbusier presenta pianta a "T" con le due estremità del segmento orizzontale reclinate verso l'alto a 45 gradi.

Caratteristica negli edifici di **Alvar Aalto** è la pianta di forma irregolare, giustificata da una ricerca di luce, la miglior esposizione per ogni cellula abitativa ed, allo stesso tempo, l'indipendenza anche visiva tra gli alloggi. La casa torre **Nene Vahr**¹⁷ a Brema del 1958 è situata al centro di un complesso residenziale tra i più grandi d' Europa. L'edificio per alloggi contiene appartamenti per persone singole e coppie. La pianta disposta a ventaglio permette una buona illuminazione ad ogni locale. I mini-appartamenti sono tutti esposti a sud, il settore dei servizi è retrostante, a nord, in posizione ben distinta dal resto dell'edificio. In linea con il Nene Vahr, la casa torre **Schoubuhe** a Lucerna del 1965, mantiene la tipica pianta a ventaglio ma con l'inserimento di appartamenti con più locali.

Durante gli anni di apprendistato nello studio Adler e Sullivan, **Wright** inizia i suoi studi sui grattacieli che lo portano a definire nuove forme strutturali molto differenti dalla concezione della Scuola di Chicago dell'epoca. Al posto di un reticolo strutturale che ingabbia la costruzione, Wright dispone una struttura centrale portante, liberando i nuclei accostati da funzioni statiche. La prima applicazione è nel progetto per il **National Life Insurance**¹⁸ di Chicago nel 1924 dove la struttura centrale è una lamina, avente solo funzione strutturale di fondazione, sulla quale si innestano come ad incastro i grattacieli. Nella **St. Mark's Tower**¹⁹ a New York del 1929 la struttura di fondazione da laminare diviene una croce che sostiene a sbalzo gli appartamenti duplex. All'esterno si intravedono i solai soltanto ogni due piani, essendo il mezzanino arretrato. Ogni piano è sede di quattro appartamenti, i vani scale scorrono sulle facciate esterne. L'elio laboratorio a torre della **Johnson**²⁰ a Racine del 1944 continua il discorso della struttura centrale, questa volta con un pilastro cavo contenente le scale, gli ascensori, i servizi. I piani aggettanti rientrano alternativamente, come i duplex della St. Mark's tower. Il piano inferiore è a pianta quadrata mentre il mezzanino è a pianta circolare. La fondazione è composta da un pilastro di connessione al terreno circondato da una piattaforma di stabilità. Il rivestimento esterno è una cortina di vetro in lastre verticali interrotte da fasce marcapiano, una ogni due piani, rivestite in mattonelle. La **Torre Price**²¹ a Bartlesville del 1956 ripropone il progetto della St. Mark's Tower: presenta una pianta a croce con struttura in elevazione verticale e solai a sbalzo in conglomerato cementizio armato. I quattro fronti sono ognuno diverso dall'altro, con notevole complessità di forma, essendo caratterizzati alternativamente da linee verticali ed orizzontali. Il grattacielo, per Wright, non è inseribile nel centro urbano già saturo di edifici accostati, deve essere costruito in aperta campagna ottenendo la duplice funzione di incentivo alla vita comunitaria e di salvaguardia del territorio da una miriade di piccole costruzioni. Il piano di **Broadacre City**²² (1931-1935)

prevede grattacieli isolati che si inseriscono nel contesto variando la monotonia orizzontale. In alternativa alla città territorio orizzontale, Wright propone uno sviluppo unitario verticale nel progetto di grattacielo alto un miglio, **The Illinois**²³. In questo progetto fantascientifico si nota una megastruttura verticale a sostegno di 528 piani in aggetto. La fondazione è prevista con pilastro e piattaforma di stabilità nel terreno simile al Johnson Tower.

Molto ricorrenti nei piani urbanistici di **Kenzo Tange**, le torri sono sedi dei servizi, delle comunicazioni in verticale ed hanno una funzione di collegamento fra le grosse strutture residenziali ed amministrative. Nel **Centro delle Comunicazioni Yamanashi**²⁴ a Kofu (1961-1966) 16 torri cilindriche sostengono scale, ascensori, impianti per l'aria condizionata, montacarichi e servizi. Le torri sostengono i grossi blocchi orizzontali sedi delle società radiotelevisive. La torre servizi, separata visibilmente dal blocco dell'edificio, ricorre anche nel **Piano di ricostruzione per Skopje**²⁵, in ex Jugoslavia (1965 - 1966), dove sono presenti torri per uffici di varia altezza accostate in blocchi di più unità.

Nell' **Expo 1970**²⁶ di Osaka, le torri hanno funzione di riferimento in quanto sono punti di convergenza dei collegamenti viari, piattaforme semoventi per i pedoni, hanno funzione di controllo per le operazioni che si svolgono nella fiera e sono sede delle attrezzature per le telecomunicazioni. L'edificio amministrativo della società di stampa e radio diffusione **Shizuoka**²⁷ a Tokio (1966-1967) presenta un nucleo centrale cilindrico contenente i servizi. Su questo nucleo si innestano come i rami di un albero i blocchi uffici agganciati a sbalzo. L'**Hotel di 1000 camere**²⁸ sempre a Tokio del 1972 è un edificio a torre su pianta a "V". Le camere sono divise in zona a giorno e notte, sono disposte secondo un reticolo inclinato di 45 gradi sull'asse dell'edificio. La struttura dell'edificio è in acciaio mentre la parte bassa, contenente sale pubbliche, terrazza giardino e parcheggi, è costruita in conglomerato cementizio armato. Il grattacielo, grazie all'elasticità dei materiali impiegati, risponde perfettamente alle caratteristiche di anti sismicità. I fronti sono completamente rivestiti da curtain wall in vetro. Le **tre torri per residenze** a Teheran del 1974 sono posizionate su pilotis (porticato), soluzione ricorrente nell'architettura di Le Corbusier. Al centro della torre sono posizionati ascensori e servizi vari. Il sistema strutturale è formato da setti portanti di varia lunghezza. Nell'edificio trovano spazio negozi, parcheggi, ristoranti ed altre attrezzature.

1.3 Grattacieli in Italia

Sono numerosi gli edifici che superano i 100 metri d'altezza in Italia, primo dei quali, in ordine temporale, la **Torre Piacentini**²⁹, progettata dall'omonimo architetto e terminata nel 1940 a Genova, che conserverà il suo primato, inizialmente anche europeo, fino al 1954, anno di costruzione della **Torre Breda**³⁰ di Milano.

Dal punto di vista strutturale il primo grattacielo costruito in Italia è stato però il **Torrione**³¹, sempre di Marcello Piacentini: completato a Brescia nel 1932, rappresenta un adattamento del progetto uscito perdente al concorso per la Chicago Tribune Tower del 1922. I suoi 13 piani, uno in più del primo grattacielo di Chicago, l'Home Insurance Building del 1885, raggiungono i 57 metri d'altezza. Un numero del 1932 della rivista settimanale *L'Illustrazione Italiana* lo indicava come il più alto edificio in cemento armato d'Europa.

È durante il Fascismo che vediamo i primi esempi di grattacielo italiano: oltre al citato Torrione, in quegli anni sorsero, rispettivamente a Genova, Milano e Torino, la **Dante 2**³², la **Torre Snia Viscosa**³³ e la **Torre Littoria**³⁴, di altezze relativamente modeste ma particolarmente rilevanti per quanto riguarda l'architettura italiana. La guerra frenò questi primi esempi di costruzioni in verticale, per riprendere poi, con il boom economico italiano degli anni cinquanta, nella città di Milano, quello che sarebbe diventato in futuro il nuovo centro direzionale cittadino.

Molte di queste costruzioni sono peraltro piuttosto interessanti anche dal punto di vista storico-architettonico, rappresentando in alcuni casi eccellenti opere del razionalismo italiano, apprezzate e conosciute anche all'estero, in particolare il **Grattacielo Pirelli**³⁵ di Giò Ponti e Pier Luigi Nervi e la **Torre Velasca**³⁶ del gruppo BBPR, entrambi a Milano: il primo, con una forma finemente assottigliata ed elegante, si discosta dai modelli americani di grattacieli, mentre il secondo, avente una vaga immagine di palazzo pubblico medievale, era il risultato di un tentativo dei suoi progettisti di dare un'identità urbana al grattacielo tramite allusioni al contesto storico, provocando furore nella stampa internazionale per via del suo storicismo.

Allo stesso modo nella città di Genova lo sviluppo in verticale, complice anche la scarsità di aree edificabili, è proseguito ininterrotto durante tutto l'arco del '900, sebbene gran parte degli edifici, tranne rare eccezioni come il **Matitone**³⁷ e la **Torre Telecom Italia**³⁸, sia di altezza inferiore ai 100 m.

Infine, in epoca più recente, tra gli anni ottanta e novanta, nell'ambito di una vasta opera di riqualificazione di un'area dismessa di Poggioreale, quartiere di Napoli, si è vista la costruzione di un denso cluster di circa 15 grattacieli, di altezza compresa tra i 129 e i 70 m, il **Centro Direzionale**³⁹.

Il caso milanese.

In base alla classificazione internazionale e come riportato nel sito del **Ctuh** (*Council on Tall Buildings and Urban Habitat*), in Italia il grattacielo più elevato in base all'altezza strutturale (*height to architectural top*) è la **Torre Unicredit**⁴⁰ a Milano, pari a 231 m.

L'edificio più alto secondo il criterio del piano calpestabile (*highest occupied floor*) è invece il **Palazzo Lombardia**⁴¹, sempre a Milano, con un'altezza pari a 161 m.

Il **Grattacielo Pirelli**³⁵, di 127 m, sede principale degli uffici della Giunta Regionale della Lombardia, ha detenuto il record di edificio più alto dell'Unione Europea fino al 1966, anno di costruzione della **South Tower**⁴² di Bruxelles. Opera dell'architetto Giò Ponti e di una équipe di ingegneri di grande professionalità, tra cui Pierluigi Nervi, è un edificio moderno e internazionale e tuttavia classico, simbolo del boom economico della Milano del

dopoguerra. All'interno dei suoi 30 piani trovano posto la sala del Consiglio Regionale e gli uffici di otto Direzioni Generali.

Breve storia del Pirellone (1960)

Nel 1950 la società Pirelli decide di realizzare una nuova sede direzionale, che Alberto Pirelli già immagina essere un avveniristico grattacielo. Tra le varie alternative viene scelta l'area di Piazzale Duca d'Aosta, dove sorgono i vecchi stabilimenti della "Brusada", anche perché impone minori vincoli architettonici. Il grattacielo Pirelli si eleva da un basamento pentagonale impostato a perimetro del lotto compreso tra piazza Duca d'Aosta, via Pirelli e via Fabio Filzi. La pianta della torre consiste in due poligoni speculari accostati, separati dal corridoio centrale che va rastremandosi alle estremità, determinando la superficie sfaccettata, a "diamante", che si ritrova nella galleria interna. Larga nel punto più profondo 18,5 metri e lunga 70,4 metri, la pianta così sviluppata ha creato non pochi problemi alla determinazione della struttura, dato il basso rapporto fra le dimensioni. La caratteristica strutturale fondamentale è data dalla concentrazione dei carichi dei solai sul minor numero possibile di strutture portanti, cosicché la superficie resistente necessaria a sostenere i carichi verticali, riunita in pochi pilastri di appropriata forma, dà ai pilastri stessi la rigidità necessaria per resistere alle imponenti azioni orizzontali. Il volume si innalza fino a 127 metri da terra, al tempo della sua costruzione uno dei grattacieli più alti d'Europa. Lo slancio delle sottili testate rastremate come una lama è sottolineato dalla profonda fenditura mediana, corrispondente ai collegamenti verticali di emergenza. Lo sviluppo in altezza sottolinea il vuoto circostante nonostante i due corpi bassi che affiancano la torre: uno frontale, sorta di piazzale sopraelevato per l'ingresso di rappresentanza, e uno posteriore. In copertura, oltre una terrazza panoramica, si libra nel cielo una veletta sospesa. L'interno è organizzato su un modulo da 95 cm, origine di una maglia quadrata che distribuisce le pareti mobili, consentendo la definizione elastica degli ambienti, e che ricorre nel design delle porte e degli arredi. La scelta delle finiture risponde a ragioni di rappresentatività, e attraverso il colore vengono sottolineate continuità e discontinuità.

Breve storia del Palazzo Lombardia (2010)

Il **Palazzo Lombardia** è un complesso unitario di edifici, tra cui un grattacielo alto 161,3 metri, in cui ha sede la giunta regionale della Lombardia con la presidenza e la totalità degli assessorati. Il complesso si sviluppa nella piazza Città di Lombardia, adiacente a via Melchiorre Gioia. Attualmente è l'edificio col tetto più alto d'Italia.

Il complesso è risultato vincitore di un concorso internazionale indetto dalla Regione Lombardia: vennero presentati ben 98 progetti, ridotti a 10 dopo una prima selezione. Ad aggiudicarsi la gara è stato il gruppo composto da *Pei Cobb Freed & Partners* di New York nonché *Caputo Partnership* e *Sistema Duemila*, entrambi di Milano.

L'edificio è situato in un'area di 33.700 metri quadrati compresa tra le vie Melchiorre Gioia, Restelli, Algarotti e Galvani. La nuova sede è composta da una torre di 161 metri in calcestruzzo armato, acciaio e vetro, circondata da un sistema complesso di edifici curvilinei, alti dai sette ai nove piani, in cui sono concentrate le funzioni culturali, di intrattenimento e servizio, collegati da una piazza di forma ovoidale con una copertura in materiale plastico. Tale piazza è stata denominata "Piazza Città di Lombardia" ed è la piazza coperta più grande d'Europa. La piazza ospiterà diverse attività, fra cui un ufficio postale, una scuola materna, un auditorium, diversi ristoranti e caffetterie. L'Area include più di 26.000 m² di parcheggio interrati, 3.300 metri quadrati previsti di aree a bosco e 7000 m² di giardino pensile. Un'elisupeficie sorge su uno dei corpi bassi.

Il progetto ha previsto soluzioni tecnologiche avanzate, quali un sistema a travi fredde con utilizzo di pompe di calore ad acqua di falda, studiato sia per il riscaldamento che per il

raffreddamento; inoltre, alcune facciate della torre sono provviste di pannelli fotovoltaici che garantiscono una parte dell'energia necessaria al funzionamento delle attività al suo interno; infine, è presente un muro climatico, costituito da un'intercapedine tra i vetri esterni della facciata e quelli interni, che raccoglie il calore solare permettendone la riutilizzazione.

Il prestigioso Council of Tall Buildings and Urban Habitat (Ctuh) di Chicago ha premiato il Palazzo Lombardia come miglior grattacielo d'Europa per il 2012, premiandone il design, la sostenibilità e l'innovazione. È stato il primo edificio italiano a ricevere questo premio.

L'area su cui ora sorge l'edificio era precedentemente occupata dal cosiddetto Bosco di Gioia, un ex vivaio abbandonato, sorto su alcuni terreni lasciati in eredità all'Ospedale Maggiore di Milano da Giuditta Sommaruga. La loro storia era stata particolarmente controversa: la contessa Giuditta Sommaruga alla propria morte li aveva infatti lasciati in eredità insieme all'annessa abitazione in *via Melchiorre Gioia* all'Ospedale Maggiore, che ne avrebbe dovuto mantenere la cura, destinandoli a *scopi Ospitalieri* o che comunque lenissero *le sofferenze dell'umanità*, perpetuando la memoria della madre Emilia Longone, vedova Sommaruga. Sui terreni vi era già stabilito un vivaio, che continuò per diversi decenni la propria attività. Nel frattempo, in seguito alla divisione dell'Ospedale Maggiore nei due enti ospedalieri Policlinico e Niguarda, la proprietà del terreno passò a quest'ultimo, che lo vendette nel 1983, con autorizzazione definitiva della Giunta Regionale (essendo questo un bene inalienabile) del 1988. Il vivaio venne sfrattato nel corso del 2001: da allora le varietà arboree lì presenti continuarono a crescere spontaneamente e indisturbate, mentre l'area - tecnicamente non accessibile al pubblico - era diventata un ricettacolo della prostituzione e dello spaccio locale.

Verso la fine del 2005 l'area del Bosco di Gioia tornò sotto i riflettori, perché era ormai prossimo il suo abbattimento, in vista dell'apertura dei cantieri della nuova sede della Regione.

Breve storia della Torre Unicredit (2011)

Torre Unicredit è il grattacielo più alto collocato nel progetto Porta Nuova, a ridosso di corso Como e della stazione Garibaldi, lungo via Don Luigi Sturzo, all'interno del Centro Direzionale di Milano. Al centro del complesso trova posto piazza Gae Aulenti. Il complesso è stato progettato dall'architetto César Pelli e realizzato dalla società immobiliare Hines Italia ed è sede della direzione generale di UniCredit. La torre Unicredit, con i suoi 231 metri di altezza, è anche il più alto edificio d'Italia. Il complesso è composto da una serie di palazzi ecosostenibili in vetro e acciaio, disposti attorno ad una piazza circolare da un diametro di 100 metri, detta "podio" e in fase di realizzazione, interamente pedonale e rialzata di 6 metri rispetto al livello della strada. I tre edifici si dispongono a semicerchio intorno ad essa, innalzandosi su diversi piani:

- **La torre Unicredit**, conta 32 piani ed è alta 231 metri, attestandosi così come il più elevato edificio italiano (l'edificio conta circa 146 metri, più gli 85 della guglia).
- **La torre B**, conta 22 piani in circa 100 metri di altezza.
- **La torre C**, conta 12 piani e misura circa 70 metri di altezza.

Lo *spire* o guglia sopra la torre A, posata a settembre 2011, è alta 85 metri ed è interamente rivestita di led che possono assumere diversi colori a seconda della ricorrenza (una delle combinazioni è il tricolore italiano).

1.4 La querelle al giorno d'oggi

Recentemente, a seguito dei processi di riqualificazione e trasformazione di importanti aree produttive, fieristiche e carcerarie all'interno della città di Milano, il dibattito su una possibile applicazione di un modello verticale di città è tornato ad essere di grande attualità, esprimendosi con significativi confronti interdisciplinari.

Iperboli giornalistiche, poi, annunciano addirittura l'avvio di una sorta di "Rinascimento Milanese", che vede oggi Milano come laboratorio creativo progettuale al quale partecipano le più note firme internazionali dell'architettura.

Effettivamente, già nell'immediato dopoguerra, Milano ha vissuto un periodo particolarmente felice e irripetibile, in termini di qualità architettonica, in cui i migliori architetti, di formazione e origine milanese, si sono confrontati sul tema della ricostruzione: Albini, BBPR, Ponti, Gardella, ed altri.

In parallelo a questo, Milano negli anni '50 e '60 ha vissuto poi il periodo magico corrispondente alla nascita del design industriale con Zanuso, Magistretti, Castiglioni, J. Colombo, ed era in atto, allora, una vera e propria fucina di talenti.

Può Milano, oggi, essere paragonata alla Firenze del Brunelleschi o alla Roma di Michelangelo? Il Rinascimento italiano apriva le porte ad una nuova esplosione creativa in tutti i campi artistici, lasciandosi alle spalle i cosiddetti secoli bui del Medioevo, come oggi si lascia la stagnazione degli ultimi 20 anni.

Alcune deboli analogie possono essere tracciate tra i progetti di trasformazione e rifacimento urbano tipici del Rinascimento con quelli attualmente in atto nell'area milanese, e soprattutto tra le eccezionali occasioni lavorative che si erano presentate allora agli artisti rinascimentali con quelle attuali, dovute però oggi più ad un maggiore liberismo urbanistico e speculativo che ad una illuminata committenza.

Anche allora, per una sorta di "internazionalizzazione" ante-litteram, architetti stranieri operavano nel ventre delle città italiane, un po' come oggi avviene a Milano, dove un architetto cinese, *Pei*, si aggiudica il progetto della nuova sede della Regione Lombardia, un americano, *Pelli*, disegnerà la nuova sede comunale, un inglese, *Foster*, ridisegna la più grande area ex-industriale cittadina di Rogoredo, un giapponese, *Ando*, taglia gli spazi della moda, ed uno svizzero, *Botta*, opera addirittura sul vero cuore della città: la Scala.

Di certo l'arditezza della Cupola del Brunelleschi o la bellezza imponente di quella del Michelangelo non possono essere paragonate alle architetture verticali dei nuovi interventi a Milano.

Il vuoto miserabile degli anni '80 e '90 è finito, ma nulla induce a pensare che si sia di fronte ad un periodo memorabile: è solo una fase positiva, importante, che lascerà segni significativi nel tessuto urbano edilizio, così come fece la Milano futurista, la Milano eclettica e quella fascista.

Nel contesto attuale, intellettuali, architetti, sociologi, analizzano il processo di sviluppo e trasformazione della città applicando diversificati indici e parametri di valutazione; vengono determinati, così, risultati e conclusioni molto diverse tra loro.

Una parte degli architetti ritiene che si debba rivedere criticamente i modelli di sviluppo urbano, la città in verticale sembra essere un mito in crisi: [...] *costruire in altezza oggi non è più funzionale, è una forzatura se non lo impone la forma del terreno. I grattacieli necessitano intorno degli spazi enormi, per la creazione di giardini che li rendano umani. Londra è attraversata da un grande fiume, ha orizzonti vasti su cui i grattacieli non incombono; Milano il fiume e gli spazi non li ha. Le nazioni asiatiche si ispirano al peggio del modello occidentale trasformando le loro città in una caricatura di quelle americane, distruggendo i loro tessuti storici e assurgendo le torri a simboli di ricchezza, prestigio e potere sopra alle periferie degradate.* [...] (Botta, intervista per la città di Sarzana).

Secondo questa opinione bisogna rivendicare, inoltre, il primato di una condizione dell'habitat radicata alla geografia, alla storia e alla cultura, dove l'uomo cerca le proprie radici e consolida le proprie tradizioni. L'edificio non deve essere un oggetto di design in sé, senza storia né memoria.

Allineati su questo filo di pensiero, altri ritengono che sia assolutamente necessario invertire il processo di localizzazione nelle periferie delle parti più povere della società, fenomeno dovuto non solo a motivazioni economiche legate alla rendita fondiaria, ma soprattutto è un fattore simbolico e culturale della civiltà.

[..] Le funzioni, affinché la città "funzioni", devono essere mescolate; il modello razionalista non ha funzionato, mentre l'esempio delle città storiche rappresenta, ancora oggi, un modello riuscito e convincente. I grattacieli non sono un toccasana per la vivibilità della città contemporanea, ma rispondono principalmente a questioni di carattere finanziario. Dal punto di vista funzionale non rappresentano un modello convincente in termini di vivibilità nel contesto urbano, che potrebbe essere migliorata con azioni di intervento nel sistema della viabilità e nell'emissione di inquinanti [..] (Campos Venuti, Città senza cultura).

Criticamente si sostiene poi che *[..] Lo sviluppo non controllato dei grattacieli, dettato dalla logica della massimizzazione dei profitti, ha prodotto edifici che hanno deformato i centri urbani, deturpato gli spazi pubblici, indebolito la vitalità di altri comparti dell'organismo urbano [..] (J. H. Kunstler, Manhattan Gothic).*

D'altro canto altri critici esprimono opinioni favorevoli nei confronti di questo modello di sviluppo.

Il grattacielo può essere interpretato come uno strumento per creare nuovi panorami artificiali e metropolitani, con una forte valenza espressiva sulla cui immagine è necessaria la riconoscibilità e l'accordo della gente. *[..] Le proporzioni del grattacielo sono un forte elemento di demarcazione del territorio, quindi con una grande funzione geografica [..] (R. Vinoly, A Ground Zero Diary).*

Nel caso specifico di Milano, il suo skyline⁴³ è contrappuntato da numerose torri storiche, moderne, tecnologiche. *[..] La creazione di corone di torri attorno ad uno spazio aperto, diradando il suolo e verticalizzando le volumetrie è un processo di ricomposizione della città che spinge le dinamiche immobiliari del capitale privato ad interessarsi, in modo compiuto, ad un ridisegno complessivo anche degli spazi collettivi [..] (Boeri).*

Altri ritengono che la bellezza e il carattere dell'architettura si può esprimere, com'è avvenuto storicamente con le cattedrali gotiche, attraverso la verticalità.

Le opere storiche colossali, cariche di un forte carattere simbolico, trasmettono la loro modernità fino ad oggi.

Con l'avvento, nel '900, dell'edificazione in verticale in modo più diffuso, grazie all'uso di evolute tecnologie costruttive, il concetto di "paesaggio" ha subito una considerevole evoluzione, nell'accezione comune di spazio libero, vuoto, si è aggiunta quella di skyline costruito e costituito da porzioni vuote e piene di elementi verticali.

Secondo i fautori della verticalità, l'edificazione in alto deve coniugare il progresso, la bellezza, la funzionalità, non deve essere espressione della vanità di un popolo ma del loro entusiasmo e della ricerca tecnologica.

Milano non si è posta il problema della densità urbana, e dal secondo dopoguerra si è dilatata a dismisura, soprattutto in direzione Nord, dove il territorio fino a Como e Varese risulta urbanizzato in modo continuo, una sorta di città infinita.

Non ponendosi il problema della dilatazione a dismisura, in orizzontale, la metropoli determina un continuo consumo di suolo a detrimento della ricchezza del tessuto rurale tipico della pianura padana, che è una grande ricchezza paesaggistica da tutelare.

Vengono assunte opinioni maggiormente bilanciate anche tra molti addetti e studiosi, che, pur riconoscendo alcuni risvolti negativi legati ad un processo di trasformazione urbana

legato ad un modello verticale, riconoscono i benefici e i vantaggi che questo modello può rendere alla città.

Una struttura verticale della città ha senso se si crea uno spazio urbano, un pezzo di costruzione della città in relazione anche al sistema dei servizi e della fruibilità collettiva.

[..] Si ribadisce la necessità di un contesto e di una situazione che giustifichi la scelta tipologica, che non deve mai essere assunta a priori [..] (De Carlo, Conversazioni con Giancarlo De Carlo. Architettura e libertà).

Altri pongono l'accento sull'aspetto energetico dell'edificio a torre: *[..] bisogna tenere in considerazione il problema del risparmio energetico, poiché i grattacieli sono una macchina costosissima per i costi edilizi, per l'energia del condizionamento, per gli elevati costi di manutenzione. E' importante, nella progettazione, tenere in considerazione le problematiche del risparmio energetico, dei recuperi di calore, dei sistemi di ventilazione, dei materiali e le tecnologie. Grattacielo non è solo un problema di forma urbis [..] (Beltrami Gadola, articolo su La Repubblica).*

Per altri non sono accettabili modelli di sviluppo nostalgico-romantici legati solo ad un valore paesistico-pittoresco.

Così come l'orizzontalità delle cascate, rispecchiando costruttivamente l'orizzontalità della pianura, rappresenta un rapporto di conciliazione, di alleanza con la natura, anche il verticalismo delle torri può essere in piena armonia con il paesaggio.

Bisogna infatti ricordare l'insegnamento di Vitruvio, che nel suo trattato parla della docilità verso la natura, che si esprime attraverso l'architettura come imitazione dei processi naturali, una disciplina che, costituita di artifici, costruzioni in opposizione alla natura, ma anche in perfetta consonanza con essa perché ne utilizza l'insegnamento che si può cogliere dai processi naturali.

[..] Il paesaggio e l'architettura, si depositano nella nostra memoria e diventano un elemento che interagisce continuamente nel nostro pensiero. Un segno architettonico non si esaurisce nella sua funzione, ma il suo rapporto con il paesaggio costituisce un valore culturale a sé, che ha un altissimo valore. Il paesaggio rappresenta, attraverso una piena armonia tra naturale e artificiale, un esempio altissimo di equilibrio. Sostenibilità e sviluppo sono concetti che procedono parallelamente. Tradizione deriva dal termine tradere, cioè tradimento, infatti la storia è sempre stata un tradimento, una interpretazione [..] (Portoghesi, Geoarchitettura. Verso un'architettura della responsabilità).

In conclusione emerge che l'inserimento delle tipologie a torre nel contesto storico delle città europee, caratterizzato da un modello di insediamento industriale, in cui i rapporti dimensionali tra parti costruite e spazi pubblici non edificati aveva una sua coerenza e un preciso equilibrio armonico, introduce necessariamente effetti innovativi che potrebbero avere ricadute negative in termini di impatto visuale e paesaggistico, viabilità e trasporti, impoverimento sociale, inquinamento.

Un modello verticale di città risulta quindi convincente se sostenuto da tecnologie costruttive eco-compatibili, sistemi infrastrutturali idonei alle nuove densità, progetti basati su un sistema coordinato di disegno degli spazi pubblici e di aggregazione, plurifunzionalità delle superfici abitabili, coerenza con il sistema ambientale e gli spazi verdi della città, rifiuto verso linguaggi compositivi dettati da manieri neo-moderni non riconducibili alle specificità dei luoghi.

Di fondamentale importanza, così come per qualsiasi intervento edilizio, a maggior ragione per le torri, si deve tener conto di una valutazione complessiva del sistema ambientale in cui viene inserita, mediante lo studio del rapporto e dell'impatto sul paesaggio, della permeabilità delle aree e il grado di occupazione di esse, del traffico indotto e dell'accessibilità.

Dovranno essere fatte valutazioni in ordine all'inserimento paesaggistico delle masse volumetriche mediante lo studio visivo tipo-morfologico e dovranno essere valutati gli

aspetti legati al decoro urbano, ovvero la coerenza del carattere e delle tipologie dell'intervento col tessuto urbano.

Inoltre, a dispetto di quanto sosteneva Benedetto Croce in "*Problemi di Estetica*" nel 1923 riguardo l'estraneità dell'economia all'arte architettonica, oggi appare sempre più evidente quanto debba essere, invece, stretto il connubio tra le due discipline, economia e funzionalità, che sono due ingredienti essenziali nell'evoluzione e nella trasformazione della città contemporanea.

Qualità dei progetti, nuovi spazi di aggregazione, architetture interattive, trasparenti, accessibili, sono gli imperativi che emergono dal dibattito interdisciplinare in fase di svolgimento a Milano, dove 7 milioni di metri quadrati di aree attendono una riqualificazione urbanistica complessiva.

Appare evidente come l'urbanistica, per rispondere pienamente ai processi di evoluzione urbana, debba sempre più avvalersi degli apporti pluridisciplinari sconfinando nei settori dell'estetica, del design, dell'ecologia e della psicologia collettiva.

I grandi progressi delle scienze e delle arti sono avvenuti ai margini, e non all'interno, delle discipline, in un territorio non codificato o istituzionalizzato.

¹ Foto a pag.18

² Foto a pag.18

³ Foto a pag.18

⁴ Foto a pag.18

⁵ Foto a pag.19

⁶ Foto a pag.19

⁷ Foto a pag. 20

⁸ Foto a pag. 20

⁹ Foto a pag. 20

¹⁰ Foto a pag. 20

¹¹ Foto a pag. 21

¹² Foto a pag. 21

¹³ Foto a pag. 21

¹⁴ Foto a pag. 21

¹⁵ Foto a pag. 22

¹⁶ Foto a pag. 22

¹⁷ Foto a pag. 22

¹⁸ Foto a pag. 22

¹⁹ Foto a pag. 23

²⁰ Foto a pag. 23

²¹ Foto a pag. 23

²² Foto a pag. 23

²³ Foto a pag. 24

²⁴ Foto a pag. 24

²⁵ Foto a pag. 24

²⁶ Foto a pag. 25

²⁷ Foto a pag. 25

²⁸ Foto a pag. 25

²⁹ Foto a pag. 25

³⁰ Foto a pag. 26

³¹ Foto a pag. 26

³² Foto a pag. 26

³³ Foto a pag. 27

³⁴ Foto a pag. 27

³⁵ Foto a pag. 27

³⁶ Foto a pag. 27

³⁷ Foto a pag. 28

³⁸ Foto a pag. 28

³⁹ Foto a pag. 28

⁴⁰ Foto a pag. 29

⁴¹ Foto a pag. 30

⁴² Foto a pag. 31

1.5 La sfida dell'uomo

Futuro

[..] Anno 2150. Un uomo si affaccia alla finestra del 578° piano; il suo sguardo corre veloce, abbracciando la città fino all'orizzonte, fin laggiù, dove alti pinnacoli svettano. Il mare è completamente costellato da piccoli agglomerati urbani galleggianti dove abitano migliaia di persone; ma quelle isole una volta non esistevano, sono artificiali: sulle antiche cartine geografiche, risalenti ad un secolo prima, non ce n'è alcuna traccia. L'uomo è felice, la sua casa è piena di luce. Abita in un posto bellissimo che non abbandona mai, così come gli altri 400.000 inquilini che lì risiedono e lavorano, senza mai muoversi dal proprio appartamento, grazie a postazioni telematiche. E andando negli altri piani fanno shopping, vanno in palestra, a scuola, al cinema, si incontrano e si sposano.. Questa è la vita nel mega-grattacielo del futuro [..] (Adriana Tisselli, Cyber Architettura)

Passato

Fu solo grazie all'evoluzione delle tecnologie costruttive e all'utilizzo del calcestruzzo e dell'acciaio, e all'invenzione dell'ascensore da parte del signor Otis, che si resero possibili imprese come il **Chrysler Building**, inaugurato nel 1930 a Manhattan, un vero gioiello di art déco di ben 319 metri; e poi l'**Empire State Building**, costruito in soli tredici mesi, che nel 1931 raggiunse quota 381 m; e ancora le **Sears Towers di Chicago**, 443 m. Finché nel 1966, per riqualificare la zona di downtown a New York si decise la costruzione delle **Twin Towers**, vere e proprie città verticali con il loro mezzo chilometro d'altezza, scomparse tragicamente l'11 settembre 2001. Ma mentre il grattacielo nasce da una precisa esigenza di risparmiare nell'acquisto e nell'urbanizzazione del terreno a parità di superficie utile, lo sviluppo in altezza di questi edifici finisce per far crescere a dismisura i costi riservati alle tecnologie necessarie per consentire l'abitabilità. E se questo ostacolo è parso finora trascurabile, l'11 settembre ci ha costretto a rivedere il nostro modo di abitare le grandi città.

Presente

Qualcuno la chiamerebbe Utopia, altri l'hanno chiamata la Torre del Millennio: sarà alta 600 metri e avrà 150 piani, ben una volta e mezza le Petronas di 452 metri, a Kuala Lumpur, in Malaysia. Ma già è pronto un concorrente: il World Financial Center di Shanghai, con 460 metri d'altezza. Un'inezia se confrontata con Aeropolis: una struttura di 2000 metri di altezza con 500 piani, realizzabile – secondo le stime dei costruttori giapponesi – nel giro di 30 anni. Un vero e proprio termitaio per 140.000 residenti e 300.000 impiegati. Questa costruzione, progettata dall'architetto Norman Foster, non sarà un semplice grattacielo, ma una città verticale in grado di ospitare 2000 residenti, 17mila impiegati, uffici, ristoranti e centri commerciali. Ma il vero mostro potrebbe essere X Seed 4000, dove il numero indica i metri di acciaio, cemento e vetro lanciati verso l'alto. Progettato dalla Taisei, una società nipponica, presenta una forma conica simile a quella del monte Fujiyama, e conterrebbe un milione di inquilini, costituendosi come un organismo totalmente autosufficiente quanto a servizi, divertimenti e residenze. Grandi ascensori a levitazione magnetica trasporterebbero, in tempi quasi istantanei, migliaia di persone su e giù per questa enorme struttura... dove potrebbe persino nevicare in piena estate! La concezione dell'altezza come sfida dell'uomo verso il cielo si perde nel lontano passato, con la leggenda della Torre di Babele che ritorna sinistramente alla mente.

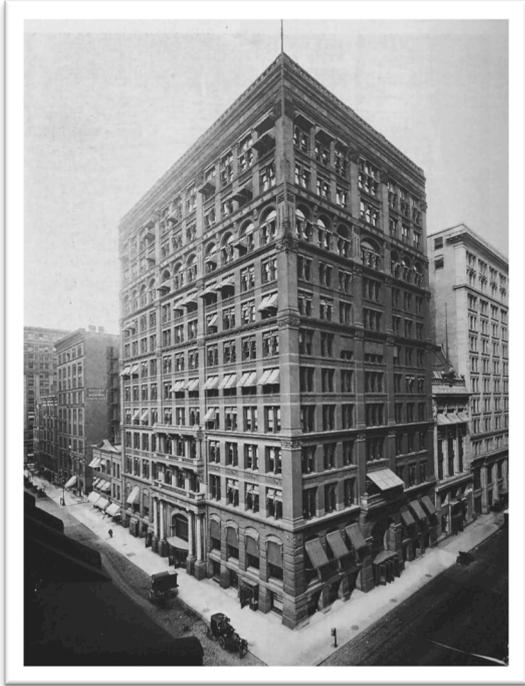


Foto 1: Home Insurance Building, Chicago, 1883



Foto 2: Leiter Building, Chicago, 1889



Foto 3: Reliance Building, Chicago, 1890



Foto 4: Chicago Tribune, Chicago, 1922



Foto 5: Singer Building, New York, 1908

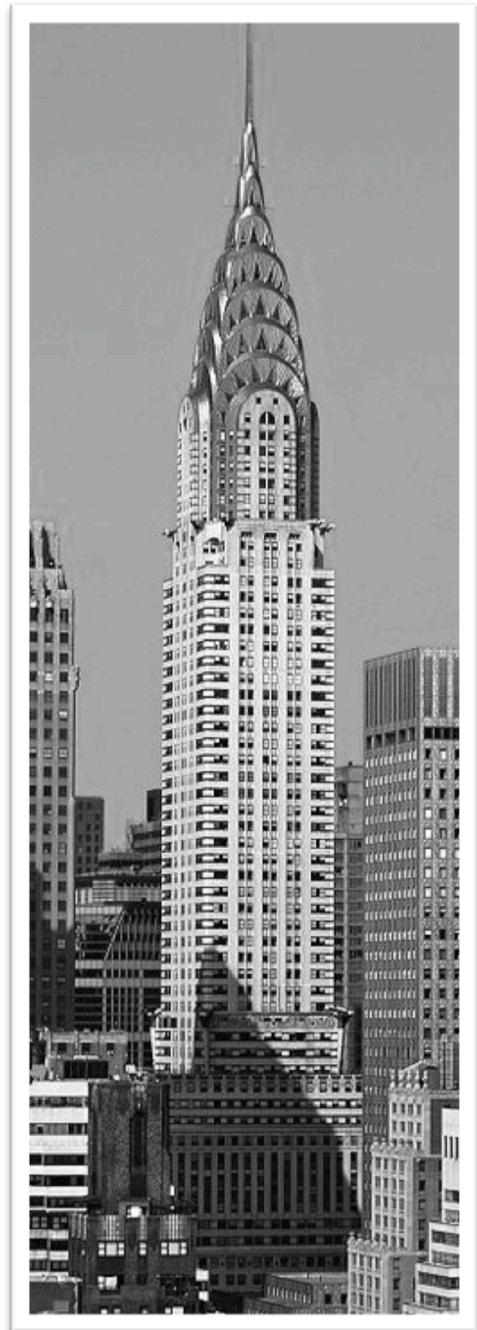


Foto 6: Chrysler Building, New York, 1930



Foto 7: Empire State Building, New York, 1930



Foto 8: Master Building, New York, 1930



Foto 9: Rockefeller Center, New York, 1939



Foto 10: Promontory Apartments, Chicago, 1946



Foto 11: Lake Shore Drive Apartments, Chicago, 1951



Foto 12: Commonwealth Ap., Chicago, 1956

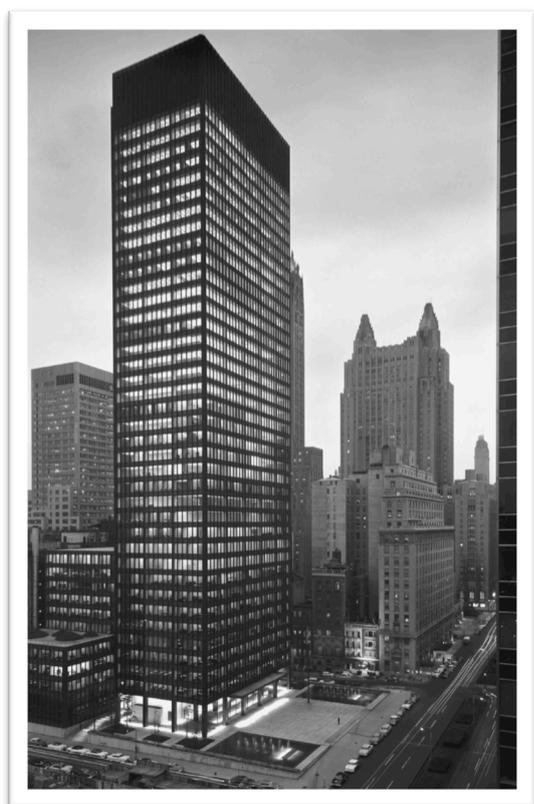


Foto 13: Seagram Building, New York, 1958



Foto 14: Città per 3 mln di abitanti, progetto del 1922

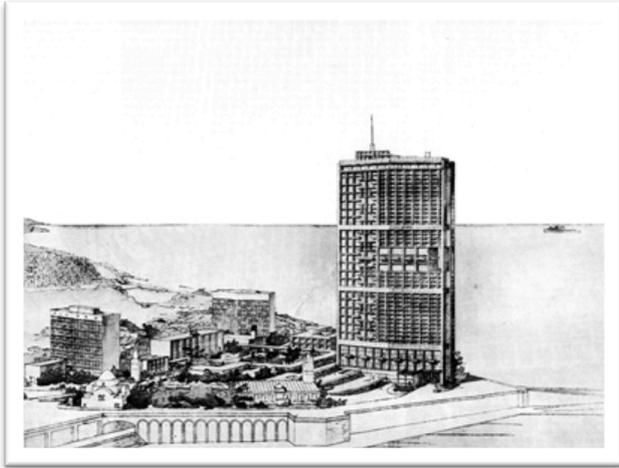


Foto 15: Quartier de la Marine, Algeri, 1938

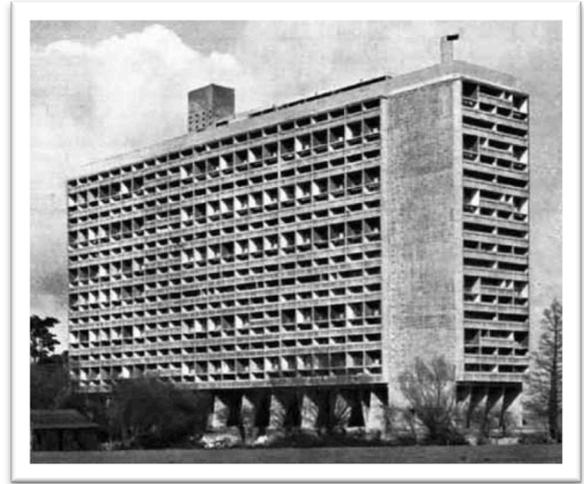


Foto 16: Unité d'Habitation, Marsiglia, 1946



Foto 17: Nehne Var, Brema, 1958

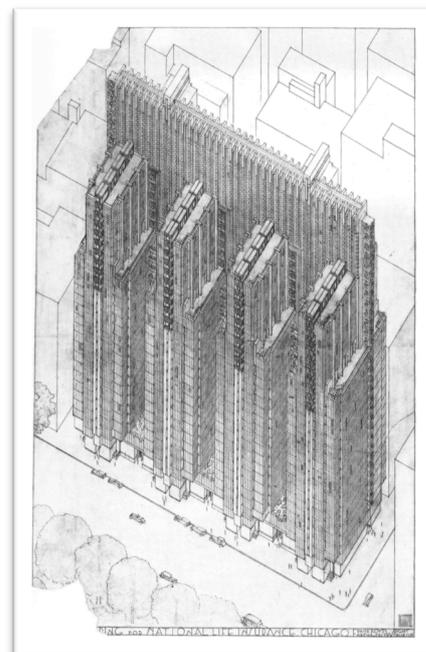


Foto 18: National Life Insurance, Chicago, 1924

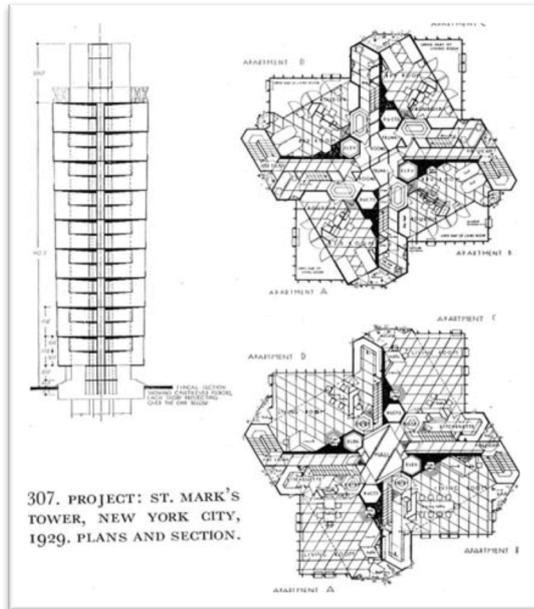


Foto 19: St. Mark's Tower, New York, 1929

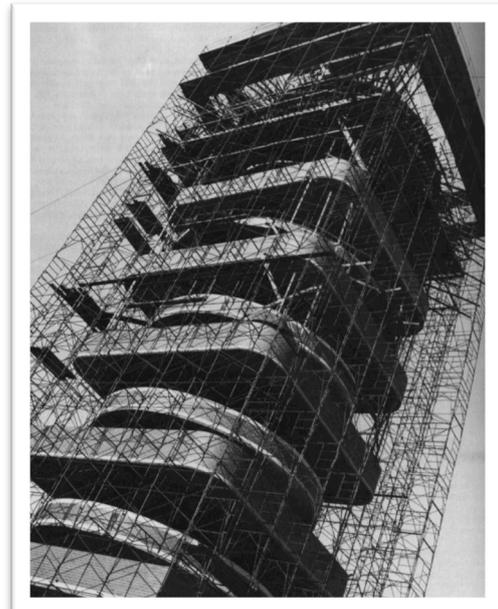


Foto 20: Johnson's Tower, Racine, 1944

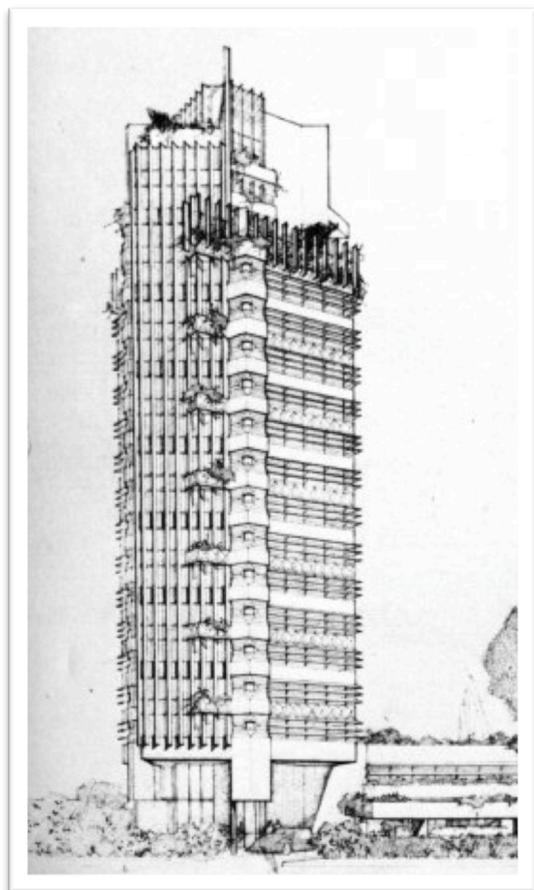


Foto 21: Price Tower, Bartlesville, 1956



Foto 22: Broadacre city, progetto del 1935

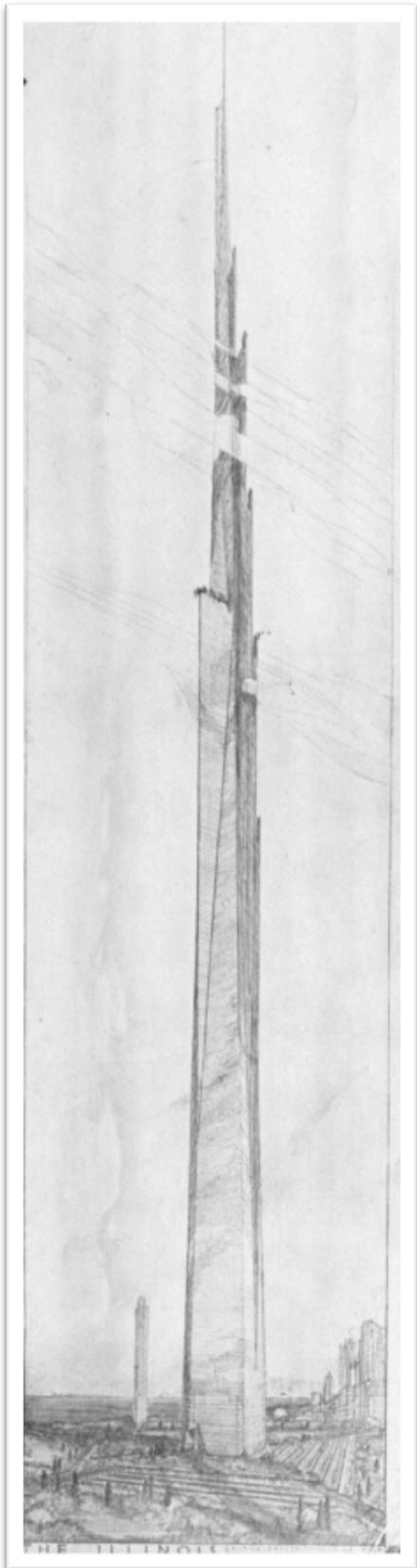


Foto 23: The mile-high Illinois, Chicago, 1956

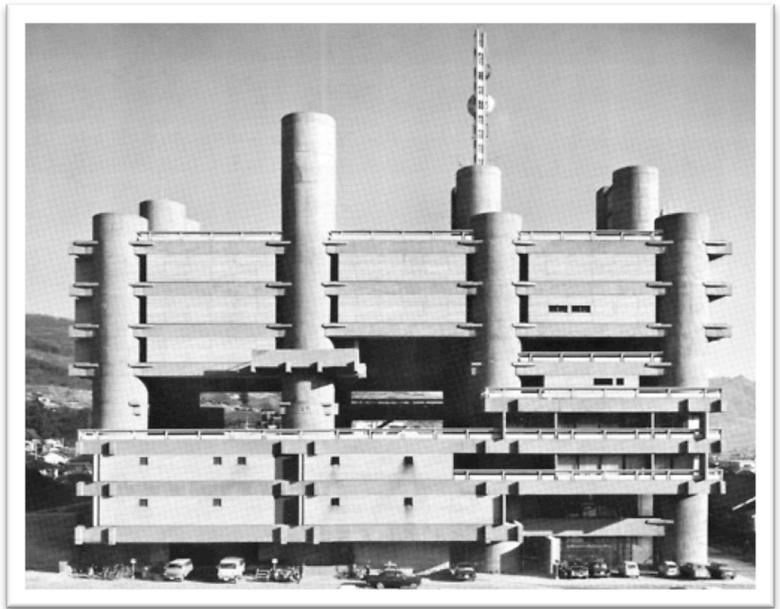


Foto 24: Centro delle comunicazioni, Yamanashi, Kofu, 1966



Foto 25: Piano di ricostruzione, Skopje, 1966



Foto 26: Progetto per l'Expo, Osaka, 1970

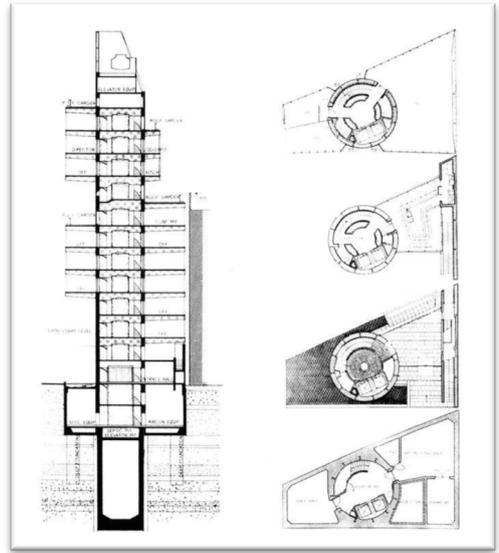


Foto 27: Torre Shizuoka, Tokio, 1967



Foto 28: Hotel 1000 Camere, Tokio, 1972



Foto 29: Torre Piacentini, Genova, 1940



Foto 30: Torre Breda, Milano, 1954

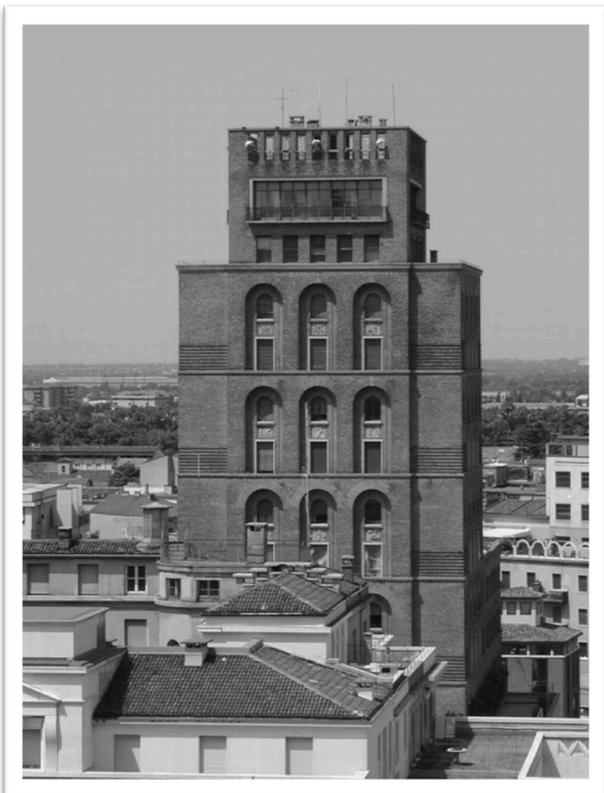


Foto 31: Torrione, Brescia, 1932



Foto 32: Torre Dante 2, Genova, 1939

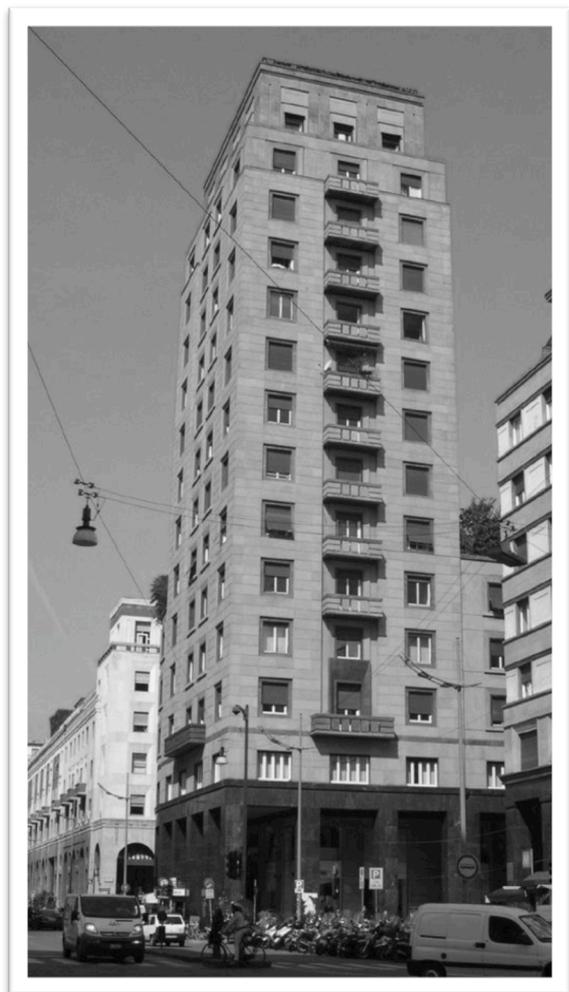


Foto 33: Torre Snia Viscosa, Milano, 1937



Foto 34: Torre Littoria, Torino, 1934



Foto 35: Grattacielo Pirelli, Milano, 1960



Foto 36: Torre Velasca, Milano, 1958

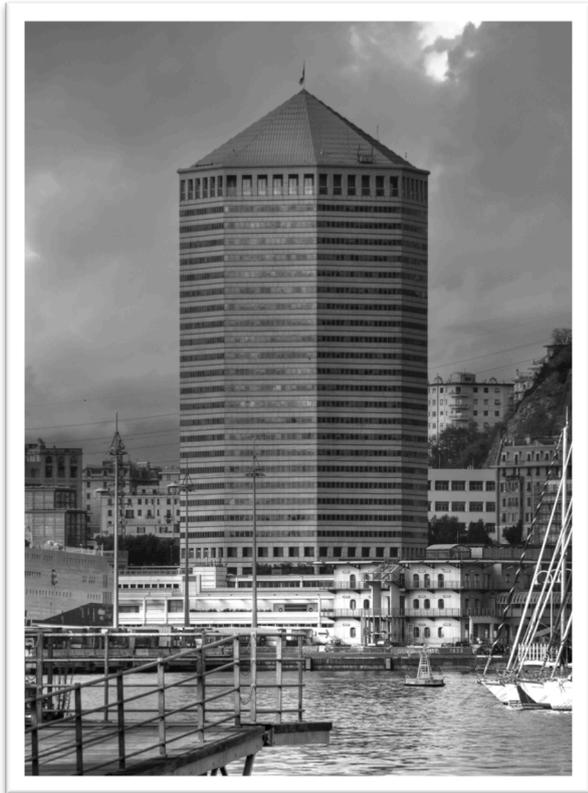


Foto 37: Matitone, Genova, 1992

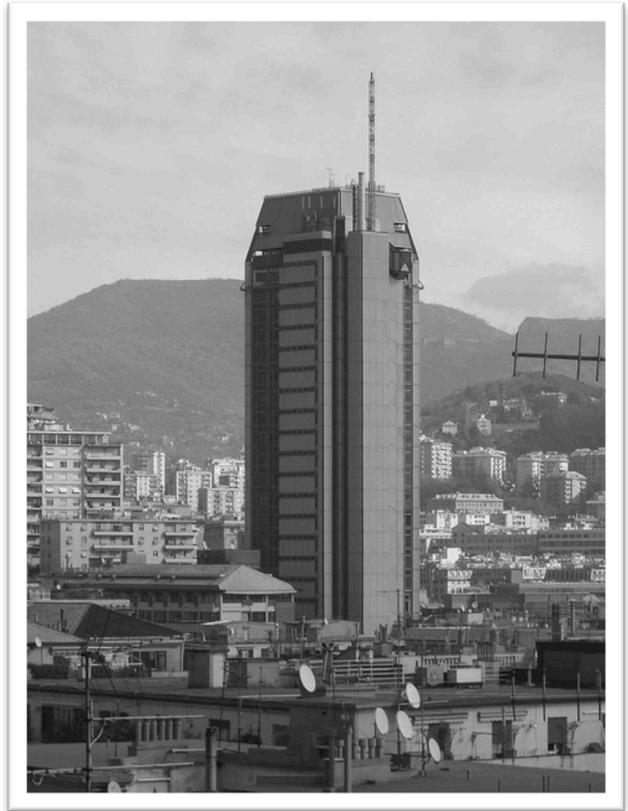


Foto 38: Torre Telecom Italia, Genova, 2000



Foto 39: Centro Direzionale, Napoli, 1995



Foto 40: Torre Unicredit, Milano, 2011



Foto 41: Palazzo Lombardia, Milano, 2010



Foto 42: South Tower, Bruxelles, 1966

2. Cenni generali sulle strutture

2.1 Le strutture in architettura

Il rapporto che lega l'universo della struttura con quello dell'architettura è imprescindibile. Molteplici sono le definizioni, date nel corso delle varie epoche storiche, del concetto di struttura e di quello di architettura. E' opportuno sottolineare il legame che esiste tra l'idea di struttura-architettura e il concetto di spazio, ed è altrettanto appropriato evidenziare il rapporto tra queste correnti e tutti gli aspetti dell'espressione di una società. In un panorama così vasto, il nesso che lega l'architettura alla struttura è dunque molto stretto, ed è proprio la struttura a essere il mezzo che consente all'architettura di presentarsi come tale. Nel corso del tempo tale nesso è stato fortemente vincolato alla conoscenza dei materiali e soprattutto delle tecniche costruttive; ma, all'inizio del XXI sec., non è più così, e tutto ciò che un tempo era definito e costituiva un vincolo è diventato oggi una capacità, una possibilità. La forza di questo potenziale si esprime in organismi architettonici plastici che sembrano sfidare le regole della fisica, della statica e della tecnica di costruzione.

L'evoluzione costruttiva dell'architettura si sta avviando verso una sempre più evidente libertà stilistica, in continuo ed esponenziale aumento. In tutto il mondo si assiste a una crescente proliferazione di edifici spettacolari dalle forme e dalle dimensioni ardite; questi primi anni del XXI sec. sono stati certamente caratterizzati da una sempre maggiore tendenza verso l'inconsueto. Anche se l'originalità e la volontà di realizzare edifici fuori dal comune non sono concetti nuovi tra gli architetti, ora il progresso tecnologico e la maggiore consapevolezza delle proprie capacità stanno rendendo sempre più concreta la possibilità di realizzare edifici dalle forme prima inimmaginabili. Se, dunque, si può identificare nella storia un'incessante tendenza, da parte degli architetti, alla progettazione di opere fantastiche, attualmente tale volontà si incontra con una reale fattibilità tecnica e con un'evidente propensione, da parte dei committenti e dei finanziatori, alla realizzazione di architetture fuori dai canoni classici, che abbiano la funzione di *landmark* e che, anche solo per la loro forma appariscente, garantiscano un ritorno di immagine e, sicuramente, anche economico.

Ampliando il panorama di indagine, è necessario soffermare l'attenzione su come questi nuovi modi di costruire l'architettura siano oggi utilizzati dal contesto socioculturale. In termini di rapporto struttura-architettura, non è l'architettura 'del quotidiano', quella fatta di residenze e di altri oggetti architettonici cosiddetti minori, a usufruire delle maggiori innovazioni. È, infatti, proprio nel momento in cui l'architettura diviene simbolo che è possibile osservare le peculiarità di questo rapporto di stretta collaborazione, quando cioè subentrano questioni e possibilità economiche che consentono di identificare nuove espressioni di forma e di spazio. L'organismo architettonico, con la sua struttura palesata o nascosta, diviene un elemento catalizzatore, un oggetto in cui identificare un potere o per il quale essere riconosciuti. Il ricorso a un'architettura monumentale, nel campo dell'edilizia, non è mai mancato. Se storicamente se ne è fatto un uso legato alla politica e all'affermazione del potere realizzando edifici rappresentativi della forza e dell'economia di un Paese o di un'azienda, ora a questo se ne sta affiancando un altro consistente nel costruire edifici che hanno la funzione di caratterizzare le città e richiamare l'afflusso di turisti nei Paesi, i cosiddetti *edifici calamita*.

In Italia, a Milano, sono in corso di attuazione alcuni interventi di riorganizzazione che, in occasione dell'**Expo** del 2015, modificheranno in maniera radicale l'aspetto della città. Il progetto è il frutto di una pianificazione messa in opera secondo un programma molto vasto: prima la realizzazione del nuovo polo della **Fiera di Milano**⁴³ nel 2005 a Rho, opera di *Massimiliano Fuksas* e *Doriana O. Mandrelli*, e il riuso del quartiere storico della **Fiera di Milano** con il progetto del 2004 di **CityLife**⁴⁴, opera di *Arata Isozaki*, *Daniel Libeskind*,

Zaha Hadid, Pier Paolo Maggiora, e poi gli interventi mirati ad accogliere e ospitare l'esposizione mondiale.

La tendenza, sempre più evidente nel XXI sec., è quella di scegliere *edifici-simbolo* che offrano una visione spettacolare dell'architettura e che esaltino, con la loro forma e la loro immagine rappresentativa, l'avanguardia tecnica e stilistica dell'opera e, di conseguenza, di chi ne è stato promotore e responsabile.

2.1.1 Evoluzione storica del rapporto tra ingegneria e architettura

Ingegneria e architettura sono due ambiti che seguono strade parallele e che si incontrano con difficoltà. Ma non è stato sempre così: nel passato sono state realizzate magnifiche architetture basandosi su presupposti strutturali e costruttivi; è sempre stata la struttura a determinare le forme e le innovazioni nell'architettura; la figura dell'architetto e quella dell'ingegnere si equivalevano e convivevano. Esisteva, infatti, un unico progettista che aveva, oltre all'estro creativo, anche la conoscenza tecnica, grazie alla quale riusciva a plasmare a suo piacimento la forma dell'edificio per esprimere la propria volontà stilistica. L'evoluzione degli stili nella struttura e nell'architettura è sicuramente da attribuire, oltre che alla necessità propria dell'uomo di esprimersi, anche all'innovazione tecnologica. Il progresso, e il conseguente accrescimento della cultura e del sapere nell'ambito dell'architettura e in quello dell'ingegneria, ha avuto come conseguenza la necessità di dividere le due discipline, per poterne meglio approfondire la specifica conoscenza. Infatti, un primo allontanamento tra l'ingegnere e l'architetto è derivato dall'avvento del calcestruzzo e dell'acciaio e dalla conseguente affermazione del cemento armato nell'edilizia che ha portato a nuove sperimentazioni nel campo dell'ingegneria.

Spesso la progettazione nasce da un semplice gesto dell'architetto, il quale ha l'esigenza, e anche la pretesa, di non avere limiti, di non essere costretto dentro vincoli di alcun genere; poi è dell'ingegnere il compito di studiare la struttura adatta al caso. Nelle nuove architetture è possibile individuare e identificare alcune differenze, in base alle quali fare qualche riflessione.

Le architetture contemporanee appaiono estremamente innovative e libere nel loro aspetto e nelle loro forme; ma qual è il loro rapporto con la struttura? Hanno lo stesso apporto innovativo sia dal punto di vista strutturale che da quello architettonico?

Nel tentativo di operare una distinzione, le correnti e gli atteggiamenti moderni possono essere suddivisi e qualificati in due posizioni: le architetture cosiddette *libere* nelle forme e nell'aspetto possono essere supportate, da un lato, da una struttura piuttosto *tradizionale*, dall'altro da una struttura ugualmente *libera* e assolutamente *non tradizionale*.

Del primo caso, fanno parte edifici contraddistinti e definiti da un "guscio" esterno, elemento primario dell'opera stessa, sia nella forma sia nell'innovazione che ne deriva, ma organizzati all'interno in maniera molto tradizionale, con una struttura a travi e pilastri. Il guscio è, quindi, semplicemente un rivestimento esterno al corpo dell'edificio, autoportante e collegato alla struttura interna. Si ricordano la **Ing House**⁴⁵ del 2002 di Meyer & Van Schooten, il **Living Tomorrow Pavillion**⁴⁶ del 2004 di UN Studio, entrambi ad Amsterdam, e la **City Hall**⁴⁷ del 2002 dello studio Foster & Partners a Londra. Quest'ultimo edificio si trova lungo la riva meridionale del Tamigi, non lontano dal Tower Bridge; l'opera è caratterizzata da un'insolita forma a sfera allungata e dalla totale assenza di un riconoscibile fronte principale. L'involucro esterno, completamente trasparente, racchiude perfettamente la struttura principale interna, costituita da una rampa pedonale ellittica che ne occupa l'intera superficie.

Un esempio altrettanto interessante di questa prima tipologia è rappresentato dal nuovo **Centro congressi Italia**⁴⁸ nel quartiere EUR a Roma (concorso 1998-2000), progetto di Fuksas e Mandrelli. L'edificio è caratterizzato da una struttura tradizionale a travi e pilastri

la quale, come una scatola, contiene una forma libera e apparentemente fluttuante. Infatti, si mostra come un contenitore parallelepipedo trasparente, in accordo con le forme razionaliste che caratterizzano il quartiere in cui sorgerà, e in netto contrasto con la forma della struttura in acciaio e teflon racchiusa al suo interno; la cosiddetta *Nuvola* sarà sospesa al centro della scatola, in modo da poter essere percepita interamente da ogni angolazione, e sarà sostenuta da una rigida maglia di nervature e tiranti in acciaio. Il progetto rappresenta un modello estremo, che dimostra di essere in grado di imprigionare una nuvola all'interno di una teca, per esporla agli occhi di tutti. L'architetto italiano non è l'unico a cimentarsi nella progettazione di forme libere racchiuse all'interno di strutture rigide; anche lo statunitense *Frank O. Gehry* fa uno splendido sfoggio di questa aspirazione nella sede della **DG Bank**⁴⁹ del 2001 in Pariser Platz a Berlino, realizzando, all'interno della corte di un edificio piuttosto tradizionale, una splendida sala riunioni dalle forme libere e ardite.

Ulteriore esempio di questa categoria è anche la **Mediateca**⁵⁰ del 2001 del giapponese *Toyo Ito* a Sendai: un edificio dalla forma regolare, con l'aspetto di un parallelepipedo e diviso internamente da piani tra loro paralleli, che ha una struttura unica e originale. La pianta rettangolare, infatti, è segnata da fori circolari di diverse dimensioni, forma e posizione, che creano suggestive prospettive. I fori sono collegati verticalmente tra loro da una struttura in acciaio, la quale sostiene l'intero edificio, non essendo, infatti, presenti altri elementi strutturali. Il sistema strutturale è costituito da una corona di elementi verticali in acciaio disposti sul perimetro dei fori, conferendo ai vuoti che attraversano l'edificio il gravoso quanto inaspettato incarico di sorreggerlo e puntellarlo.

Si tratta di opere in cui l'elemento innovativo riguarda in maniera più radicale la forma, l'aspetto architettonico, mentre quello strutturale, sebbene con dimensioni e aggetti imponenti, o facendo ricorso a tecniche eccezionali, rimane comunque legato a una concezione classica.

Al secondo caso appartengono quelle architetture che coinvolgono, nella loro innovazione, anche aspetti strettamente strutturali, in cui cioè la stessa struttura non appare più come tradizionalmente la intendiamo, ossia una maglia rigida, fondamentale per la realizzazione dell'opera e non necessariamente riconoscibile, ma in cui è invece particolarmente difficile individuare un sistema di travi e pilastri. Un esempio di tale concezione è costituito da molti edifici dello stesso *Gehry* e dell'irachena/britannica *Zaha Hadid*, ciascuno caratterizzato da proprie peculiarità costruttive. Nelle opere di *Gehry*, la struttura di sostegno dell'involucro esterno è, in realtà, necessaria ma in un certo senso quasi accessoria: nella struttura del rivestimento non è individuabile una particolare bellezza estetica, un disegno che ne evidenzia la volontà di realizzare un *unicum* concettuale che si lega con la struttura principale, ma un'opera aggiuntiva, a sostegno unicamente dell'involucro esterno.

Lo stesso non si può dire per strutture come la vela di vetro della citata nuova Fiera di Milano, o come i due coni rovesciati della **BMW Welt**⁵¹ del 2007, realizzati a Monaco, in Germania, dalla *Coop Himmelb(l)au*. Queste opere, nonostante siano estremamente libere nelle forme, mettono in evidenza anche il valore estetico di una struttura che non è accessoria e coincide con la forma architettonica, generando un tutt'uno tra il gesto architettonico e la progettazione strutturale. Altrettanto importante, anche se radicalmente differente, è il concetto che caratterizza le opere della *Hadid*; ne è un esempio il progetto del 1998 per il **MAXXI**⁵² (*Museo nazionale delle Arti del XXI secolo*) nel quartiere Flaminio di Roma. In questo caso, è l'opera stessa a essere struttura: l'edificio, infatti, è composto da volumi sovrapposti e affiancati, strutturalmente autoportanti. Le forme sono sempre più complesse a mano a mano che ci si addentra nell'edificio, le diverse quote si intrecciano sviluppando un reticolo spaziale molto particolare, attraversato e collegato da un percorso museale, il quale si accosta alle sagome arrotondate degli edifici e si introduce al di sotto

dei volumi in aggetto, inserendosi perfettamente all'interno del complesso espositivo. Il cantiere romano ha visto una sperimentazione non solo formale ma anche costruttiva, in funzione di uno sfruttamento sempre migliore dei veri protagonisti: i materiali. Il calcestruzzo, l'acciaio e il vetro hanno svolto un ruolo fondamentale nel progetto, ognuno caratterizzando un particolare elemento costruttivo, in modo da affrontarne e migliorarne sia le prestazioni strutturali sia l'aspetto estetico. Nel progetto è presente in maniera molto forte la volontà di osare sempre di più con la struttura e con l'architettura, di cercare di compiere un progresso maggiore e di proporre una nuova concezione, anche e soprattutto strutturale, nell'intenzione di rompere e di uscire dai canoni classici.

Oltre alla Hadid, un progettista i cui edifici costituiscono altrettanti esempi di questa corrente che lega struttura e architettura è *Calatrava*; nelle sue opere è infatti difficile, se non impossibile, scindere ciò che è architettonico da ciò che è strutturale, anche se egli spesso trascura la componente innovativa, in un *unicum* che fonde la forma, lo spazio e la tecnologia. In sintesi, appartengono a questo secondo caso tutte quelle opere in cui risulta evidente che la progettazione è pensata in funzione del raggiungimento di una maggiore integrazione tra l'innovazione architettonica e quella strutturale.

Nel XX sec. sono numerosi coloro i quali hanno operato sulla plasticità del cemento armato, tentando sperimentazioni sulla capacità di tale materiale di assumere qualsiasi forma: estremamente interessante, in tal senso, è il lavoro di studi quali *MVRDV* (Winy Maas, Jacob van Rijs, Nathalie de Vries) e *OMA* (*Office for Metropolitan Architecture*). Le loro opere non presentano spiccate innovazioni tecnologiche o strutturali né soluzioni particolarmente estrose, ma catturano l'attenzione per l'innovativo uso plastico del materiale e per le sensazioni che esso è in grado di suscitare. Per gli uffici **VPro**⁵³ del 1997 di *MVRDV* a Hilversum, Paesi Bassi, gli architetti hanno realizzato un progetto estremamente regolare, tanto in pianta quanto in alzato, dando vita a un edificio quadrato, scandito da una rigida maglia strutturale. L'interrogativo che si viene provocatoriamente a creare è il seguente: data una base di partenza, ossia una pianta quadrata con una scansione strutturale anch'essa quadrata, la successione dei piani genera un effetto compositivo a variazione sul tema, quindi quante possibili soluzioni distributive si riescono a ottenere da uno stesso punto di partenza? La particolarità e l'innovazione progettuale di quest'opera risiedono, però, nel modo in cui vengono realizzati i solai. Il cemento armato è utilizzato per l'esecuzione di veri e propri piani-superficie, dall'aspetto del tutto simile a dei "fogli". Il risultato finale è quello di nastri, visivamente agili, con la capacità di piegarsi e rigirarsi su sé stessi, effetto enfatizzato dal loro esiguo spessore e dalla loro estrema versatilità. L'ingresso viene realizzato mediante il semplice sollevamento di uno spigolo della lastra del primo piano, mentre uno dei solai effettua una piega su sé stesso e diviene il solaio del piano superiore, generando una parete perfettamente curva. Tale versatilità è posta in netto contrasto con l'estrema rigidità dell'uso del cemento.

Assistiamo quindi a una grande innovazione culturale, dove coesistono atteggiamenti diametralmente opposti e nei quali l'enorme accrescimento e moltiplicazione di posizioni e punti di vista porta alla loro stessa estremizzazione. La struttura è sempre stata parte integrante dell'architettura ma ora, in alcuni casi, ne diventa protagonista. In questo modo, da un lato, si assiste alla realizzazione di opere in cui la struttura è l'elemento essenziale della loro bellezza e della loro innovazione, finalizzata a una caratterizzazione "plastica", piuttosto che a un'evoluzione tecnica; dall'altro lato, invece, è possibile osservare edifici in cui la struttura è un elemento accessorio e presente solo in quanto strettamente necessario. Sebbene ogni opera abbia bisogno di una propria struttura per essere realizzata, in questi casi essa sembra quasi non fare parte dello stesso *iter* procedurale.

In progetti architettonici che sembrano non avere più alcuna legge, che non rispettano più regole cartesiane né spazi euclidei, è una conseguenza logica che anche la struttura sia, almeno apparentemente, esente dalle regole che fino a oggi abbiamo considerato.

Nella realtà dei fatti, una buona parte delle forme libere che caratterizzano questi anni sono in realtà governate da rigide regole geometriche e matematiche, che ne hanno reso possibile la realizzazione e che hanno dato modo all'oggetto architettonico di plasmarsi nelle tre dimensioni.

2.1.2 L'innovazione tecnologica: i grattacieli

La tipologia costruttiva che caratterizza e incarna maggiormente la progettazione strutturale contemporanea è costituita dal grattacielo. Da sempre simbolo di potere, tale tipologia è una manifestazione palese della capacità di superare qualsiasi limite statico, costruttivo, tecnologico, ma anche estetico e culturale in senso più ampio.

I grattacieli rappresentano da sempre la più imponente e magnifica, oltre che audace, opera di architettura e di ingegneria mai concepita. Continuamente e in ogni parte del mondo, gli uomini hanno tentato di andare sempre più in alto; questa competizione simbolica mondiale, questa tendenza a toccare il cielo, coinvolge società finanziarie e uomini di potere, operai e ingegneri, sia nell'intenzione di esaltare l'avanzamento e il progresso tecnologico raggiunto sia per celebrare e sottolineare la propria potenza e ricchezza.

Ma, mentre nel secolo scorso, ogni primato rimaneva indiscusso per decenni, sembra che oggi la corsa verso l'alto abbia tempi ben più ristretti.

Le **Petronas Towers**⁵⁴, dello statunitense *Cesar Pelli*, a Kuala Lumpur, hanno detenuto il record mondiale in altezza, ossia 452 m per 88 piani, dal 1998, anno della loro realizzazione, fino al 2004; le torri sono caratterizzate, oltre che da una tecnologia costruttiva piuttosto sofisticata, anche da un ponte, chiamato *skybridge*, sospeso a 170 m di altezza, che consente di spostarsi da una torre all'altra. Nel 2004 il primato è stato conquistato dal **Taipei Financial Center**⁵⁵ a Taiwan, progettato dallo studio *C.Y. Lee & partners*; la torre, orientaleggiante, è composta da moduli, o "pagode", sovrapposte e di dimensione decrescente, su un basamento a tronco di piramide. Il grattacielo, alto 449 m, 508 m considerando anche l'antenna con cui termina, per 101 piani, è servito da ascensori, alcuni anche a due piani, che viaggiano a una velocità di 16,83 m/s. L'eccezionale struttura portante è costituita da due colonne in acciaio per ogni angolo, riempite con un cemento speciale; all'interno, un'anima di 16 colonne è collegata mediante travi a quelle esterne ogni 8 piani, per una maggiore stabilità e sicurezza. La facciata, completamente a vetri, è ancorata a una griglia esterna, autonoma rispetto alla struttura portante. Infine, una **sfera d'acciaio**^{55b} del diametro di 5,5 m, situata al centro degli ultimi piani e sostenuta da pompe idrauliche, ha la funzione di controbilanciare, con le sue oscillazioni, le inclinazioni dovute all'azione dei forti venti in quota e dei terremoti.

L'ultimo record è stato conquistato, nel 2007, dalla **Burj Khalifa**⁵⁶ di Dubai, terminata nel 2009 su progetto di Adam Smith dello studio *Skidmore, Owings & Merrill* (SOM). Con un'altezza di 828 m compresa l'antenna, è la più alta opera mai realizzata dall'uomo, con un buon margine di scarto rispetto alla seconda, ed è visibile da oltre 90 km di distanza. Il grattacielo è caratterizzato da una soluzione in pianta ispirata a un particolare fiore, l'*Hymenocallis*, molto diffuso nella città di Dubai, ed è servito dai più veloci ascensori al mondo, i quali si muovono a una velocità di circa 18 m/s.

Annoveriamo tra i più alti grattacieli del mondo anche, in ordine decrescente di altezza, la **Shanghai Tower**⁵⁷ di *Gensler*, attualmente ancora in costruzione, con i suoi 128 piani di altezza racchiusi in 9 cilindri accatastati l'uno sull'altro, l' **Abraj Al Bait**⁵⁸ di *Dar Al-Handasah* a La Mecca del 2012, l' **One World Trade Center**⁵⁹ di *David Childs* del 2013 a New York e la **Willis Tower**⁶⁰, precedentemente Sears Tower, di *Skidmore, Owings & Merrill* del 1973 a Chicago.

Un altro, forse utopico, progetto è poi l' **X-Seed 4000**⁶¹ della *Taisei Corporation* di Tokyo. Si tratta non solo dell'edificio più colossale mai immaginato, ma anche di uno dei più giganteschi progetti mai concepiti: il principale ostacolo che ne ha impedito finora la costruzione sembra sia stato di ordine economico. L'idea prevedeva, oltre ai 4000 m di altezza, una base di 6000 m e 800 piani utili, i quali sarebbero stati in grado di accogliere l'intera popolazione di una grande città, ossia circa un milione di persone.

Fortunatamente questo colosso dell'edilizia moderna non esiste ma solo per il fatto di essere stato pensato merita di essere iscritto negli annali della storia quale esempio più avveniristico concepito fino ad oggi.

L'X-Seed 4000 fu concepito nel 1995 .

Nella mente del progettista, questo grattacielo doveva essere il più grande mai realizzato dall'uomo, capace di ospitare fino ad un milione di individui in un ambiente ultra futuristico ma che non trascurasse il contatto con la natura.

Date le condizioni atmosferiche alla vetta, la vita dentro l'X-Seed non sarebbe possibile se l'ambiente non fosse ben isolato dall'esterno, climatizzato e pressurizzato: a causa delle forze gravitazionali ed elettromagnetiche presenti sul nostro pianeta non è infatti possibile costruire torri alte più di 20000 metri. Per mantenere queste condizioni di vita e garantire la fornitura energetica, l'X-Seed avrebbe dovuto essere alimentato esclusivamente da energia solare, cosa che oggi sappiamo bene non essere di così immediata realizzazione. Ad oggi del progetto non si sa più nulla. Abbandonato anni fa, non è più stato preso in considerazione, e a maggior ragione non verrà riproposto oggi anche per via del costo proibitivo, stimato tra i 300 e i 900 miliardi di dollari.

-
- ⁴³ Foto a pag. 39
 - ⁴⁴ Foto a pag. 39
 - ⁴⁵ Foto a pag. 39
 - ⁴⁶ Foto a pag. 39
 - ⁴⁷ Foto a pag. 40
 - ⁴⁸ Foto a pag. 40
 - ⁴⁹ Foto a pag. 40
 - ⁵⁰ Foto a pag. 41
 - ⁵¹ Foto a pag. 41
 - ⁵² Foto a pag. 41
 - ⁵³ Foto a pag. 41
 - ⁵⁴ Foto a pag. 42
 - ^{55a} Foto a pag. 42
 - ^{55b} Foto a pag. 42
 - ⁵⁶ Foto a pag. 43
 - ⁵⁷ Foto a pag. 43
 - ⁵⁸ Foto a pag. 43
 - ⁵⁹ Foto a pag. 43
 - ⁶⁰ Foto a pag. 43
 - ⁶¹ Foto a pag. 44
 - ⁶² Foto a pag. 44

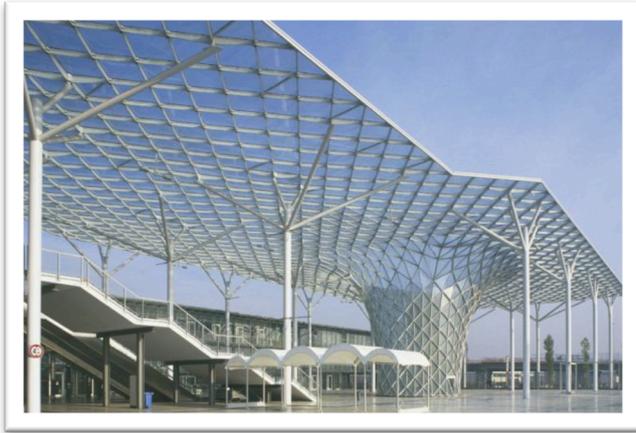


Figura 43: Fiera Milano, Milano, 2005



Figura 44: Citylife, Milano, 2007 – in costruzione



Figura 45: Ing House, Amsterdam, 2002



Figura 46: Living Tomorrow, Amsterdam, 2008

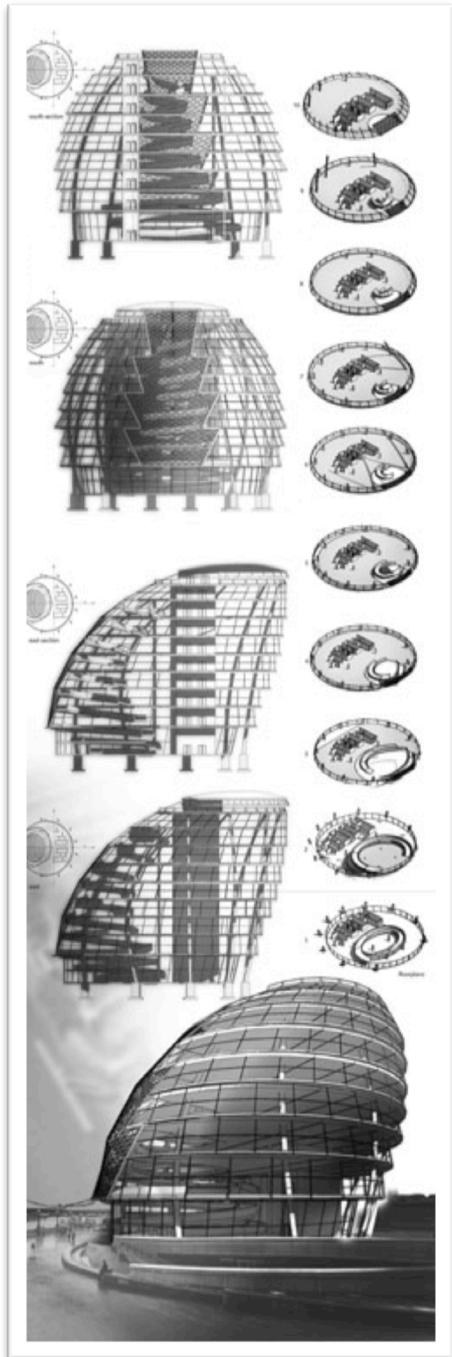


Figura 49: DG Bank, Berlino, 2001



Figura 48: Nuovo Centro Congressi EUR, Roma, 2008

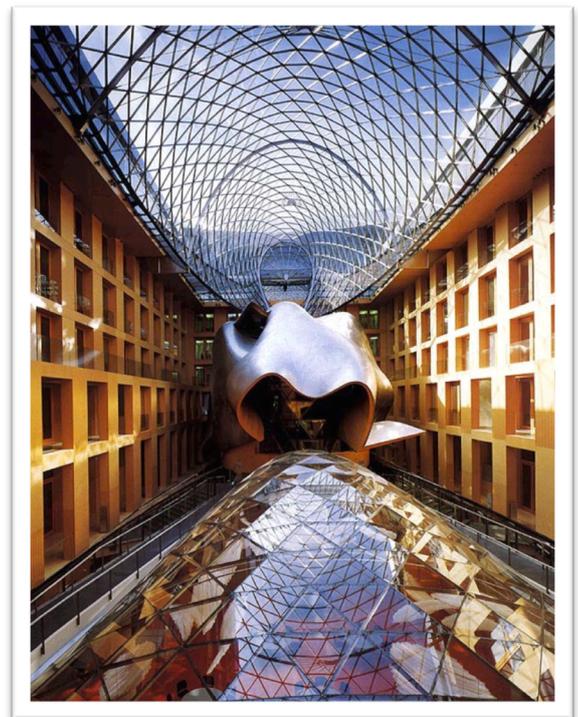


Figura 47: City Hall, Londra, 2002



Figura 50: Mediateca, Tokyo, 2003



Figura 51: BMW Welt, Monaco 2007

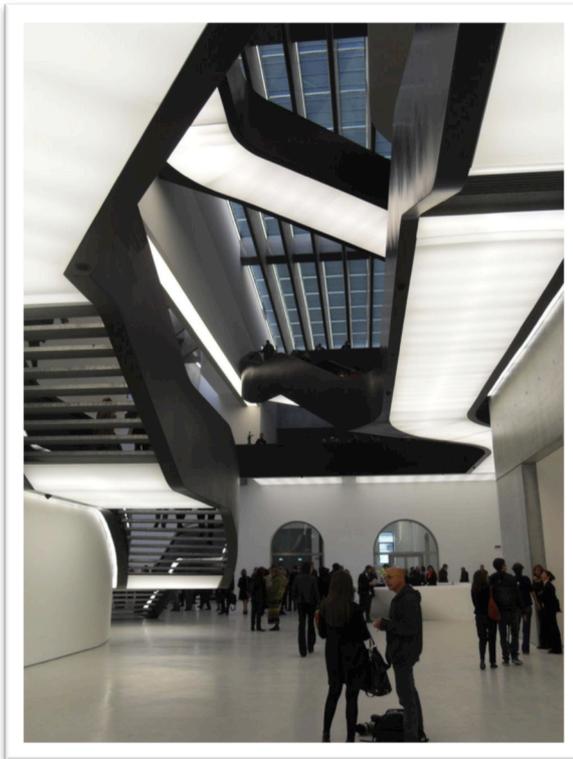


Figura 52: MAXXI, Roma, 1998

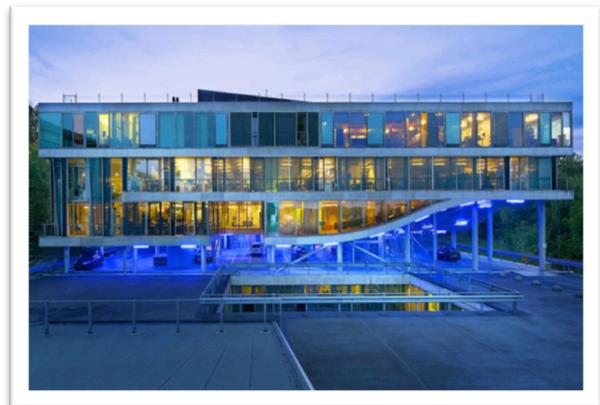


Figura 53: Uffici VPro, Hilversum, 1997



Figura 54: Petronas Towers, Kuala Lumpur, 1998



Figura 55: Taipei Financial Center, Taiwan, 2004

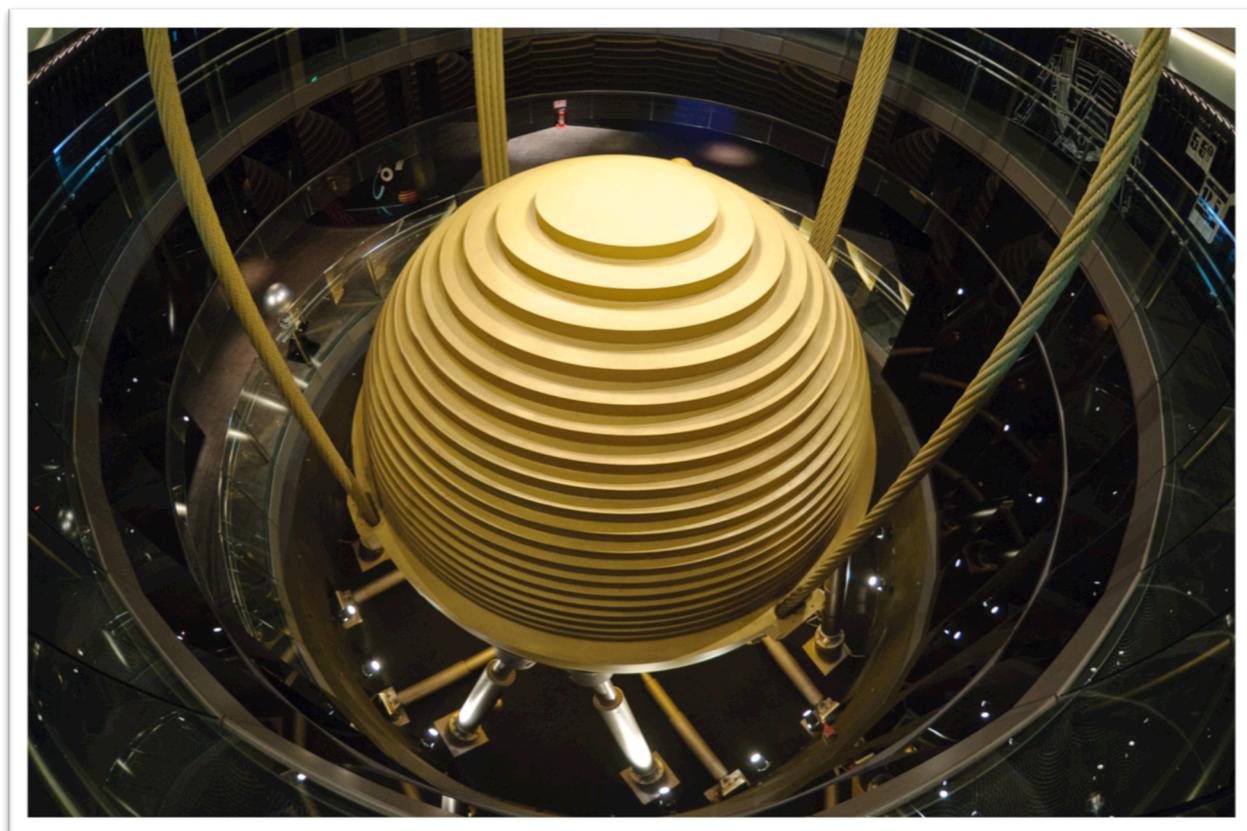


Figura 55b: Sfera nel Taipei Financial Center, Taiwan, 2004



Figura 56: Burj Khalifa, Dubai, 2009



Figura 57: Shanghai Tower, Shanghai



Figura 58: Abraj Al Bait, La Mecca, 2012



Figura 59: One World Trade Center, NY, 2013



Figura 60: Willis Tower, Chicago, 1973

2.1.3 La gestione dell'innovazione tecnologica del progetto

Grazie al computer, la gestione di forme complesse è diventata fattibile. È ormai possibile pensare e disegnare figure e sagome che abbiano qualsiasi dimensione e posizione nello spazio, completamente gestite in un ambiente virtuale o attraverso la scansione tridimensionale di modelli reali, con la possibilità di operare su di esse tutte quelle verifiche e modifiche atte a renderle realizzabili. Oggetti dalla forma non ben definita, quali possono essere le superfici esterne degli edifici di Gehry, oppure le opere ideate dal gruppo Coop Himmelb(l)au, vengono razionalizzati e definiti attraverso questo processo tecnologico. Così, una semplice superficie diviene un oggetto composto da un reticolo di aste e di nodi, che sostiene pannelli di chiusura. La gestione di tale processo mediante sofisticati software permette non solo di effettuare un'operazione di scomposizione della superficie in parti assemblabili, con una relativa semplicità e senza snaturare la forma originale, ma ne consente, soprattutto, il controllo della fattibilità e della costruzione. La gestione del problema attraverso il computer permette di conoscere l'effettiva dimensione di ogni parte, con precisione millimetrica o comunque coerente con il sistema produttivo, e anche di gestire la messa in produzione e il conseguente assemblaggio in cantiere dei componenti. Tali metodologie non erano praticabili in passato, e sicuramente non nei tempi e con il controllo oggi garantiti. I metodi costruttivi attuali consentono di gestire il modello realizzato dall'architetto in modo che possa essere studiato dall'ingegnere, il quale lo scompone in elementi-base calcolati, con una dimensione, una forma e una geometria che ne consenta la fattibilità costruttiva e statica, per poi passare nei computer dell'officina, dove si producono componenti effettivamente costruibili e assemblabili. Questo *iter* progettuale-realizzativo non riguarda unicamente strutture complesse o dalle forme ardite, ma anche e soprattutto edifici tradizionali con strutture semplici a travi e pilastri. La *vela* della nuova **Fiera di Milano** costituisce un buon esempio di assemblaggio e gestione delle parti in cantiere; lunga 1300 m e larga 32 m, più di 41.000 m², è composta da oltre centomila pezzi, tutti differenti tra loro, dove ogni singolo elemento è stato disegnato, calcolato, verificato, prodotto e assemblato in un solo anno.

La realtà gestionale contemporanea, attraverso l'uso del computer e dei nuovi programmi, è completamente cambiata, e il cantiere è diventato un luogo di elevata automazione. In Cina, per esempio, per realizzare alcuni nuovi grattacieli, vengono utilizzati sistemi completamente robotizzati di montaggio delle parti, in cui un'impalcatura estremamente complessa, dotata di gru e bracci meccanici, realizza e assembla l'edificio, aggrappata a un nocciolo centrale; i bracci della gru, dotati di lettori ottici, riconoscono i codici a barre degli elementi prefabbricati e sistemati nell'area di cantiere e li collocano nella posizione esatta prevista. Ultimato un livello, la struttura meccanica si muove e si sposta verso l'alto, per proseguire nella realizzazione del livello successivo.

2.2 Materiali

2.2.1 Cenni generali

Ai nostri giorni la qualità strutturale degli edifici è aumentata a dismisura, parallelamente e unitamente alla maggiore arditezza delle forme nello spazio architettonico. Si assiste a un aumento esponenziale attraverso il quale le innovazioni tecnologiche si diffondono e divengono consuetudine: ciò che è innovativo oggi, diviene acquisito e quasi obsoleto subito dopo. I nuovi materiali hanno dimostrato di non riuscire a essere competitivi, almeno su vasta scala, con gli ormai consolidati materiali da costruzione del passato: si può affermare senza alcun dubbio che sia l'acciaio sia il cemento armato continuano ad avere un ruolo principale nei sistemi strutturali.

Volgendo lo sguardo al passato, in termini di materiali innovativi e per quanto concerne gli aspetti strutturali, bisogna tornare al XIX sec. per trovare i primi esempi d'impiego del materiale metallico strutturale. Da allora, ciò che ha permesso l'espressione e la realizzazione di oggetti architettonici innovativi non è stato il materiale, bensì l'uso che si è imparato a farne e l'impiego strettamente connesso all'utilizzo di tecniche di calcolo avanzate. Sotto questo punto di vista, infatti, non sono riscontrabili né rivoluzionarie innovazioni tecnologiche, né l'avvento di materiali con migliori capacità. Per quanto esistano cementi e acciai più efficienti di prima, tali miglioramenti non sono altrettanto rivoluzionari di quanto lo sia stato il loro avvento.

Il campo delle costruzioni è stato notevolmente influenzato dall'uso del cemento armato, che ha cambiato completamente il modo di fare struttura e, di conseguenza, di fare architettura. Dalla sua scoperta sono stati compiuti notevoli progressi nella sua applicazione: miglioramenti che riguardano le prestazioni fisiche, le tecnologie d'impiego e le capacità portanti, attraverso l'aggiunta di additivi specifici e adatti al caso. Non si riesce oggi a trovare un'alternativa valida e non si può sperare in uno stravolgimento dei materiali da costruzione; i molteplici e notevoli progressi nel campo della tecnologia, la semplificazione delle metodologie di calcolo strutturale e la tendenza a realizzare opere sempre più fantasiose e fuori dai canoni non trovano un riscontro altrettanto avanzato nei materiali, che sono sempre gli stessi. Anche i limiti nell'uso dell'acciaio e del cemento rimangono sempre gli stessi, in quanto non esiste una nuova tecnologia valida in grado di superarli. In realtà, anche se i materiali da costruzione non sono cambiati, quello che è mutato è l'atteggiamento nei loro confronti; esiste, infatti, una maggiore facilità ad affrontarne i limiti, ma anche a sfruttarne le potenzialità.

L'architettura del XXI sec., nella maggior parte dei casi, ha una conformazione di tipo plastico, una "non forma" che nasce dall'estro creativo di un artista e sembra, apparentemente, indipendente dalla struttura. Le forme e i calcoli che ne derivano raggiungono livelli sempre più complessi, ed è solo grazie al continuo sviluppo tecnologico dei computer e dei programmi di calcolo e di grafica 2D e 3D che è possibile risolvere problemi così onerosi, sia puramente matematici sia semplicemente di disegno, in poco tempo e con poco sforzo.

In questi ultimi anni si è assistito a un eccezionale e repentino progresso tecnologico, mirato al miglioramento e, soprattutto, alla semplificazione della progettazione architettonica e strutturale. L'evoluzione dei computer, lo sviluppo e il rinnovamento continuo di nuovi programmi di calcolo strutturale, hanno permesso di superare i vincoli del passato, in un'apparente assenza di limiti, generando un campo d'azione immenso con infinite possibilità. Oggi domina il coraggio di affrontare ogni difficoltà, nell'utopica consapevolezza che tutto sia possibile, che non ci siano limiti fisici o statici all'estro di chi progetta. Il futuro sarà caratterizzato da una fattibilità tecnica sempre più evidente. I vincoli che spesso determinano la realizzabilità dell'edificio, siano essi dovuti alla natura e alla

qualità del luogo dove si interviene, o siano subordinati alle esigenze del progettista e della committenza, saranno sempre meno costrittivi. Infatti, la capacità di analizzare e risolvere le difficoltà e le barriere progettuali presenti è sempre maggiore, come pure la possibilità di valutare la reale incidenza dei vincoli e delle incognite con precisione crescente. Ciò che prima rimaneva un problema decisamente ostico da affrontare, adesso diviene un elemento del sistema con il quale è possibile dialogare e confrontarsi.

Ora più che mai l'architettura è vincolata solo da se stessa, dal gusto e dalla cultura dei luoghi dove viene realizzata. Se in altri momenti storici, l'ingegneria e la scienza delle costruzioni potevano rappresentare un limite piuttosto forte per la progettazione di forme e strutture azzardate, oggi ci troviamo di fronte a un massimo livello di realizzabilità e fattibilità, soprattutto strutturale. Il computer e i nuovi software a disposizione hanno contribuito alla definizione e all'ampliamento di un nuovo campo d'azione con notevoli possibilità, probabilmente a svantaggio di quella sensibilità e di quel modo di progettare degli anni in cui si procedeva principalmente in maniera intuitiva, ma a vantaggio dell'acquisizione di una consapevolezza e di una capacità di affrontare problemi prima impensabili. In un passato non troppo lontano, all'epoca delle sperimentazioni iniziali per testare le capacità del cemento armato, era difficile e consentito a pochi anche solo disegnare forme che non fossero riconducibili al trilito, prima, e, in seguito, al telaio. I calcoli strutturali limitavano la progettazione per la loro complessità, nonostante le forme "semplici" rispetto all'evoluzione delle stesse del XXI sec., ed erano legati soprattutto alla sensibilità e all'esperienza proprie del singolo progettista.

Si può adesso fare affidamento su programmi dalla complessità crescente, ma dall'uso sempre più semplice e immediato, con tempi di elaborazione veloci; il problema più grande e oneroso è l'inserimento dei dati, per il quale sono necessarie anche intere giornate, ma bastano pochi minuti per avere una soluzione.

Così, in passato, nel tentativo di ovviare agli onerosi problemi di calcolo, si tendeva a riportare le strutture più complesse a schemi più semplici, oppure, si cercava di inserire opportunamente delle cerniere proprio dove si sapeva essere presente un momento molto complesso da calcolare; in questo modo si era in grado di risolvere più facilmente le equazioni di calcolo, annullando o diminuendo le incognite. Oggi, invece, è possibile ottenere risultati e dati precisi riguardo le reazioni e gli sforzi presenti in ogni punto della struttura e, nei casi più complessi, è sufficiente attendere qualche frazione di secondo perché il computer elabori il risultato. Questo, ovviamente, ha come conseguenza diretta la necessità di non modificare né l'architettura né la forma di un progetto, nel tentativo di semplificare il dimensionamento della struttura, la quale, ormai priva di incognite, è diventata quasi una semplice questione automatica.

L'avvento dell'informatica non soltanto consente la verifica virtuale di quanto progettato, grazie all'impiego di calcolatori e software per la restituzione tridimensionale, ma, nel caso soprattutto dell'acciaio e mediante l'impiego di programmi applicativi specifici, ne permette anche la trasformazione diretta nelle officine, dove vengono tagliati i diversi pezzi e viene data loro la forma richiesta. Successivamente, vengono mandati in cantiere per essere assemblati.

Così, architetto e ingegnere occupano posizioni diametralmente opposte: l'architettura è sempre più legata alla sensibilità dell'artista, alla genialità dell'uomo che progetta; la struttura, al contrario, è sempre più sinonimo di risoluzione di problemi, di verifica statica legata e dipendente dall'uso del computer in maniera sempre più forte e vincolante. La sensibilità del progettista strutturale deriva da una macchina che svolge un calcolo e fornisce un risultato; ma i dati inseriti nel computer e la soluzione a cui arriva il programma devono necessariamente essere controllati e valutati dall'uomo. È il progettista a decidere quanto lavorare l'acciaio e il calcestruzzo e in quale misura sfruttarne le capacità, nell'ambito e nei limiti imposti dalle normative; a scegliere gli spessori dei materiali e la

quantità di armatura e se provare a osare di più o scegliere di restare entro i margini progettuali; allo stesso modo, è anche compito non facile del progettista determinare se il risultato elaborato dal computer sia compatibile con l'insieme strutturale e architettonico, oppure no.

Nel XXI sec., attraverso il computer, non si realizza soltanto ciò che era prima impensabile ma vi sono maggiori possibilità di ottenere determinati risultati, senza, ovviamente, prescindere dalle conoscenze specifiche architettoniche e ingegneristiche. In passato, il fatto di non saper disegnare e la mancanza di familiarità con il calcolo costituivano una forte limitazione per la professione dell'architetto e per quella dell'ingegnere; mentre ora questa difficoltà è superabile. L'affidabilità e la duttilità dei programmi di calcolo hanno contribuito alla perdita di quella sensibilità, nella progettazione architettonica come in quella strutturale, che era una caratteristica di vanto per i protagonisti del XX sec., a vantaggio di una maggiore risolutezza nell'affrontare problemi di ogni genere. Il superamento dei limiti legati alla progettazione strutturale e architettonica ha spostato l'attenzione anche su un altro tipo di problemi, un tempo considerati secondari, basati sullo studio accurato delle azioni esterne. Nel caso della progettazione dei grattacieli l'innovazione tecnologica viene realmente utilizzata per superare ogni limite conosciuto.

A Tokyo è stato addirittura progettato nel 1995, dalla *Taisei Corporation* un grattacielo alto 4000 m, chiamato **X-Seed 4000**; in questo caso, le problematiche principali non riguardano solamente il calcolo delle strutture, ma anche, e soprattutto, i problemi collaterali di sperimentazione reale e di verifica dei carichi accidentali naturali, come, per esempio, le oscillazioni in punta dovute al vento e le dirette conseguenze sui materiali, gli effetti di una differente pressione atmosferica a un'altitudine così pronunciata, le reazioni e le conseguenze sulle persone che abiteranno al suo interno. In questo modo, nella progettazione si inserisce anche una componente sperimentale, con simulazioni dal vero legate alla necessità di capire, studiare e risolvere in maniera concreta le incognite poste dalle nuove frontiere. È questo il compito della galleria del vento utilizzata per ricreare le condizioni atmosferiche naturali in un ambiente circoscritto, in modo da poter valutare i condizionamenti e le reazioni delle strutture. La già citata *vela* della passerella centrale della nuova **Fiera di Milano** è stata collaudata proprio nella galleria del vento, sotto forma di prototipo, per valutare e quantificare gli effetti del vento incuneato nei crateri e nei semicrateri, previsti nella struttura di vetro e acciaio, e non verificabili con una semplice analisi dei carichi.

Anche per quanto riguarda i grattacieli, il problema maggiore è l'analisi e il confronto della struttura con i venti. Ne è un esempio il **World Financial Center** del 2008 a Shanghai, opera dello studio *Kohn Pedersen Fox Associates*: la forma di questo edificio è una sorta di lama, con in cima un enorme oblò realizzato appositamente in funzione delle caratteristiche dei venti più frequenti e per limitarne gli effetti sul grattacielo e su chi ne usufruisce.

2.2.3 L'acciaio: cenni storici

Parlare di "acciaio" come di un materiale non è propriamente corretto:

"L'acciaio non è un materiale unico. Attualmente ci sono più di 3,500 qualità differenti di acciaio con diverse proprietà fisiche, chimiche e ambientali. Approssimativamente il 75% degli acciai moderni è stato progettato negli ultimi 20 anni." [World Steel Association, About Steel]

Piuttosto che affidarsi alla terminologia comune è più opportuno, dunque, indicare con il termine acciaio una "tipologia", se non una vera classe di materiali. Per una maggior precisione si definisce acciaio una lega di ferro in cui è presente carbonio in una percentuale compresa tra lo 0.008% e il 2.06% in peso, sebbene in effetti sia possibile

trovare in letteratura numerose definizioni alternative che presentano valori leggermente differenti.

Spesso, tuttavia, in molti tipi di acciai il carbonio risulta essere presente in percentuali bassissime e comunque indesiderate, che lo rendono ad ogni effetto un'impurezza non voluta, più che un componente della lega. Per questo motivo recentemente si è affermata anche un'altra definizione di acciaio, più essenziale e meno quantitativa: per acciaio si può intendere semplicemente una "lega a base di ferro che può essere plasticamente deformata (battuta, laminata, ecc.)".

Il primo tipo d'acciaio ad essere scoperto è stato il **ferro battuto** (o "lavorato", dall'inglese *wrought* o *worked*, o ferro dolce), forse ottenuto casualmente come sottoprodotto della produzione del rame. In realtà, come suggerisce il nome, non è considerato un acciaio vero e proprio, nonostante il suo contenuto di carbonio sia inferiore all'1.5%. Ciò avviene probabilmente per ragioni innanzitutto storiche poiché il ferro battuto è stato considerato fin dalla sua scoperta come ferro puro. Ad oggi il ferro battuto è stato largamente sostituito dall'acciaio dolce, *mild steel*, a bassissimo contenuto di carbonio ed è utilizzato per lo più come elemento ornamentale.

Un metodo indiretto e antico di produzione, impropriamente detto "*lavorazione a Damasco*", è quello che permette di ottenere l'acciaio **a pacchetto**. Si tratta in effetti di realizzare una struttura multistrato che alterna lamine di ferro battuto e di ghisa. Il primo, normalmente, è insensibile alla tempra, la ghisa invece è troppo fragile per la forgiatura. Rammollendo e saldando insieme strati di questi due materiali, parte del carbonio della ghisa diffonde nel ferro battuto. Il pezzo così ottenuto viene rammollito, battuto e ripiegato su se stesso, quindi di nuovo battuto e così via.

In tal modo il numero di strati aumenta fino ad arrivare a centinaia o addirittura migliaia di strati. L'acciaio ottenuto durante questo processo, sarà forgiabile, a differenza della ghisa, e temprabile, diversamente dal ferro battuto. Inoltre sarà tanto più omogeneo quanto maggiore sarà il numero di strati. Per contro la sua produzione sarà lunga e molto costosa. Dall' XI secolo per questo motivo venne abbandonata in Europa a favore di metodi che permettevano di ottenere un acciaio omogeneo, anche se in effetti l'anima del pezzo restava in ferro dolce. Con l'uso della *forgia catalana* era possibile ridurre grandi quantità di minerale di ferro ottenendo circa 100 Kg di materiale lavorabile: poiché la riduzione avveniva per mezzo di carbonio, si otteneva ferro metallico, ma anche acciaio e ghise con diversi tenori di carbonio.

L'acciaio **vescicolare** (*blister steel*) è uno dei primi acciai omogenei prodotti; barre di ferro dolce vengono impregnate di carbone attraverso il loro riscaldamento su un letto di carboncino. L'acciaio grezzo ottenuto viene raffreddato molto lentamente. Sulla superficie compaiono delle macchie a forma di vescicole dovute al gas che fugge dal materiale. Il metodo della **carbocementazione**, comparso in Europa nello stesso periodo, ma noto in Medio Oriente fin dall'inizio dell'età del Ferro, prevede, invece di un lento raffreddamento, una tempra in un bagno di olio o di acqua.

I metodi di cementazione rispetto a quelli di decarburazione della ghisa risultavano decisamente più economici, ma producevano un acciaio di minor qualità.

Dal Rinascimento si ebbe perciò una rinnovata richiesta di acciaio di prima qualità che portò alla riaffermazione dell'acciaio a pacchetto. All'inizio del XVII secolo era finalmente giunto in Europa l'*acciaio wootz*, prodotto in India fin dal 300 d.C., ma passò più di un secolo perché il metodo di produzione venisse riscoperto in Europa ad opera di *Benjamin Huntsman*, nel 1740, appunto. Sheffield, la città di Huntsman, nel giro di un secolo divenne la più grande città industriale d'Europa, in grado di produrre 80000 tonnellate di acciaio l'anno, la metà di tutta la produzione del continente. L'acciaio **al crogiolo** fu il primo acciaio omogeneo prodotto in condizioni di fusione. Il processo prevede di fondere

barre cementate, o ferro saldato con carbonella, insieme con leghe di ferro in piccoli crogioli da 45 Kg posti in una fornace in grado di raggiungere i 1600°C.

Questo appena descritto è l'ultimo dei metodi, ormai obsoleti, per la produzione dell'acciaio. Bisogna escludere però l'acciaio vescicolare, che è ancora sul mercato, e precisare che la tecnica dell'acciaio a pacchetto, sebbene in una sua variante, perfezionata in Giappone, ha continuato a fornire l'acciaio di miglior qualità fino alla metà del XX secolo. Se inoltre non si guarda solo al materiale, ma anche al manufatto finito, la tecnica giapponese dell'acciaio a pacchetto in relazione all'uso per cui essa è nata, ossia la produzione delle famose spade da samurai, le *katana*, resta universalmente riconosciuta come la migliore. Si tratta di un metodo ovviamente inadatto alla produzione di massa, ma capace di concentrare in pochi millimetri migliaia e migliaia di strati, nonché di differenziare le composizioni dell'acciaio, nel modo più adatto all'utilizzo, sul filo, sul dorso e nel cuore della lama.

Decidendo di concedersi un'ultima digressione, si può prendere, forse arditamente, la produzione d'acciaio come metafora di due scuole di pensiero contrapposte. La civiltà occidentale è sempre stata, storicamente, più tesa alla continua innovazione ed è giunta ad ottenere l'acciaio inossidabile già agli inizi del Novecento. L'Estremo Oriente, per contro, crede a tutt'oggi che il fine ultimo e l'eleganza del gesto risiedano nella sua essenzialità e ripetibilità. Per questo motivo a cavallo tra Ottocento e Novecento, i fabbri giapponesi miravano ancora al perfezionamento assoluto di una tecnica nota da più di mille anni.

Con ciò si conclude la parentesi storica sull'acciaio, sebbene alcuni metodi e certi tipi d'acciai siano stati trascurati, e si passa a trattarne la moderna produzione.

2.2.4 Produzione dell'acciaio

Nella moderna siderurgia i procedimenti più comunemente utilizzati per produrre acciaio possono essere ricondotti a due: acciaio ottenuto dal minerale oppure dalla fusione dei rottami di ferro.

Nel primo caso lo stabilimento per la produzione è denominato a "ciclo integrale": questo significa che è necessario disporre di tutti quegli impianti ed attrezzature che consentano la trasformazione chimico fisica del minerale in acciaio.

Il minerale necessita di un'accurata preparazione e miscelazione con altre sostanze, in particolare calcare, per ottenere quell'arricchimento e quella composizione chimico-fisica necessari per la sua trasformazione.

I metodi di trattamento sono molti e tutti volti a far sì che il minerale e gli altri componenti aggregati siano trasformati in "piccoli pezzetti", denominati "*pellets*", così da renderli atti alla preparazione della carica dell'altoforno.

Quest'ultimo è un forno del tipo a "*tin*", continuo, nel quale il minerale, sottoposto ad alta temperatura si trasforma in ghisa, ossia ferro ad alto contenuto di carbonio. La temperatura alla quale inizia la riduzione del minerale è intorno agli 800°C ed è ottenuta mediante la combustione del carbone *coke*, caricato assieme al minerale. All'uscita dall'altoforno la ghisa viene colata direttamente in un contenitore mobile su rotaie, chiamato *carro siluro*, tramite il quale viene trasportata all'acciaieria per la trasformazione in acciaio.

Il processo per la preparazione dell'acciaio consiste nella decarburazione della ghisa e nell'aggiunta di componenti che consentano di ottenere quel grado di durezza e resistenza desiderato.

Per far ciò occorre nuovamente riscaldare la ghisa in appositi forni, denominati *convertitori*, nei quali la ghisa si affina e si trasforma in acciaio. Tutto quanto sopra descritto è parte integrante di uno stabilimento siderurgico a ciclo integrale. In Italia, gli stabilimenti di questo tipo sono perlopiù gli **ex ITALSIDER**, presenti a Taranto, Piombino, Genova e

Trieste, per citare i più importanti. Gli stabilimenti siderurgici che producono acciaio direttamente dai rottami non necessitano di impianti e macchinari finalizzati alla produzione della ghisa ed alla sua trasformazione in acciaio. Sono pertanto, a parità di prodotto, di dimensioni e valori minori, permettendo la realizzazione di stabilimenti anche di capacità modesta, le cosiddette mini-acciaierie, con accettabili rapporti tra investimento e capacità produttiva, senza rinunciare a volumi di produzione anche ragguardevoli. Oltre a ciò presentano altri vantaggi, che compensano l'elevato consumo di energia elettrica necessario per il loro funzionamento: maggior elasticità di impiego, si possono produrre anche acciai inox, rapidità di messa in marcia, maggior possibilità di controllare i processi di trasformazione chimica, indipendenza dell'installazione da porti o altre importanti stazioni di smistamento merci.

L'acciaio, in questi impianti, è ottenuto dalla fusione dei rottami di ferro opportunamente preparati e selezionati per evitare inconvenienti durante la trasformazione, come le esplosioni. La fusione avviene nel forno elettrico che, di norma, è di due tipi: forno ad arco e forno ad induzione. Nei forni ad arco, i più impiegati, il calore viene apportato dalla radiazione dell'arco che si forma tra gli elettrodi di grafite ed il bagno. La temperatura dell'arco raggiunge i 3500°C. I forni ad induzione, sono basati sul principio del passaggio di un intenso flusso elettromagnetico, e quindi di calore, dove la carica metallica rappresenta il secondario di un trasformatore. In genere vengono impiegati quando si vuol procedere ad una rifusione.

Una volta prodotto, all'acciaio si deve imprimere la forma finale desiderata. Questa parte del processo di fabbricazione dell'acciaio è comune alle due modalità di produzione sopra descritte.

Due sono i modi di procedere, *laminazione* e *colata continua*. L'acciaio può essere colato "in fossa" nelle lingottiere, nelle quali solidifica e viene successivamente laminato sino a diventare prodotto finito.

Ottenuto il lingotto, si procede alla sua trasformazione nel prodotto desiderato nel laminatoio, che può essere a "caldo" o a "freddo". Con il processo di laminazione **a caldo** il lingotto viene prima riscaldato a temperature fino a 1200° C e quindi portato alla forma finale da una serie di cilindri disposti in diverse posizioni, nelle cosiddette "gabbie" di laminazione.

La laminazione a freddo ha lo scopo di ottenere, con una deformazione plastica, senza apporto di calore, una superficie del metallo più compatta e liscia, con marcate variazioni delle caratteristiche meccaniche del prodotto è usata per la produzione di lamiere grecate o la produzione di profilati a C, I, L, U e Q di sezione modesta, di basso peso e resistenza elevata in rapporto al peso. Lo spessore dei componenti laminati a freddo è solitamente inferiore ai 3 mm. La lunghezza massima delle lastre prodotte per laminazione non è dettata da limitazioni produttive, ma dipende dalla lunghezza massima dei pezzi agevolmente trasportabili, che si aggira attorno ai 13 m. La trafilatura è frequente nella produzione di tondini, cavi o fili ad alta resistenza. In questo caso, barre o fili metallici vengono tirati attraverso matrici sempre più strette. L'estrusione è utilizzata per ottenere elementi allungati di sezione trasversale anche complicata, purchè a sviluppo longitudinale rettilineo, in questo caso barre o fili metallici vengono spinti attraverso matrici, anche in questo caso di dimensioni sempre più ridotte. Tale processo di lavorazione è utilizzato anche per la produzione di semilavorati in altri materiali come, ad esempio, i profilati per gli infissi in alluminio e in PVC. L'estrusione dell'acciaio è però un'operazione difficile, decisamente più impegnativa della trafilatura. L'imbutitura è un tipo di lavorazione che prevede che una lastra metallica venga compressa tra una forma e una controforma al negativo. In campo edilizio, il prodotto più tipicamente ottenibile per imbutitura sono le lamiere profilate, ossia ondulate o grecate. Una volta formati i semilavorati standard sono spesso necessarie ulteriori lavorazioni che, in relazione agli specifici utilizzi, sono

effettuate prima della messa in opera. Tali lavorazioni sono prevalentemente caratterizzate da asportazione di materiale; le principali sono: la fresatura, la tornitura e la foratura. In definitiva, l'offerta che la produzione industriale del settore mette a disposizione dei progettisti è caratterizzata da: semilavorati da selezionare a catalogo di cui sono note le caratteristiche dimensionali e prestazionali, prodotti da acciaierie; sistemi costruttivi coordinati e integrati prodotti da aziende di carpenteria metallica che possono operare anche come imprese esecutrici con appalti "chiavi in mano"; sistemi di componenti pre-assemblati di produzione industriale.

2.2.5 Caratteristiche dell'acciaio

Le caratteristiche principali dei metalli sono l'isotropia, la resistenza meccanica e la tenacità. L'isotropia fa sì che i metalli siano resistenti in modo simile rispetto a qualsiasi direzione di sollecitazione e in ogni loro parte. Questo fatto, in combinazione con l'elevata resistenza meccanica e tenacità rende i metalli particolarmente adatti all'impiego come materiali strutturali sia nelle costruzioni edili, sia nelle macchine. Un'altra caratteristica dei metalli è quella di essere sottoposti a fusione e miscelazione con altri metalli, finalizzata a costituire delle leghe. I metalli puri generalmente sono più duttili delle leghe a cui danno luogo.

I metalli più utilizzati nel campo delle costruzioni sono l'acciaio e l'alluminio; e tra questi, l'acciaio è il metallo notevolmente più utilizzato per scopi strutturali.

L'acciaio è una lega di ferro e carbonio. Il ferro viene usato in lega con il carbonio perché allo stato puro risulta molto duttile. Aggiungendo alla lega quantità di carbonio maggiore di quella caratteristica degli acciai si ottengono le ghise. Gli acciai sono caratterizzati da un tenore di carbonio compreso tra 0,02% e 2,06% e le ghise da un tenore di carbonio compreso tra 2,06% e 6,67%.

Gli acciai comunemente impiegati nelle costruzioni sono leghe di ferro-carbonio ottenute dall'affinazione della ghisa allo stato fuso in convertitori a ossigeno. Tra gli acciai al carbonio quelli per impieghi strutturali maggiormente diffusi sono i tipi *Fe360*, *Fe430*, *Fe510*, identificati dalla sigla Fe, indicante il simbolo chimico del ferro, seguita dal valore della tensione di rottura espresso in MPa.

Tali materiali rientrano nella categoria degli acciai dolci o non legati e sono caratterizzati da un ridotto tenore di carbonio ($C < 0.20\%$). Infatti, tale elemento se da un lato favorisce l'indurimento dell'acciaio, elevandone le proprietà meccaniche in termini di resistenza, dall'altro ha una forte influenza sul deterioramento della duttilità, tenacità e saldabilità, proprietà, queste ultime, indispensabili nelle moderne costruzioni.

Agli acciai al carbonio unificati si affiancano quelli a elevato limite elastico o microlegati, in cui le elevate proprietà meccaniche in termini di resistenza, fermo restando il tenore di carbonio a valori dello 0.20%, sono ottenute sia attraverso trattamenti termici di bonifica che mediante l'aggiunta in lega di elementi, quali vanadio V, molibdeno (Mo), niobio (Nb), boro (B), silicio (Si) e altri in percentuali ridotte dell'ordine dello 0.10%. Tra questi quelli maggiormente utilizzati sono quelli di classe *S420* e *S460*.

Per ridurre la sensibilità degli acciai nei confronti della corrosione superficiale, l'industria siderurgica ha messo a punto, da tempo, acciai bassolegati o autopassivanti i quali si ottengono aggiungendo alla lega ferro-carbonio tenori ridotti di cromo (Cr), nichel (Ni), manganese (Mn), rame (Cu), silicio (Si) ecc., con percentuali inferiori al 5%.

Gli elementi strutturali che più si prestano a sfruttare le proprietà meccaniche delle ghise comuni, bianche o grigie, sono la colonna o il pilastro massicci. Quando questi sono caratterizzati da rapporto di snellezza ragionevolmente basso, ossia quando sono poco slanciati, sono infatti interessati da sforzi di flessione modesti e lavorano quindi più che altro a compressione semplice. Nel corso dell'ottocento nei paesi industrializzati, primo tra

tutti l'Inghilterra, l'impiego più caratteristico della ghisa era in effetti diretto alla realizzazione di pesanti colonne in edifici industriali le cui pareti esterne erano in muratura massiccia. Tali elementi strutturali venivano prodotti mediante fusione e colatura in stampi e potevano perciò arricchirsi di modanature e ornamenti ricavati negli stampi stessi.

Oggi il campo degli impieghi della ghisa si è per lo più ristretto a impieghi non strutturali: tubazioni, radiatori, caldaie, e nel settore delle costruzioni i prodotti in ghisa costituiscono complessivamente circa l'1% dei materiali ferrosi prodotti

Nel campo delle costruzioni civili, l'acciaio, se paragonato agli altri materiali da costruzione, è caratterizzato da un elevato "*rendimento meccanico*" dato dal rapporto tra la resistenza unitaria e il peso specifico il che consente di realizzare strutture leggere e al tempo stesso capaci di offrire elevate prestazioni meccaniche. L'elevato rendimento meccanico, unito alla grande duttilità, ovvero alla capacità del materiale di subire sensibili deformazioni in campo plastico, rendono inoltre l'acciaio particolarmente idoneo a essere impiegato nelle applicazioni progettuali che richiedono una notevole capacità di "dissipazione energetica" da parte dell'organismo strutturale, quali appunto le costruzioni in zone sismiche. In aggiunta occorre considerare che la vasta gamma di acciai prodotti oggi giorno dall'industria siderurgica consente al progettista di disporre, nella fase della concezione progettuale, di un ulteriore grado di variabilità: la **resistenza del materiale**. Tale prerogativa, ossia la possibilità di utilizzare, nell'ambito di una stessa struttura, membrature formalmente identiche ma con caratteristiche meccaniche diverse, è nota convenzionalmente come "*quarta dimensione*" della costruzione metallica.

Da un punto di vista poi dell'analisi strutturale, vale a dire la previsione e l'interpretazione della risposta meccanica di un sistema strutturale, non va infine dimenticata la naturale predisposizione delle costruzioni metalliche a essere modellate in modo semplice e affidabile, sia mediante le teorie strutturali classiche sia attraverso le più recenti tecniche di simulazione numerica.

I vantaggi del costruire in acciaio non sono ovviamente solo di tipo strutturale ma riguardano anche la possibilità di realizzare strutture di elevato "pregio architettonico", in cui la regolarità delle forme non è più un elemento invariabile della geometria della costruzione.

Altro vantaggio è la possibilità di permettere, in modo rapido ed economico, trasformazioni e riparazioni anche sostanziali di organismi strutturali esistenti, consentendo anche l'eventuale recupero delle membrature sostituite. Come pure vanno sottolineate le potenzialità dell'acciaio nel campo del recupero dell'edilizia esistente dove, grazie alle sue caratteristiche tecnologiche e meccaniche, consente soluzioni ottimali per ogni classe di intervento, dal semplice consolidamento degli elementi portanti agli interventi generalizzati di recupero, ristrutturazione e riqualificazione funzionale.

Gli aspetti di carattere economico, infine, sono spesso condizionati positivamente dalla possibilità di industrializzare il processo produttivo degli elementi costruttivi nonché dall'adozione di tecniche di montaggio in cantiere rapide ed efficienti, soprattutto se paragonate a quelle in uso per altri sistemi costruttivi.

Naturalmente le costruzioni in acciaio, oltre che dai pregi, sono anche caratterizzate da alcune problematiche tipiche che, come i pregi, sono in gran parte legate alle proprietà del materiale base. Da un punto di vista strutturale, infatti, si riscontra generalmente l'impossibilità di sfruttare appieno l'elevato rendimento meccanico del materiale e ciò al fine di evitare la realizzazione di strutture eccessivamente snelle e come tali particolarmente sensibili nei riguardi dei fenomeni d'instabilità globali e locali. In aggiunta, l'elevato rapporto tra il modulo elastico, E , e la resistenza specifica del materiale, f_{yd} , rendono spesso condizionanti ai fini del progetto i requisiti di funzionalità, intesi come limitazione delle deformazioni e/o vibrazioni in esercizio. Ulteriore inconveniente è che, a causa della notevole quantità di energia necessaria alla lavorazione e al trasporto

dell'acciaio, l'energia incorporata in questo materiale è elevata, superiore a quella del calcestruzzo, del laterizio e del legno. Grazie alla sua resistenza strutturale, l'acciaio può però essere impiegato in quantità relativamente piccole, e ciò consente di contenere la quantità complessiva di energia incorporata nei componenti in acciaio utilizzati nelle costruzioni, la quale in effetti, come si è detto, mediamente risulta inferiore a quella del calcestruzzo e del laterizio. Un terzo inconveniente è rappresentato dal fatto che l'integrità delle strutture edilizie in acciaio è minacciata dalle alte temperature generate dagli incendi che provocano una consistente perdita di resistenza meccanica al materiale. Le misure dirette alla protezione delle strutture edilizie in acciaio dal calore in genere prevedono di evitare di lasciare "a vista" tali strutture".

Le strategie per la protezione delle strutture in acciaio dal calore degli incendi prevedono in genere la protezione delle strutture stesse mediante rivestimento con altri materiali: solitamente calcestruzzi gettati in opera, intonaci, involucri formati da pannelli di gesso o cartongesso, pannelli di protezione contenenti vermiculite o fibre minerali, oppure muratura. Altro sistema di protezione è rappresentato dall'applicazione di strati protettivi. A tal fine possono essere applicati, mediante spruzzatura, leganti miscelati con materiali sciolti che, per la loro scarsa conduttività e la loro elevata temperatura di fusione, ne accrescono la resistenza al calore. La scarsa conduttività richiesta a tali materiali è appunto finalizzata a ostacolare la trasmissione del calore agli strati sottostanti. I materiali più utilizzati a questo scopo sono la vermiculite espansa, la perlite espansa, fibre minerali come lana di vetro o fiocchi di gesso. I leganti impiegati nelle malte e negli intonaci in oggetto possono essere a base cementizia o gessosa (ovviamente tra essi e gli inerti non deve esservi incompatibilità). Un'altra strategia che implica la spruzzatura è quella che prevede l'impiego di particolari vernici, dette intumescenti. Lo spessore di applicazione delle vernici intumescenti varia di solito da 0,5 a 1,5 cm. Quando sottoposte a calore, esse carbonizzandosi si gonfiano, raggiungendo spessori di 5-10 cm e formando uno strato compatto in grado di proteggere il materiale di supporto dall'azione del fuoco.

La comparsa sul mercato delle vernici intumescenti ha permesso di esporre alla vista le strutture in acciaio, che prima di allora dovevano essere nascoste da rivestimenti resistenti al fuoco in pannelli o tavole o essere rivestite da spessori di materiale, malte o intonaci, più consistenti. La soluzione delle vernici intumescenti offre però una resistenza al fuoco minore di quella offerta dalle soluzioni viste in precedenza.

Un ultimo inconveniente connesso all'impiego dei materiali ferrosi consiste nel fatto che l'ossidazione del ferro, dell'acciaio e della ghisa avviene con modalità tali da rendere questi metalli vulnerabili alla corrosione degli agenti atmosferici.

Le leghe del ferro costituiscono l'unico gruppo tra metalli impiegati in edilizia a temere l'effetto dell'ossidazione. Non che gli altri metalli siano esenti da ossidazione: semplicemente, la patina ossidata in quei casi rimane compatta e protegge dall'ossidazione gli strati sottostanti di materiale. L'idrossido di ferro cioè la ruggine, è invece caratterizzato da scarsa resistenza meccanica e scarsa tenacità e tende quindi a sfaldarsi, lasciando gli strati sottostanti di materiale alla merce dell'ulteriore avanzata della ruggine. Ne deriva che l'ossidazione compromette le prestazioni dei materiali ferrosi: ferro, acciaio e ghise.

La pellicola di idrossido che si forma sui metalli non ferrosi può essere di vario colore. Quella che si forma sullo zinco è di colore bruno e quella che si forma sul rame è verde, dovuta al solfato di rame. Quella che si forma sui metalli ferrosi è bruno-rossastra.

Le strategie di protezione del ferro e delle leghe di ferro e carbonio contro la corrosione si basano su trattamenti superficiali mirati a renderli meno attaccabili dalla ruggine. In alternativa, è possibile impiegare leghe di per se non danneggiabili dall'ossidazione, come gli acciai inossidabili.

I trattamenti superficiali mirati a rendere meno attaccabili le superfici degli oggetti in materiali ferrosi prevedono spesso la ricopertura della lega con uno strato superficiale metallico che non possa essere danneggiato dall'ossidazione applicato per via elettrolitica o per via termica.

I metalli impiegati come materiali di rivestimento sono abitualmente il cromo, il nickel, lo zinco, lo stagno e il rame.

Oltre che ricoprendoli con altri tipi di metallo, gli elementi strutturali in acciaio possono venire protetti dalla corrosione verniciandoli. La maggior parte degli elementi strutturali in acciaio sono verniciati e di solito le vernici utilizzate sono organiche di origine sintetica, come le pitture acriliche, poliuretaniche o epossidiche.

La verniciatura dell'acciaio può essere effettuata sia su elementi in acciaio zincato o ricoperto con altra lega metallica di protezione, sia su elementi in acciaio non zincato ne protetto con alcuna lega metallica, In quest'ultimo caso, chiaramente la loro resistenza alla corrosione è minore.

2.2.6 L'acciaio strutturale

Con acciaio strutturale o acciaio da costruzione si indica il tipo di acciaio utilizzato come materiale da costruzione nel campo dell'ingegneria civile e adoperato per la realizzazione di:

- **costruzioni metalliche:** telai, travi reticolari, tralicci, utilizzato come elemento strutturale portante;
- **opere in calcestruzzo armato ordinario:** acciaio da armatura ordinaria o lenta;
- **opere in calcestruzzo armato precompresso:** acciaio da carpenteria per la cosiddetta "armatura lenta" ed acciaio da precompressione per cavi, barre, trefoli (pre-tesi e post-tesi).

In particolare la resistenza meccanica, la duttilità, la fragilità, la resistenza fisico-chimica, l'efficienza statica e la durabilità dell'acciaio influenzano pesantemente lo specifico settore di impiego ideale.

In zona sismica il vantaggio principale delle strutture in acciaio è la possibilità di ridurre il peso strutturale. Importante a questo proposito è la scelta del tipo di acciaio.

Per le travi la scelta di un tipo di acciaio S355 si traduce in un aumento di resistenza di circa il 50% rispetto a un normale S235.

L'aumento del costo del materiale è invece stimato intorno al 12% fino a qualche anno fa e tende a ridursi ulteriormente.

Pertanto quando il problema principale è la resistenza, il ricorso ad un acciaio di prestazioni più elevate è conveniente; l'interesse è invece nullo se determinante è la deformabilità in quanto il modulo elastico è il medesimo per tutti i tipi di acciai.

Per le colonne invece può risultare determinante il limite alla snellezza. In zona sismica è vincolante il limite allo spostamento di interpiano ai quali effetti il ricorso ad acciai ad alte prestazioni non comporta alcun vantaggio e risulterebbe semplicemente un aggravio economico. La scelta del tipo di acciaio è quindi critica principalmente per i solai.

Altra considerazione importante sull'acciaio è la possibilità di progettazione di strutture duttili, ovvero capaci di sfruttare anche le risorse plastiche dell'elemento. Fondamentale per questo tipo di progettazione è la scelta del tipo di telaio (*a nodi fissi* o *a nodi mobili*) andando poi a verificare le singole connessioni trave-colonna affinché la cerniera plastica si verifichi nel solaio e non nel pilastro evitando così la formazione di meccanismi.

È inoltre importante garantire un'elevata tenacità del materiale cioè che non avvenga una rottura fragile o un'importante perdita di duttilità nel caso in cui il materiale stesso è sottoposto a deformazioni con elevata velocità.

Le caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche dell'acciaio vengono determinate attraverso prove di laboratorio dette *prove di qualificazione del materiale*.

Le prove di qualificazione consistono essenzialmente in:

- **prove di trazione:** consentono di determinare le caratteristiche meccaniche del materiale, la resistenza e la deformabilità;
- **prove di resilienza:** consentono di misurare la tenacità dell'acciaio;
- **analisi chimiche:** costituiscono un controllo sulla composizione chimica dell'acciaio, il cui scopo è quello di assicurare che la presenza percentuale di elementi non previsti nella lega non superi il valore percentuale fissato dalla normativa.

La prova a trazione.

Il legame costitutivo che si determina dalle prove a trazione è caratterizzato da:

Tratto elastico lineare: il comportamento del materiale è perfettamente elastico; al crescere della forza applicata aumenta proporzionalmente la deformazione;

Tensione di proporzionalità (f_{pk}): limita il comportamento perfettamente elastico del materiale; superato tale valore il legame è ancora elastico, ma non più lineare. Tale tensione di proporzionalità è molto prossima a quella di snervamento e si considera in genere coincidente con quest'ultima;

Tensione di snervamento (f_{yk}): caratterizza l'inizio dello snervamento, ossia un processo deformativo del materiale a carico pressoché costante; a partire da questo punto il materiale entra in campo plastico;

Incrudimento: fase in cui a piccoli incrementi di forza corrispondono grandi incrementi di deformazione.

Tensione di rottura a trazione (f_{tk}): è la tensione massima che si raggiunge alla fine della fase di incrudimento. Superato tale valore, il diagramma nominale presenta un andamento decrescente, per effetto del fenomeno della strizione della sezione del provino. Nella realtà, le tensioni medie sulla sezione continuano a crescere, per cui il diagramma tensione-deformazione reale risulta essere sempre crescente fino alla rottura.

Resistenze di progetto e modelli meccanici.

Il calcolo e la verifica di una struttura in acciaio vengono effettuati con riferimento alla resistenza di progetto del materiale. Tale resistenza si ottiene riducendo il valore caratteristico della resistenza allo snervamento del materiale mediante un coefficiente di sicurezza, o fattore di riduzione, il cui valore dipende dal metodo di calcolo utilizzato. Nel *Metodo delle Tensioni Ammissibili*, il valore della resistenza di progetto, detta in questo caso "*tensione ammissibile*", è ottenuto riducendo il valore caratteristico della tensione di snervamento del materiale mediante un coefficiente di sicurezza pari a 1,5. Il legame costitutivo del materiale è quindi di tipo elastico lineare e risulta limitato superiormente da tale tensione. Conseguentemente, il calcolo e la verifica della struttura si effettuano in campo elastico.

Nel *Metodo Semiprobabilistico agli Stati Limite*, la resistenza di progetto allo *Stato Limite Ultimo (SLU)* si ottiene riducendo il valore caratteristico della tensione di snervamento mediante un coefficiente di sicurezza variabile tra 1,05 e 1,1. Il legame costitutivo è, in questo caso, del tipo elastico-perfettamente plastico a duttilità illimitata ed il calcolo e la verifica della struttura avvengono in fase plastica.

Di contro, in condizioni di esercizio (**SLE**), per la definizione della resistenza di progetto si adotta un coefficiente di sicurezza unitario ed il legame costitutivo risulta essere di tipo elastico lineare.

Altri legami costitutivi In alternativa al classico legame elastico-perfettamente plastico a duttilità illimitata (legame di Pradtl) possono adottarsi all'occorrenza altri tipi di legami, quale ad esempio il legame elasto-plastico a duttilità limitata oppure quello di tipo elasto-plastico incrudente. Naturalmente in questi casi andranno opportunamente specificati i valori degli ulteriori parametri necessari alla definizione univoca del legame costitutivo (deformazione ultima, rapporto di incrudimento, etc.)

In presenza di tensioni tangenziali e, più in generale, di *stati tensionali pluriassiali*, si adotta generalmente il criterio di Von Mises per esprimere la condizione di crisi puntuale del materiale acciaio. Tale criterio, in una condizione di taglio puro, fornisce un valore limite della tensione tangenziale pari a: $\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$.

Durabilità e sistemi di protezione.

Nell'ottica di perseguire politiche di sviluppo sostenibile nella gestione del patrimonio costruito, le tematiche riguardanti la durabilità delle costruzioni e l'ottimizzazione delle prestazioni durante l'intero ciclo di vita, sono, ad oggi, elementi fondamentali della progettazione strutturale. La durabilità è fortemente influenzata dal deterioramento indotto dalla corrosione atmosferica ed il suo controllo è un aspetto chiave per il progetto e la manutenzione delle costruzioni in acciaio. Infatti, nel caso specifico di un elemento fortemente corrosivo, per garantire che i requisiti di sicurezza e di affidabilità siano ancora soddisfatti, si rendono necessarie estensive e costose operazioni di manutenzione ed anche nel caso in cui la sicurezza non risulti compromessa, a causa del deterioramento nell'aspetto, si ha una notevole svalutazione del valore estetico ed economico del bene. Da un punto di vista strutturale, la corrosione di un elemento implica la perdita di una quantità di materiale; ciò si traduce generalmente in una riduzione di spessore degli elementi costituenti la sezione trasversale che comporta una diminuzione dell'area resistente e quindi delle prestazioni strutturali, sia in termini di resistenza che di rigidità e duttilità. Una delle principali tecniche volte a proteggere il materiale dall'aggressione degli agenti atmosferici consiste nell'adozione di particolari rivestimenti o nell'applicazione di specifiche vernici. Nell'ambito dei rivestimenti metallici, lo zinco è il materiale che trova più facile e largo impiego. Naturalmente, la resistenza di un rivestimento a base di zinco è funzione delle condizioni ambientali e la sua durata è proporzionale allo spessore dell'elemento da proteggere. La verniciatura protettiva è un trattamento che consiste nell'applicazione di un film protettivo in uno o più strati sulla superficie metallica. In commercio ne esistono varie tipologie tra le quali ricordiamo, senza pretesa di completezza, quelle antiruggine contenenti pigmenti passivanti (minio di piombo) e quelle antivegetative usate su supporti a diretto contatto con l'acqua per difenderli dall'attacco della vegetazione.

La resistenza al fuoco.

L'acciaio è un materiale incombustibile e, se sottoposto a un carico da fuoco, non rilascia fumi o gas tossici. Tuttavia, il suo comportamento meccanico si modifica sostanzialmente con l'aumentare della temperatura. In particolare, la sua resistenza a rottura, la tensione di snervamento ed il suo modulo di elasticità degradano fortemente a partire da un valore di temperatura compreso tra i 350°C ed i 600°C.

I sistemi di protezione dell'acciaio contro il fuoco consistono principalmente nell'applicazione sulle membrature di vernici protettive o di rivestimenti, quali pannelli di cartongesso o intonaci specifici. In alternativa è possibile ricorrere a speciali sistemi come quello che prevede l'uso di profili strutturali cavi in acciaio all'interno dei quali circola dell'acqua con funzione di raffreddamento.

2.3 Semilavorati in acciaio

Gli elementi in acciaio vengono prodotti industrialmente mediante un processo di laminazione a caldo o di sagomatura a freddo.

2.3.1 Elementi laminati a caldo

I profilati sono barre di acciaio aventi sezioni particolari a contorno aperto o cavo; le lamiere sono manufatti di spessore non superiore a 50 mm e di larghezza pari alla massima dimensione del laminatoio; i larghi piatti sono manufatti di spessore non superiore a 40 mm e larghezza compresa tra 200 e 1000 mm.

I tipi di sezione e le dimensioni geometriche dei profilati sono unificate in ambito europeo; le loro caratteristiche sono riportate in un *sagomario*. I profili a doppio T sono utilizzati soprattutto come travi e colonne di strutture a telaio. Ne esistono due distinte tipologie: **IPE** ed **HE**. I profili IPE hanno una larghezza b dell'ala pari alla metà dell'altezza h . I profili HE hanno invece $b=h$; per essere più precisi, esiste una serie normale, **HEB**, nella quale è effettivamente $b=h$ fino ad una altezza di 300 mm (per altezze maggiori b rimane costantemente pari a 300 mm), una serie leggera, **HEA**, ed una serie pesante, **HEM**, che hanno spessori maggiori e piccole differenze nell'altezza rispetto alla serie normale. A parità di area della sezione, e quindi di peso e costo, i profili IPE hanno momento d'inerzia e modulo di resistenza nettamente maggiore rispetto agli HE e sono quindi più convenienti in caso di aste soggette a flessione semplice; il momento d'inerzia è però molto basso e ciò li rende inadatti a sopportare momento flettente in due piani diversi ed anche molto sensibile all'instabilità in un piano. I momenti d'inerzia dei profili HE nelle due direzioni hanno una minore differenza e ciò rende questi profili più adatti ad essere usati come colonne, perché le colonne sono soggette a sforzo normale oltre che a momento flettente e questo inoltre agisce spesso in due direzioni. I profili a **C** e gli **angolari** sono usati soprattutto come aste di travature reticolari o aste di controventatura; vengono spesso accoppiati a due a due sia perché ciò conferisce simmetria alla sezione composta sia per comodità di realizzazione dei collegamenti.

2.3.2 Elementi sagomati a freddo

Le lamiere grecate sono semilavorati ottenuti mediante piegatura a freddo di lamierini o lamiere sottili. Trovano vastissimo impiego come elementi orizzontali e verticali di chiusura. I profili sottili sono elementi strutturali con sezioni, in genere a contorno aperto, ottenute mediante piegatura a freddo di nastri di acciaio di spessore di circa 3-4 mm. Nell'ambito dei profili sottili si possono ottenere le sezioni più varie che realizzano il massimo sfruttamento del materiale, anche "per forma" con conseguente ottimizzazione del peso strutturale. L'esiguo spessore di questi profili richiede una particolare attenzione del progettista ai pericoli connessi con fenomeni di corrosione e/o di instabilità locale.

2.3.3 Elementi costruttivi

Pilastr

Gli elementi portanti verticali sono di solito formati da profili chiusi tubolari quadrati, rettangolari o circolari o da profilati tipo HE che come i profilati chiusi a base quadrata presentano uguali valori di inerzia nelle due direzioni principali, e quindi minore sensibilità a fenomeni di instabilità per snellezza.

I pilastr

architettoniche. Il collegamento dei pilastri alle fondazioni avviene tramite piastre bullonate a tirafondi preventivamente annegati nel getto di calcestruzzo della fondazione.

Solai

I solai composti in acciaio-calcestruzzo sono costituiti da una lamiera grecata di acciaio su cui viene eseguito un getto di calcestruzzo normale o alleggerito. La lamiera ha la funzione di cassero durante la costruzione e costituisce parte o tutta l'armatura longitudinale dopo l'indurimento del calcestruzzo. Poiché non è sufficiente la semplice adesione chimica fra la lamiera e il calcestruzzo, sono previste opportune lavorazioni superficiali o particolari sagome per garantire l'aderenza fra i due materiali.

I solai misti in lamiera grecata e calcestruzzo hanno un ingombro modesto, ed una notevole leggerezza, se si rapporta il loro peso al carico che possono sostenere. Inoltre la posa di questi solai, una volta approntata l'orditura di sostegno, richiede solamente l'appoggio della lamiera sulla struttura, dopo di che il solaio svolge la sua funzione portante senza alcuna attesa, accelerando così i lavori e consentendo di procedere contemporaneamente su più piani. Inoltre, l'elasticità funzionale è la prerogativa più nota e riconosciuta dei solai metallici. Infatti su di essi sono consentiti interventi di ogni tipo, quali per esempio: tagli, aggiunte, saldature, modifiche, rinforzi e così via, che rendono elastiche e, entro certi limiti, modificabili le loro prestazioni, in modo da poter adattare ogni solaio alle esigenze che di volta in volta si presentano.

Solai metallici con calcestruzzo o senza possono presentare frecce superiori a quelle dei solai tradizionali in laterocemento. Per questo motivo è bene non posare pavimenti monolitici o realizzati con dimensioni troppo grandi, in quanto la flessibilità dei solai può determinare fessurazioni irregolari o sbriciolamento negli spigoli a contatto. È perciò consigliabile usare pavimenti flessibili o di piccole dimensioni; inoltre si dovranno adottare pavimenti leggeri in modo tale che il ridotto peso (e quindi costo) sia il più logico complemento dell'insieme solaio-struttura, che rappresenta nei solai metallici il miglior vantaggio.

Anche i tramezzi dovranno essere definiti con maggior accuratezza in quanto il loro posizionamento dovrà tener conto dell'entità delle frecce del solaio metallico.

I muri di tamponamento esterno, se eseguiti con sistemi tradizionali, dovranno essere appoggiati su di un'ideale orditura. I passaggi e le aperture attraverso i solai devono essere possibilmente disposti in modo da non interessare le nervature, ma solo la parte tra una nervatura e l'altra. I tavelloni sono elementi forati, con spessore tra 5 e 8 centimetri, larghezza di circa 25 centimetri e lunghezza che varia dai 50 ai 200 e più centimetri; le tavelle hanno analoga configurazione ma sono di spessore minore (4-6 cm) e di lunghezza massima compresa tra i 40-50 centimetri. Mentre le tavelle trovano impiego nelle controsoffittature, nelle "fodere" di pareti verticali e in specifici interventi di isolamento termico, come coperture di pilastri e cordoli in c.a. per evitare i ponti termici, i tavelloni vengono impiegati sia per realizzare strutture orizzontali, appoggiati su appositi travetti o muricci, sia per strutture verticali di controfodera o tramezzature.

Dagli anni Ottanta in avanti si è riaperto in Italia l'interesse per i solai in acciaio, pertanto anche il solaio in acciaio e laterizio, nelle attuali riletture, dimostra consistenti vantaggi soprattutto quando sono richieste elevate prestazioni rispetto ai carichi (in connubio al sovrastante getto di calcestruzzo armato) e la necessità di controsoffittare gli intradossi per inserire gli impianti. L'interasse fra le travi in acciaio è attestato sul valore di 45÷50 cm utilizzando i tavelloni da 45x20 cm (con spessori da 5 a 8 cm); tuttavia inserendo un adeguato getto di calcestruzzo armato, con o senza connettori alle travi in acciaio, l'interasse può aumentare fino al limite massimo di 120 cm, utilizzabile per le coperture inclinate non praticabili. Maggiore è l'interasse tra le travi e minore risulta la rigidità del solaio che, pur garantendo la resistenza ai carichi, presenterà una notevole flessibilità con

alti valori della freccia in mezzera. È necessario verificare se la profondità di appoggio delle travi nei piedritti di sostegno è adeguata soprattutto rispetto al materiale costituente i piedritti stessi. In generale per le murature è sempre auspicabile l'inserimento di un cordolo in calcestruzzo armato, oppure altro sistema di ripartizione, per esempio una trave in acciaio, tranne nei casi di muratura di consistente spessore (oltre le tre teste di mattone). Nei solai in acciaio e laterizio la sovrastante soletta in calcestruzzo armato è da considerarsi come sovraccarico, mentre, inserendo connettori, questi contrastano le forze di scorrimento tra la trave e la soletta, realizzando una sezione mista acciaio-calcestruzzo in cui il lembo superiore in calcestruzzo è soggetto a compressione e buona parte della sezione in acciaio è soggetta a trazione, mentre il laterizio interposto funge da cassaforma per il getto e da alleggerimento. Diverse sono le tipologie di connettori, ma i più diffusi sono quelli a piolo saldato alla trave, oppure quelli "infissi" meccanicamente nell'acciaio. In generale i connettori sono di altezza pari a circa 2/3 dello spessore del getto. Lo spessore minimo della soletta in calcestruzzo armato è di circa 5 cm, mentre lo spessore delle ali delle travi in acciaio, per l'utilizzo dei connettori, non deve essere inferiore ai 5 mm. Rispetto al sistema con la lamiera grecata, il solaio acciaio- laterizio dimostra un costo più contenuto e qualche vantaggio rispetto all'isolamento termico e acustico. Attualmente la ricerca, nel settore dei solai misti acciaio laterizio, è sorprendentemente aperta a nuove soluzioni; per esempio

verso nuovi laterizi appositamente disegnati per solai con travi in acciaio a doppio T, con intradosso liscio o rigato che può essere lasciato a vista, sfruttando il connubio fra l'acciaio e il colore del laterizio, oppure tornando a produrre laterizi "curvi" da interporre fra le travi a doppio T, realizzando solai con pseudo-voltine.

Nodi e connessioni

Una delle questioni che più influiscono sul comportamento delle costruzioni in acciaio è quella della connessione tra gli elementi della struttura; infatti essa costituisce un problema di duplice natura: costruttivo – esecutivo, progettuale – strutturale.

Nel primo caso riguarda le condizioni di esecuzione e montaggio in cantiere, nel secondo la trasmissione delle sollecitazioni tra gli elementi della struttura portante.

Dal punto di vista esecutivo i principali sistemi di connessione sono: la **chiodatura**, la **bullonatura** e la **saldatura**, che spesso sono impiegati in combinazione tra loro.

Chiodatura e bullonatura sono sistemi di connessione che prevedono l'utilizzo di elementi mobili che fanno da connettore e che necessitano di forature preventive degli elementi da unire. La saldatura permette attraverso la fusione metallica di ottenere collegamenti monolitici.

La chiodatura, prevalentemente usata in passato, si effettua realizzando i fori e poi modellando il chiodo in opera mediante battitura a caldo. La bullonatura è un sistema di connessione reversibile e particolarmente affidabile; i bulloni sono costituiti da vite e dado e come i chiodi sono soggetti a sforzi di taglio.

La distanza tra i bulloni deve rispettare precise regole per evitare che i fori siano troppo ravvicinati, di solito gli interassi tra i fori sono non minori di 2,5 volte il loro diametro.

Le saldature vengono realizzate sfruttando il principio dell'arco voltaico ed utilizzando generatori elettrici a basso voltaggio e materiale di apporto che fonde assieme ai lembi degli elementi da unire. Le saldature possono avvenire per sovrapposizione o di testa con l'aggiunta o meno di piastre. Per la corretta esecuzione di una saldatura occorre l'impiego di manodopera specializzata. Spessore e lunghezza delle saldature vengono calcolate in sede di progetto.

Generalmente le connessioni effettuate in cantiere sono bullonate mentre le saldature si effettuano in officina. La trasmissione delle sollecitazioni tra pilastro e trave o tra trave principale e trave secondaria può avvenire mediante connessioni **articolate** o **rigide**.

Le prime, realizzate mediante bullonatura, sono assimilate a vincoli di semincastro, le seconde si realizzano per saldatura con ripristino della sezione resistente.

Nelle strutture a telaio pluripiano si mantiene di solito la continuità dei pilastri interrompendo le travi, ma poiché non è facile trasportare profilati di lunghezza superiore ai 10 metri, si devono operare giunzioni tra tratti di pilastri.

Nelle strutture a telaio le travi principali sono quelle che trasferiscono i carichi ai pilastri, le secondarie quelle, che di solito, portano i solai. Le strutture in acciaio degli edifici in genere sono costituite da telai multipli, ossia a più campate complanari, paralleli collegati tra loro da travi perpendicolari ai piani su cui essi giacciono.

I telai in acciaio degli edifici di piccole dimensioni possono essere realizzati impiegando profilati a caldo o a freddo, mentre i telai in acciaio degli edifici di dimensioni medie o grandi sono sempre realizzati impiegando profilati a caldo.

I telai in acciaio si classificano in telai a trama larga e telai a trama stretta. I termini "largo" e "stretto" riferiti alla distanza di interasse tra i pilastri. I telai più utilizzati come strutture portanti degli edifici sono di gran lunga quelli a trama larga con maglia strutturale rettangolare.

La struttura in acciaio più tipica è quella a telaio costituita da pilastri continui e travi che si interrompono in corrispondenza dei pilastri, connesse ad essi con l'ausilio di angolari in acciaio bullonati o saldati ai pilastri stessi.

Le travi perimetrali possono anche essere fatte correre esternamente ai pilastri, in modo tale da non doverle interrompere, e connesse a essi con squadrette o angolari. In questo caso esse sono di solito a doppio T o a C. Solitamente le ali dei pilastri sono parallele alla direzione delle travi principali. La distanza tra i pilastri è variabile tra i 3 e i 10 metri, i solai sono appoggiati su travi secondarie con interasse tra i 2 e i 5 metri.

2.4 Differenze tra strutture in c.a. e strutture in acciaio

2.4.1 Perché scegliere l'acciaio.

Nell'ambito delle costruzioni civili, le strutture portanti di un qualsiasi organismo sono prevalentemente realizzate, oltre che in cemento armato, impiegando materiali metallici: si tratta soprattutto di *acciai* da carpenteria.

Tuttavia differenti sono le problematiche associate all'impiego dei due materiali (acciaio - c.a), come viene sinteticamente illustrato di seguito.

Il comportamento meccanico delle strutture metalliche è fortemente condizionato dalle proprietà del materiale *acciaio*, che presenta buona resistenza tanto a trazione quanto a compressione, oltre ad elevata resistenza, tenacità ed adattabilità plastica.

Inoltre, tra i principali vantaggi connessi all'impiego di strutture metalliche si possono annoverare:

- **Semplicità e maggior affidabilità di modellazione:** in fase di calcolo strutturale, il comportamento statico delle membrature in acciaio non risente delle incertezze di esecuzione, come avviene nei getti delle costruzioni in c.a. Le schematizzazioni teoriche possono soddisfacentemente adattarsi alla struttura reale sia per le caratteristiche fisico-meccaniche del materiale sia per le modalità di esecuzione delle unioni, dei collegamenti e dei vincoli. Questi aspetti si riflettono nell'impiego di coefficienti di sicurezza più bassi e quindi meno penalizzanti di quelli relativi, per esempio, al c.a.; questo aspetto è da un certo punto di vista più vero nella schematizzazione del materiale che nella realizzazione pratica dei vincoli.
- **Rapidità di esecuzione:** il procedimento costruttivo prevede una prima fase di produzione degli elementi strutturali, che si svolge in officina sotto il diretto controllo delle maestranze specializzate, mentre in cantiere si realizza il montaggio mediante il collegamento tra gli elementi già prodotti. In questo modo la costruzione non risente delle condizioni stagionali che bloccano i procedimenti "a umido" come nel caso delle costruzioni murarie e di c.a. e risulta conseguentemente più rapida.
- **Re-impiego:** accanto alla riduzione dei tempi descritta, si rileva la possibilità di trasformazione delle strutture, intesa sia come ampliamento della stessa per variazioni funzionali dell'opera, sia come intervento di rinforzo richiesto da deficienze statiche conseguenti ad una modifica dello schema statico originario e/o dei carichi di esercizio;
- **Elevato grado di efficienza:** il rapporto tra la resistenza meccanica (espressa in termini di massima tensione di calcolo) ed il peso specifico PS è, per i materiali metallici, molto elevato e sempre superiore a quello degli altri materiali da costruzione tradizionali, come il cemento armato. Questo aspetto si traduce nella possibilità di impiegare elementi strutturali di dimensioni ridotte e quindi di peso minore. A questo si accompagna dunque un più razionale uso degli spazi per il minore ingombro degli elementi portanti ed un minore impegno per le strutture di fondazione, soggette a carichi più bassi.
- Ottima risposta alle **azioni dinamiche**, dimostrato dall'ampio uso di questo materiale in termini di costruzioni industriali, nei ponti ferroviari e nelle zone sismiche.

Per contro, si annoverano alcuni svantaggi che penalizzano l'uso generalizzato del materiale acciaio:

- **Instabilità**, sia locale che globale, conseguente proprio all'aumentata snellezza delle membrature, che diventa uno degli aspetti più significativi in fase di verifica dell'elemento e dell'insieme della struttura metallica.
- **Elevata deformabilità**: che non consente di sfruttare appieno le capacità resistenti e pone problemi sia di instabilità che di funzionalità dell'opera. Proprio per questa ragione si impongono delle limitazioni, oltre che sulle tensioni, anche sulle deformazioni.
- **Degrado per corrosione**: il materiale acciaio è particolarmente sensibile all'attacco di agenti atmosferici che lo ossidano; pertanto è necessaria una costante manutenzione. Di recente sono stati prodotti nuovi tipi di acciaio (COR-TEN, IT-ACOR) nei quali il fenomeno della corrosione si auto - estingue in virtù della presenza di speciali additivi ferro-carbonio, rendendo superflua la protezione
- **Vulnerabilità** considerevole nei confronti del fuoco: per le strutture metalliche si registra una rapida diminuzione delle caratteristiche di resistenza al crescere della temperatura: questo comporta particolare cura nei confronti degli accorgimenti da adottare ai fini della protezione degli elementi portanti (prendiamo ad esempio il crollo delle Torri Gemelle dell'11/09/2001 a New York).

Emerge sin da queste considerazioni iniziali che la corretta progettazione di strutture metalliche, le quali abbracciano tutti i settori delle costruzioni (edilizia civile e industriale, ponti, grandi coperture, torri e pali di sostegno per elettrodotti, serbatoi e costruzioni marittime) non può prescindere dalla conoscenza delle problematiche fin qui richiamate. La costruzione metallica inoltre si adatta particolarmente alle tecniche di produzione in serie dalle quali viene condotta ad una **prefabbricazione industrializzata** sempre più spinta. Infine le moderne tecnologie danno la possibilità di introdurre nelle strutture dei materiali con caratteristiche di resistenza differenziate, con la creazione della cosiddetta "quarta dimensione", che si accompagna alle tre geometriche, che fornisce alla progettazione un ulteriore elemento di scelta. Quindi per il continuo miglioramento dei materiali ed il graduale incremento dell'industrializzazione le strutture metalliche presentano notevoli prospettive di sviluppo.

2.4.2 Differenze principali con il cemento armato.

Nel confrontare tra loro strutture o elementi strutturali in cemento armato e in acciaio occorre tenere conto di vari aspetti:

- le modalità costruttive, che condizionano il comportamento strutturale e la scelta dei modelli di calcolo ma soprattutto l'importanza da dare ai particolari costruttivi;
- l'influenza della differenza di resistenza tra acciaio e calcestruzzo, che per strutture in acciaio rende possibile l'uso di sezioni molto minori rispetto a quelle consuete in strutture in cemento armato, comportando di conseguenza:
 - problemi di deformabilità;
 - problemi di instabilità;
 - maggiore sensibilità a condizioni di carico trascurabili nel cemento armato;
 - vantaggi nel caso di grandi luci e in zona sismica;
 - il diverso comportamento a trazione e a compressione.

Per quanto riguarda le *modalità costruttive*, l'uso del cemento armato prevede la realizzazione di una struttura di tipo monolitico, in genere fortemente iperstatica, mentre l'adozione di una struttura in acciaio è basata sull'assemblaggio di elementi prefiniti, necessita di maggior precisione, dà la possibilità di definire il vincolo fornito dal collegamento e in genere è una struttura isostatica o poco iperstatica.

Le strutture in cemento armato ordinario sono usualmente realizzate in opera, preparando gabbie di armatura e casseforme ed effettuando quindi il getto di calcestruzzo. Le riprese di getto, se realizzate con cura, non inficiano la continuità degli elementi strutturali. Per questo motivo i modelli geometrici utilizzati nell'analisi strutturale sono sempre quelli di trave continua o telaio. Quando si vuole realizzare una connessione parziale, ad esempio una cerniera, occorre intervenire con opportuni accorgimenti costruttivi. Le strutture in acciaio sono invece realizzate mediante l'assemblaggio di elementi monodimensionali (profilati) o bidimensionali (lamiere) prodotti in stabilimenti siderurgici e preparati (taglio, foratura, saldatura) in officina. Le strutture in acciaio hanno quindi un grado di vincolo mutuo tra i vari elementi che tende ad essere il minimo possibile ed è necessario intervenire con opportuni accorgimenti costruttivi se si vuole elevare il grado di iperstaticità della struttura. Lo studio dei collegamenti diventa una parte predominante del progetto di strutture in acciaio, a cui si dedica più tempo e più cura che al progetto delle aste stesse e che spesso condiziona la scelta delle sezioni degli elementi strutturali.

Per quanto riguarda le prestazioni di questi due materiali, parlando di *deformabilità* possiamo asserire che le strutture in c.a. sono progettate essenzialmente per far fronte al problema della resistenza, poiché la verifica di deformazione è facilmente soddisfatta, mentre per quanto riguarda l'acciaio, un problema fondamentale è che la scelta della sezione è spesso condizionata più dai limiti di deformabilità che dai limiti di resistenza.

Nonostante il modulo elastico dell'acciaio sia quasi il triplo rispetto a quello del calcestruzzo, la dimensione delle sezioni in acciaio è tanto più piccola rispetto a quella delle sezioni in cemento armato da rendere molto rilevanti i problemi di esercizio connessi alla deformabilità. In numerosi casi la scelta della sezione è condizionata più dai limiti di deformabilità che dai limiti di resistenza. Non a caso l'Eurocodice 3 presenta prima gli stati limite di servizio (*cap. 4*) e poi gli stati limite ultimi (*cap. 5*).

Riguardo il problema dell'*instabilità*, la scelta di un metodo costruttivo in acciaio è fortemente condizionata sia dall'instabilità globale sia da quella dell'intera struttura, cioè delle parti compresse della sezione.

L'uso di sezioni molto piccole rende le aste compresse e le strutture dotate di elementi compressi particolarmente sensibili al problema dell'instabilità (dell'asta o dell'intera struttura). Nelle strutture in acciaio è quindi essenziale la verifica di stabilità delle aste compresse ed è spesso importante tenere conto degli effetti del secondo ordine nell'analisi strutturale, problemi entrambi usualmente trascurati nel caso di strutture in cemento armato. L'analisi dell'asta o della struttura ai fini dell'instabilità deve sempre essere effettuata tenendo conto della reale tridimensionalità della struttura.

Per quanto riguarda il *peso proprio* dei suddetti materiali, le strutture in acciaio hanno un peso proprio che è quasi trascurabile e che quindi presenta numerosi vantaggi in caso di zona sismica e per strutture con grandi luci. Per contro abbiamo però il rischio di inversione del carico per depressione da vento, cosa fronteggiabile con l'integrazione di elementi di *controvento* in grado di assorbire le forze orizzontali che esercitano una pressione in facciata sul manufatto.

A causa della differenza di sezioni, il peso proprio ha un'incidenza molto minore rispetto agli altri carichi portati. Ad esempio una copertura non praticabile in acciaio pesa circa $0.15 \div 0.30 \text{ kN m}^2$ a fronte di $2 \div 3 \text{ kN m}^2$ di una copertura in cemento armato. Un carico da neve di 0.90 kN m^2 rappresenta quindi il 70÷90% del carico totale per la copertura in acciaio ed il 20÷30% per quella in cemento armato. Inoltre il carico da depressione del

vento, che può valere $0.30 \div 0.50 \text{ kN m}^2$, è sempre trascurabile per una struttura in cemento armato (perché riduce le sollecitazioni) mentre può essere molto pericoloso per una struttura in acciaio (perché può portare a un'inversione di segno nelle sollecitazioni e quindi all'instabilizzazione di elementi che con le usuali combinazioni di carico sarebbero sempre tesi).

La bassa incidenza del peso proprio è estremamente utile in due casi:

- strutture di grande luce: il peso proprio di travi in cemento armato cresce all'aumentare della luce, tanto che il carico portato può diventare minimo rispetto ad esso ed oltre certe dimensioni una trave in cemento armato non riesce nemmeno a portare se stessa; con l'acciaio possono invece raggiungersi luci molto maggiori;
- strutture in zona sismica: l'azione sismica è proporzionale alle masse presenti; la riduzione del peso proprio comporta quindi anche una riduzione di tali azioni.

Riguardo il comportamento *a trazione* e *compressione*, possiamo dire che il cemento armato lavora sempre meglio a compressione. L'acciaio in compressione, oltre a presentare il rischio di instabilità dell'elemento o della struttura, ha anche problemi di instabilità locale che riducono la capacità di sopportare momento accoppiato a sforzo normale di compressione.

Per quanto riguarda la *resistenza al fuoco*, possiamo dire che il rapporto tra il fuoco e l'**acciaio** è un rapporto controverso: il fuoco è essenziale per produrre, forgiare e modellare l'acciaio, ma il fuoco o meglio l'incendio è ciò che può ridurre le proprietà meccaniche dell'acciaio fino a giungere al collasso della struttura. Diversamente dagli altri tipi di sistemi costruttivi, che collassano senza preavviso, una struttura d'acciaio offre il vantaggio di preannunciare il suo indebolimento con una progressiva forte deformazione permettendo così agli occupanti di mettersi in salvo ed al personale dei servizi antincendio e di soccorso di operare in condizioni di sicurezza. Occorre però rallentare il più possibile il processo di deformazione, conferendo all'acciaio una maggiore resistenza al fuoco al fine di mantenere, o prolungare il più possibile in caso d'incendio, le sue proprietà meccaniche. È opinione abbastanza diffusa che le strutture in acciaio siano particolarmente pericolose qualora vengano a trovarsi esposte al fuoco: infatti, sebbene l'acciaio sia un materiale con il pregio dell'incombustibilità, ossia che alle alte temperature non rilascia fumi e gas tossici, è anche un eccellente conduttore di calore, in grado di adattarsi velocemente alle temperature dell'ambiente circostante.

Ciò comporta che, quando una membratura metallica viene esposta all'azione del fuoco, la sua temperatura interna tende ad aumentare piuttosto rapidamente, il che si ripercuote in una altrettanto rapida diminuzione delle caratteristiche di resistenza e di rigidezza. Nell'istante in cui la temperatura interna raggiunge un valore di temperatura critica, variabile solitamente tra i 500°C ed i 650°C in funzione dello schema statico, delle condizioni di esposizione al fuoco e del livello di carico applicato, si verifica il *collasso strutturale*. In termini di sollecitazioni, questo comportamento può essere rappresentato mediante la figura seguente (*fig.63*): la condizione di collasso avviene quando la resistenza del materiale, a causa dell'incremento di temperatura causato dall'esposizione al fuoco, scende al di sotto della tensione indotta dai carichi esterni; la tensione interna all'elemento non varia con il tempo, in quanto si mantengono costanti sia il carico applicato sia la geometria della sezione.

È interessante notare come per altri materiali strutturali, quale ad esempio il legno, il comportamento al fuoco è esattamente opposto rispetto al caso dell'acciaio (*fig.64*): infatti, nel legno la tensione interna aumenta inesorabilmente (sotto carico costante) per via della

riduzione di sezione resistente dovuta alla carbonizzazione, mentre la resistenza del materiale si mantiene praticamente inalterata all'aumentare della temperatura.

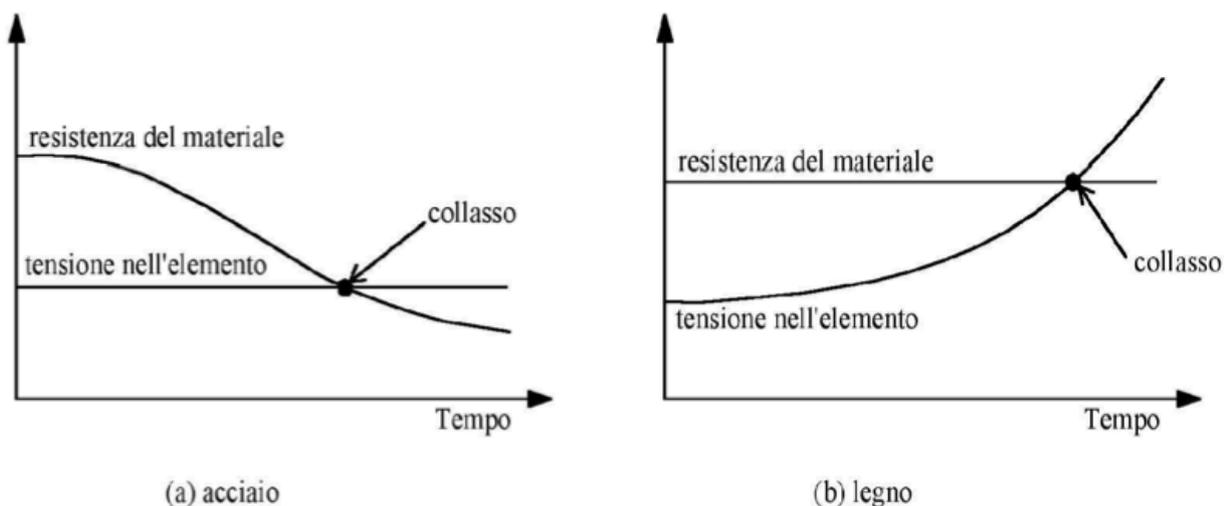


Figura 63-64: Diagrammi di comportamento al fuoco dell'acciaio e del legno.

Nel caso dell'acciaio, la velocità con cui viene raggiunta la condizione di collasso è strettamente legata alla velocità di riscaldamento delle membrature, che per praticità si ipotizza uniforme all'interno della sezione. A sua volta, la velocità di riscaldamento dipende dal fattore di sezione, o fattore di *massività*, definito come rapporto tra la superficie esposta al fuoco dell'elemento in acciaio ed il suo volume, entrambi riferiti all'unità di lunghezza. In alcuni Paesi tale fattore è sostituito dal rapporto tra il peso per unità di lunghezza ed il perimetro della sezione esposto alle fiamme.

Il fattore di sezione è importante in quanto la quantità di calore assorbita dall'acciaio nel corso di un incendio è direttamente proporzionale alla superficie esposta al fuoco, mentre è inversamente proporzionale alla capacità termica dell'elemento, data dal prodotto tra il calore specifico, la densità ed il volume.

In caso d'incendio, strutture in acciaio molto massicce non protette possono raggiungere la temperatura di collasso in un tempo superiore ai 30 minuti, mentre strutture realizzate con sezioni molto snelle, nelle medesime condizioni, raggiungono la temperatura di collasso in meno di 10 minuti.

Per rallentare la velocità di riscaldamento di un elemento in acciaio è necessario rivestire le superfici esterne con materiali isolanti, il cui compito è proprio quello di ostacolare il passaggio del calore; questi materiali possono presentarsi sotto forma di pannelli, intonaci o vernici intumescenti. La propagazione del calore all'interno di elementi protetti dipende, oltre che dal fattore di sezione, dalla conducibilità termica e dallo spessore del materiale isolante. Come si può facilmente intuire, un aumento di temperatura relativamente lento si ottiene con isolanti aventi bassa conducibilità termica o di elevato spessore, possibilmente abbinati a profili aventi bassi fattori di sezione.

Il comportamento meccanico dell'acciaio in condizioni d'incendio può essere descritto mediante un legame costitutivo di tipo *elasto-plastico* (fig. 65). Come anticipato, le caratteristiche di resistenza e di rigidità diminuiscono all'aumentare della temperatura: ai fini del calcolo, si assume che entrambe si annullino ad una temperatura di 1200 °C, sebbene in realtà ciò accada solamente alla temperatura di fusione dell'acciaio (1550 °C).

In genere, la tensione di snervamento di elementi in acciaio uniformemente riscaldati rimane pressoché invariata fino ad una temperatura di circa 400 °C, mentre crolla rapidamente per valori superiori. Per quanto riguarda il modulo di elasticità, si osserva che fino ai 100 °C non si registrano significative variazioni rispetto alla condizione a freddo,

mentre oltre i 100 °C si ha un rapido decadimento. L'andamento di tali grandezze al variare della temperatura è riportato in figura 66.

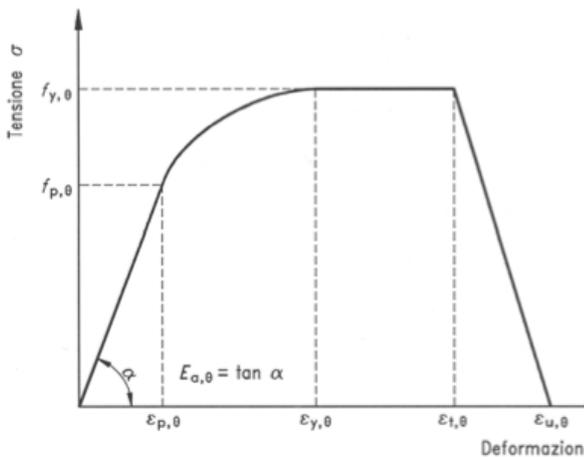


Figura 65: Relazione tra deformazione e tensione per acciai ad elevate temperature

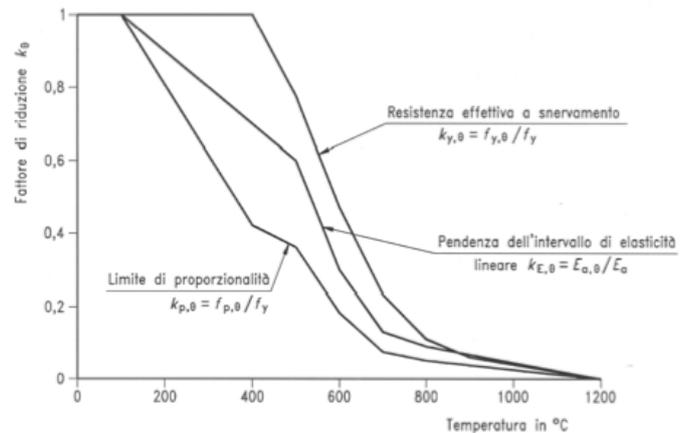


Figura 66: Variazione delle caratteristiche meccaniche per acciai esposti ad incendio

Un utile strumento per la valutazione delle prestazioni di resistenza al fuoco di elementi strutturali in acciaio esposti ad incendio standard ISO-834, privi o dotati di rivestimento protettivo, è costituito dal *nomogramma* riportato in figura 67.

Ai fini della verifica al fuoco, la temperatura raggiunta dall'acciaio dopo un certo intervallo di tempo, calcolata nella parte destra del nomogramma, deve risultare inferiore o al più uguale alla temperatura critica dell'elemento, determinata nella parte sinistra del nomogramma.

La parte sinistra del nomogramma fornisce la temperatura critica di un elemento in acciaio, in funzione del grado di utilizzazione μ_0 e del fattore correttivo k . Il fattore μ_0 esprime il grado di sollecitazione dell'elemento ed è dato dalla seguente espressione:

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0}$$

dove $R_{fi,d,0}$ è la resistenza di progetto per il tempo $t=0$, mentre $E_{fi,d}$ è l'azione sollecitante in condizioni d'incendio. Il parametro correttivo k viene introdotto per tener conto del grado di iperstaticità e della non uniforme distribuzione di temperatura all'interno della sezione in acciaio; tale fattore assume i seguenti valori:

- travi isostatiche esposte su quattro lati $k=1.00$
- travi isostatiche esposte su tre lati con soprastante soletta di calcestruzzo $k=0.70$
- travi iperstatiche esposte su quattro lati $k=0.85$
- travi iperstatiche esposte su tre lati con soprastante soletta di calcestruzzo $k=0.60$
- elementi per i quali è richiesta la verifica di stabilità a freddo $k=1.20$

L'incremento di temperatura in sezioni d'acciaio non protette viene dato attraverso le curve temperatura-tempo a tratto continuo presenti nella parte destra del diagramma, in funzione del fattore di sezione e del tempo di resistenza al fuoco.

L'incremento di temperatura in sezioni protette è invece fornito dalle curve tratteggiate presenti nella parte destra del diagramma.

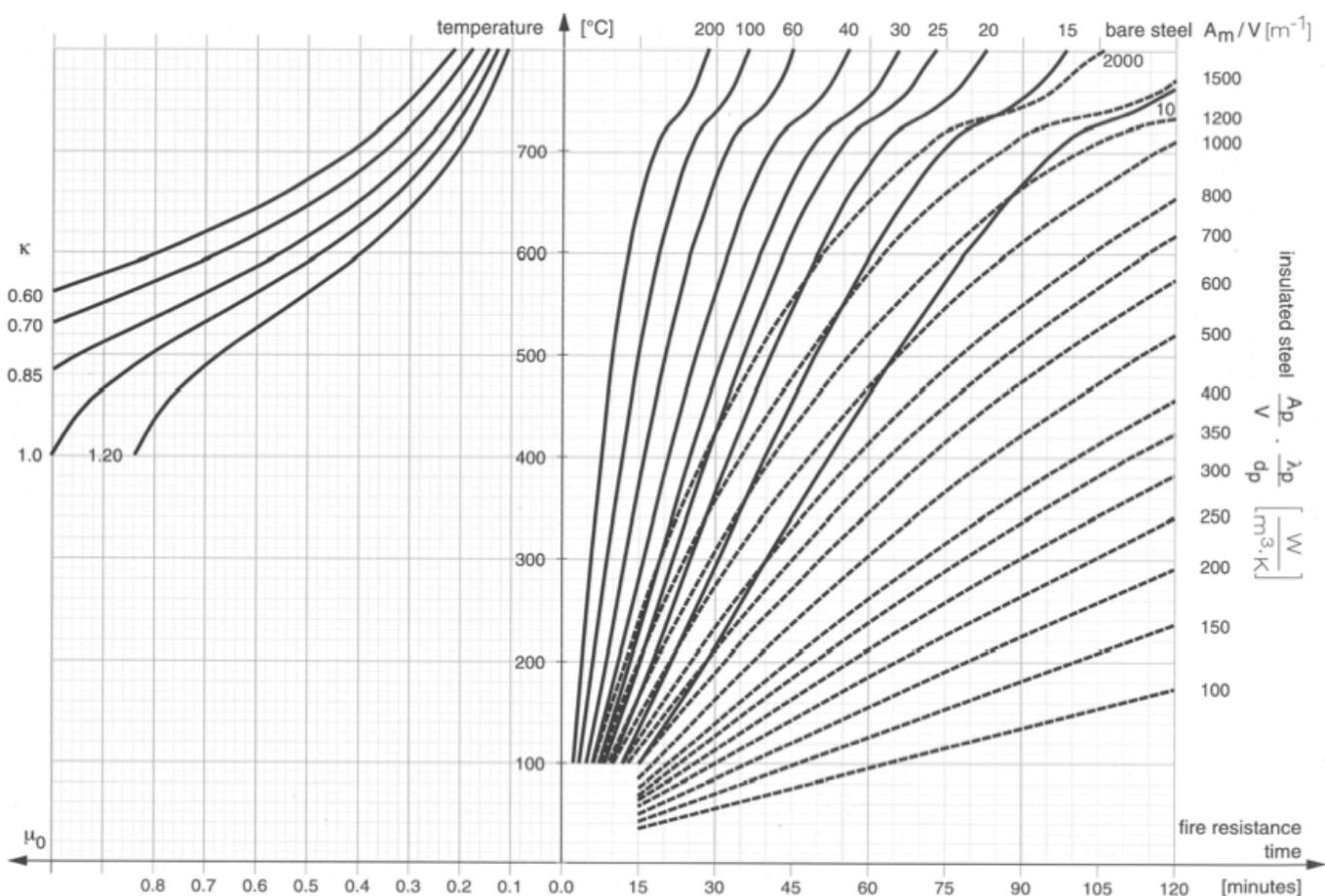


Figura 67: Nomogramma sull'incremento di temperatura in sezioni d'acciaio.

Per il **cemento armato** le premesse sono certamente differenti.

Nel nostro Paese la maggior parte degli edifici ad uso civile ed industriale viene ancora oggi realizzata con strutture portanti in conglomerato cementizio armato, gettate completamente in opera o parzialmente prefabbricate. Uno dei punti di forza di tale tipologia costruttiva è dato proprio dall'eccellente comportamento al fuoco esibito nel corso degli anni: numerosi sono i casi di edifici in cemento armato coinvolti in incendi di dimensioni considerevoli, i quali non solo hanno mantenuto la propria capacità portante per l'intera durata dell'evento, ma sono stati successivamente riparati e riutilizzati in breve tempo.

Il calcestruzzo è un materiale incombustibile caratterizzato da un'elevata inerzia termica, mentre l'acciaio che costituisce le barre d'armatura è molto più sensibile alle alte temperature. Il buon comportamento al fuoco di queste strutture è dovuto proprio all'azione protettiva esercitata dal calcestruzzo nei confronti delle armature di rinforzo le quali, non essendo direttamente esposte alle fiamme, si mantengono a temperature relativamente basse conservando così la propria capacità portante. In altre parole, il calcestruzzo riveste una duplice funzione, portante nei confronti dei carichi esterni ed isolante per l'acciaio nei confronti delle sollecitazioni termiche.

Il comportamento al fuoco delle strutture in cemento armato è influenzato da diversi fattori, tra cui spiccano lo spessore di ricoprimento delle armature (comunemente denominato *copriferro*), lo stato di sollecitazione interno, lo schema statico e le proprietà termiche e meccaniche dei materiali al variare della temperatura. Sono rari i casi di crolli importanti di strutture in cemento armato coinvolte in incendi, anche se occasionalmente avvengono. In questi casi, le cause non sono quasi mai da attribuire alla perdita di resistenza dei materiali, ma quasi sempre all'incapacità della struttura di assorbire le grandi deformazioni

termiche orizzontali che provocano il collasso dei pilastri e dei setti portanti per taglio o per instabilità.

Un fenomeno del tutto particolare che si può verificare quando un elemento in cemento armato viene sottoposto ad alte temperature consiste nel distacco locale del *copriferro*, con conseguente esposizione diretta alle fiamme dell'armatura: tale fenomeno è noto con il nome di **spalling**. Ciò avviene in conseguenza all'allontanamento del vapore acqueo contenuto nell'impasto cementizio causato dal riscaldamento: il vapore genera una pressione interstiziale che provoca nel calcestruzzo tensioni di trazione, spesso superiori a quelle ammissibili. Fattori che favoriscono questo fenomeno sono dunque l'alto grado di umidità del calcestruzzo, il rapido incremento della temperatura, la snellezza dell'elemento e l'elevato livello tensionale interno all'elemento. I calcestruzzi ad alta resistenza sono ancora più suscettibili allo spalling rispetto ai calcestruzzi ordinari a causa dell'elevata compattezza dell'impasto: infatti, la bassa porosità di questi materiali favorisce la saturazione degli interstizi e fa sì che in breve tempo la pressione interna del vapore acqueo raggiunga valori critici. Per prevenire questo fenomeno è possibile aggiungere nell'impasto sottili fibre in materiale plastico le quali, nel corso dell'incendio, sublimano lasciando il posto a nuove cavità: in questo modo aumenta la porosità del materiale e di conseguenza viene favorita l'evacuazione dell'umidità e la riduzione della pressione interstiziale. In alternativa è possibile addizionare l'impasto con fibre in acciaio che aumentano la solidità del materiale.

Oggi il mercato offre varie soluzioni per la realizzazione di strutture in cemento armato, che vanno dall'impiego dei cosiddetti "calcestruzzi speciali" all'impiego di elementi prefabbricati, ad armatura lenta o di precompressione. Appare quindi importante analizzare brevemente le principali problematiche specifiche connesse all'esposizione al fuoco di tali materiali.

Il *calcestruzzo ad alta resistenza* contiene additivi che ne aumentano la resistenza a compressione. Alle alte temperature, questo materiale subisce una riduzione di resistenza maggiore rispetto al calcestruzzo ordinario, in molti casi accompagnata da problemi di spalling. Ai fini progettuali, si suggerisce di ignorare il contributo resistente del calcestruzzo soggetto a temperature superiori ai 500 °C; per le colonne, è opportuno ridurre questo valore di soglia a 400 °C.

Il *calcestruzzo alleggerito* viene realizzato con cemento normale e aggregati leggeri, quali pietre di pomice, argilla espansa, perlite o vermiculite, materiali molto stabili alle alte temperature. Questo tipo di calcestruzzo presenta un ottimo comportamento in caso d'incendio, in quanto è caratterizzato da una conduttività termica inferiore rispetto ai calcestruzzi ordinari.

Questo genere di calcestruzzo è rinforzato con piccole fibre d'acciaio aggiunte nell'impasto, che ne incrementano la resistenza e la solidità. Le fibre solitamente hanno il diametro dell'ordine di 0.5 mm ed una lunghezza compresa tra 25 e 40 mm, con increspature o uncini agli estremi per garantire l'aderenza. In condizioni d'incendio, le fibre in acciaio aumentano la resistenza ultima e la duttilità del calcestruzzo.

Il comportamento al fuoco del *cemento armato precompresso* (a cavi pre-tesi o post-tesi) è analogo a quello del cemento armato ordinario, anche se in molti casi gli elementi precompressi risultano molto più sensibili alle alte temperature. Ciò è dovuto in parte alle caratteristiche meccaniche dei cavi di precompressione, che all'aumentare della temperatura si riducono più rapidamente rispetto alle armature lente tradizionali: solitamente si assume come temperatura di collasso per i cavi di precompressione la temperatura di 350°C contro i 500°C considerati per le armature lente. Un ulteriore punto di debolezza è dato dall'elevata snellezza di molti elementi prefabbricati, quali ad esempio i tegoli di copertura: l'esigenza di alleggerire il più possibile gli elementi spesso comporta una drastica riduzione delle sezioni resistenti e di conseguenza dei copriferri dei cavi di

precompressione. Inoltre, per le strutture prefabbricate assumono particolare importanza alcune potenziali modalità di collasso, quali la rottura per taglio, per perdita di aderenza dei cavi di precompressione, per perdita di equilibrio di singoli elementi e per spalling.

Quando si ha la necessità di intervenire strutturalmente su di una struttura già esistente, spesso si ricorre all'impiego di materiali di rinforzo da applicare sulla superficie esterna degli elementi strutturali. L'uso di rivestimenti in *fibre epossidiche* rappresenta una nuova tecnologia nel campo dei rinforzi esterni: si tratta in particolare di fibre di vetro, carbonio o teflon annegate in resine epossidiche, che vengono utilizzate per rivestire pilastri in cemento armato al fine di confinare il calcestruzzo, o vengono incollate alle superfici delle travi per migliorarne la resistenza flessionale. Tali materiali non hanno la minima resistenza al fuoco, in quanto sono prodotti che fondono già a basse temperature: tuttavia, se la struttura in cemento armato possiede di per se una resistenza sufficiente a reggere i carichi presenti al momento dell'incendio, si può ammettere la perdita del rinforzo esterno in condizioni d'incendio, salvo poi ripristinarlo ad evento esaurito.

Il calcestruzzo armato è composto essenzialmente da due materiali, il *conglomerato cementizio* e le *barre d'armatura* in acciaio. Le proprietà termiche dell'acciaio d'armatura sono del tutto simili alle proprietà termiche dell'acciaio da carpenteria.

Per quanto riguarda il conglomerato cementizio, vengono di seguito riportate le leggi di variazione del calore specifico e della conducibilità termica al variare della temperatura.

Il *calore specifico* del calcestruzzo è molto sensibile alle variazioni di temperatura per la presenza dell'umidità contenuta nell'impasto. Si può apprezzare tale fenomeno osservando la figura 68: il valore di picco compreso tra i 100 e i 200 °C è dovuto proprio all'espulsione dell'umidità in fase di riscaldamento. In prima approssimazione, si può considerare il calore specifico come indipendente dalla temperatura del calcestruzzo (*fig. 68*).

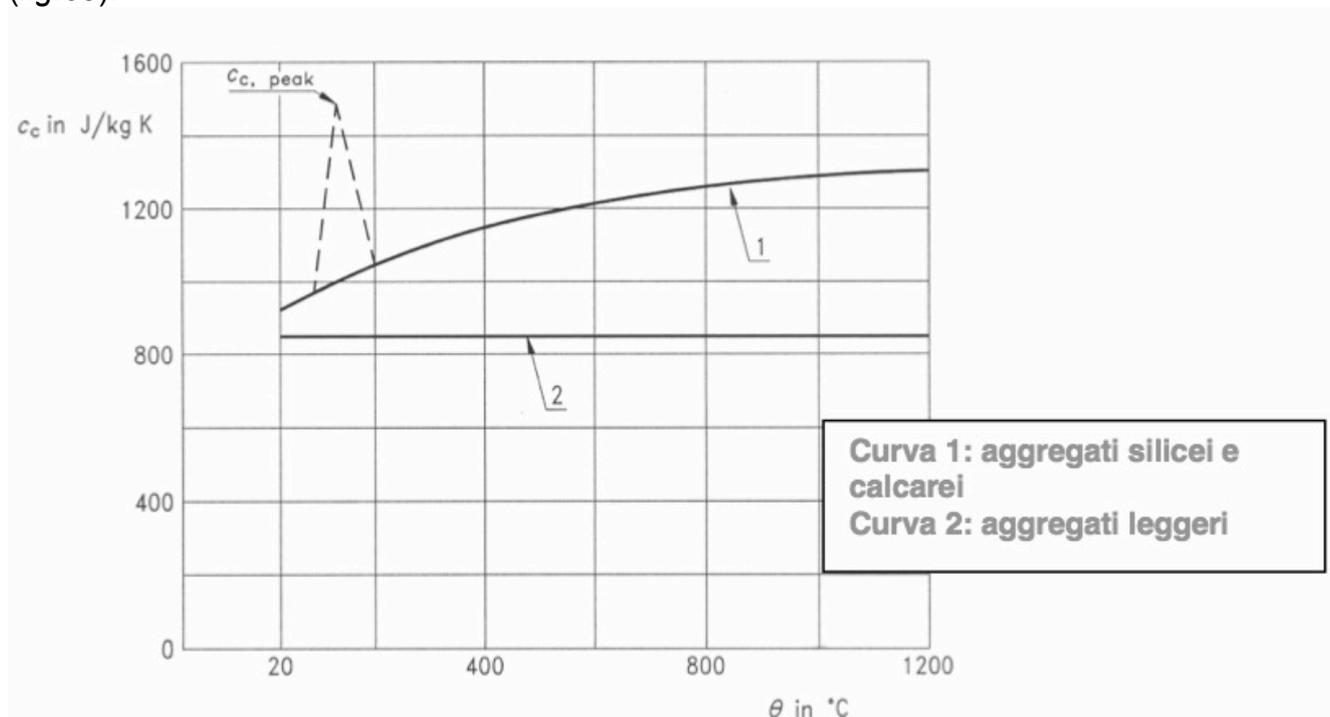


Figura 68: Calore specifico del calcestruzzo in funzione della temperatura (ENV 1992-1-2)

La conoscenza delle caratteristiche termiche dei materiali è necessaria per la determinazione dello sviluppo delle temperature interne durante l'esposizione al fuoco. A differenza di quanto accade per le strutture in acciaio, nel caso del cemento armato non è possibile risolvere in maniera semplificata l'equazione differenziale di diffusione del calore (*equazione di Fourier*) partendo dall'ipotesi di temperatura uniforme all'interno della

sezione, in quanto l'elevata inerzia termica del calcestruzzo genera importanti gradienti termici dai quali non è possibile prescindere.

Il problema della determinazione delle temperature interne non è quindi di facile risoluzione e richiede l'ausilio di appositi strumenti di calcolo di analisi termica. In alternativa, si possono trovare mappature termiche per elementi in calcestruzzo esposti ad incendio standard.

Come la maggior parte dei materiali strutturali, anche il calcestruzzo armato reagisce all'aumento di temperatura con una progressiva riduzione delle proprie caratteristiche di resistenza e di rigidità, dovuta al degrado dei materiali che lo costituiscono. Per quanto riguarda l'acciaio d'armatura, le proprietà meccaniche variano con la temperatura in modo analogo a quanto accade per l'acciaio da carpenteria.

In termini di relazione tensione-deformazione, il comportamento alle alte temperature di calcestruzzi ordinari soggetti a compressione monoassiale sono riportate in figura 69: si può notare che all'aumentare della temperatura la resistenza ultima a compressione diminuisce, mentre aumenta la deformazione corrispondente al picco di tensione.

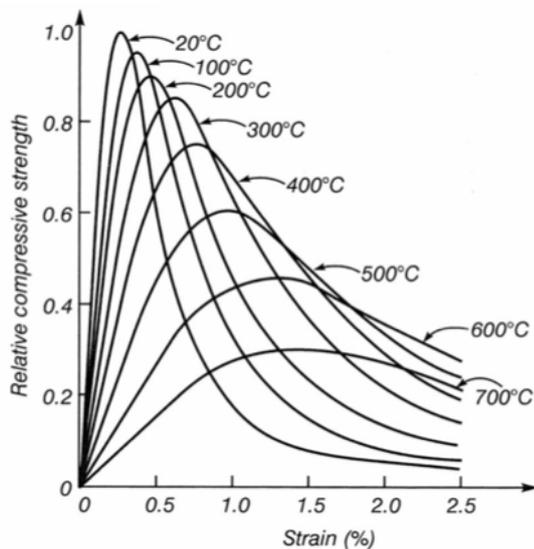


Figura 69: Diagrammi tensione-deformazione del cls soggetto a compressione monoassiale esposto a temperature elevate

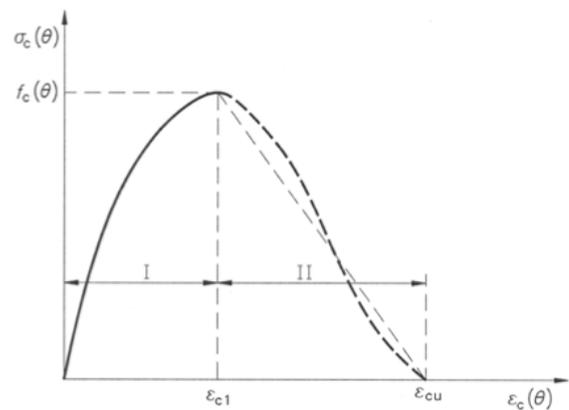


Figura 70: Modello della relazione tensione-deformazioni per calcestruzzi con aggregati silicei e calcarei in compressione ad elevate temperature (ENV 1992-1-2)

Ai fini del calcolo, il legame costitutivo assunto per modellare il comportamento al fuoco di tale materiale è del tipo riportato in figura 70: per una data temperatura, gli andamenti di tali curve sono definiti per mezzo di due parametri: la resistenza a compressione $f_c(\theta)$ e la corrispondente deformazione ϵ_{c1} .

In via semplificata è possibile ricavare $f_c(\theta)$ dal fattore $k_{c,q}$, pari al rapporto tra la *resistenza caratteristica* a compressione alla temperatura θ e quella a 20 °C.

L'acciaio è il materiale più **riciclabile** e **riciclato** al mondo.

L'Italia è il 1° Paese europeo per riciclo di rottame ferroso, con una media di circa 20 milioni di tonnellate annue di materiale che viene rifiuto nelle acciaierie nazionali. (Fonte: *Rapporto Ambientale Federacciai 2011*)

Le materie prime principali utilizzate per la produzione di acciaio a ciclo integrale, passando attraverso la produzione di coke (in cokeria) e di ghisa (in altoforno), sono i minerali di ferro e i carboni fossili, unitamente ad altre materie prime e ausiliarie (come ad

esempio calcare, dolomite, calce, ecc). Minerali di ferro e carboni sono essenzialmente materiali di importazione che arrivano agli stabilimenti a ciclo integrale in Italia via mare.

La materia prima principale per la produzione di acciaio a forno elettrico è invece costituita dai rottami ferrosi che derivano in parte da scarti provenienti direttamente dai processi di produzione, ma soprattutto dai prodotti in acciaio che hanno terminato il loro ciclo di vita. I rottami vengono parzialmente utilizzati anche nel convertitore a ossigeno in aggiunta alla ghisa proveniente dall'altoforno.

Mediante l'apporto di energia, nel forno elettrico e nel convertitore a ossigeno il rottame ferroso e la ghisa (proveniente dell'altoforno) si trasformano in acciaio che viene successivamente affinato per raggiungere la qualità desiderata e poi sottoposto a ulteriori lavorazioni/trasformazioni.

I prodotti che derivano dalle operazioni di modificazione plastica, chiamati impropriamente "finiti", costituiscono il materiale di partenza per altre industrie (meccanica, edilizia, automotive, elettronica, ecc.) che li utilizzano o li lavorano per la realizzazione di beni di consumo.

Se si considera perciò la quantità di oggetti e di componenti in acciaio presenti nei più diversi ambiti della società (nella sfera dell'abitare, del lavorare, del tempo libero, ecc.) o per la realizzazione dei quali è stato utilizzato l'acciaio, si può legittimamente affermare che l'acciaio è il materiale più importante e presente nella vita dell'uomo. Senza l'acciaio, non sarebbe possibile alcun progresso.

I prodotti così realizzati hanno una durabilità più o meno lunga, in funzione della tipologia e dell'utilizzo a cui sono destinati.

Mentre ad esempio gli imballaggi in acciaio raggiungono il fine vita e tornano in ciclo in tempi estremamente rapidi (circa 1 anno), l'acciaio da costruzione può durare svariate decine di anni (vita media 60 anni) prima di terminare la sua funzione ed essere anch'esso avviato al riciclo.

L'acciaio a fine vita viene raccolto separatamente e, a seconda della sua origine, può essere già sostanzialmente idoneo come materia prima o avere bisogno di trattamenti (ad esempio le tecniche magnetiche di separazione dai materiali estranei indesiderati) prima di essere destinato alla rifusione in acciaieria e ritornare così all'inizio del ciclo e dare quindi vita a nuovi acciai.

Lo schema del ciclo di vita dell'acciaio rende immediatamente visibile una delle sue principali caratteristiche, vale a dire di essere un materiale riciclabile al 100% che può essere riciclato virtualmente infinite volte senza che siano perse le qualità strutturali e di resistenza. Infatti, dal punto di vista chimico, il legame metallico di cui è costituito consente all'acciaio di ripristinare, durante il processo di solidificazione che segue la fase di fusione, le sue originarie proprietà prestazionali, al contrario di quanto avviene per i materiali non metallici le cui proprietà degradano progressivamente durante il riciclaggio.

Il recupero dei rottami ferrosi, rispetto agli altri metalli, viene inoltre particolarmente favorito dalle loro proprietà magnetiche che li rendono più facilmente separabili da altre componenti di materiali diversi presenti nei prodotti industriali o nei beni di consumo. Attraverso questa separazione i prodotti che contengono acciaio possono così dare origine, alla fine del loro ciclo di vita utile, a nuovi acciai per altre applicazioni.

Per questi motivi l'acciaio è di gran lunga il materiale più riciclabile e riciclato al mondo.

Secondo i dati della *World Steel Association*, nel 2008 oltre 475 milioni di tonnellate di rottame ferroso sono state avviate a riciclo, una cifra che supera da sola il totale combinato fatto registrare dall'insieme di altri materiali riciclabili, inclusa la carta, la plastica, il vetro, il rame e l'alluminio.

Grazie alle operazioni di riciclo a cui è sottoposto l'acciaio, è possibile ottenere una produzione ambientalmente sostenibile che consente la riduzione del consumo di risorse naturali e di energia, una minor emissione di CO₂ e una minor produzione di rifiuti.

Oltre il 45% della produzione siderurgica europea si fonda sul recupero e riciclo del rottame, che viene rifuso per dare vita a nuovi prodotti in acciaio. In particolare l'Italia è al primo posto in UE per la produzione di acciaio a forno elettrico, che utilizza come materia prima essenzialmente il rottame ferroso, e fa registrare il più elevato consumo annuo di questo materiale all'interno della Comunità.

Le acciaierie italiane nel 2011 hanno riciclato quasi 20 milioni di tonnellate di rottame ferroso, di cui circa il 70% proveniente dalla raccolta nazionale, il 18% importato da altri Paesi Europei e il rimanente 12% da Paesi Terzi.

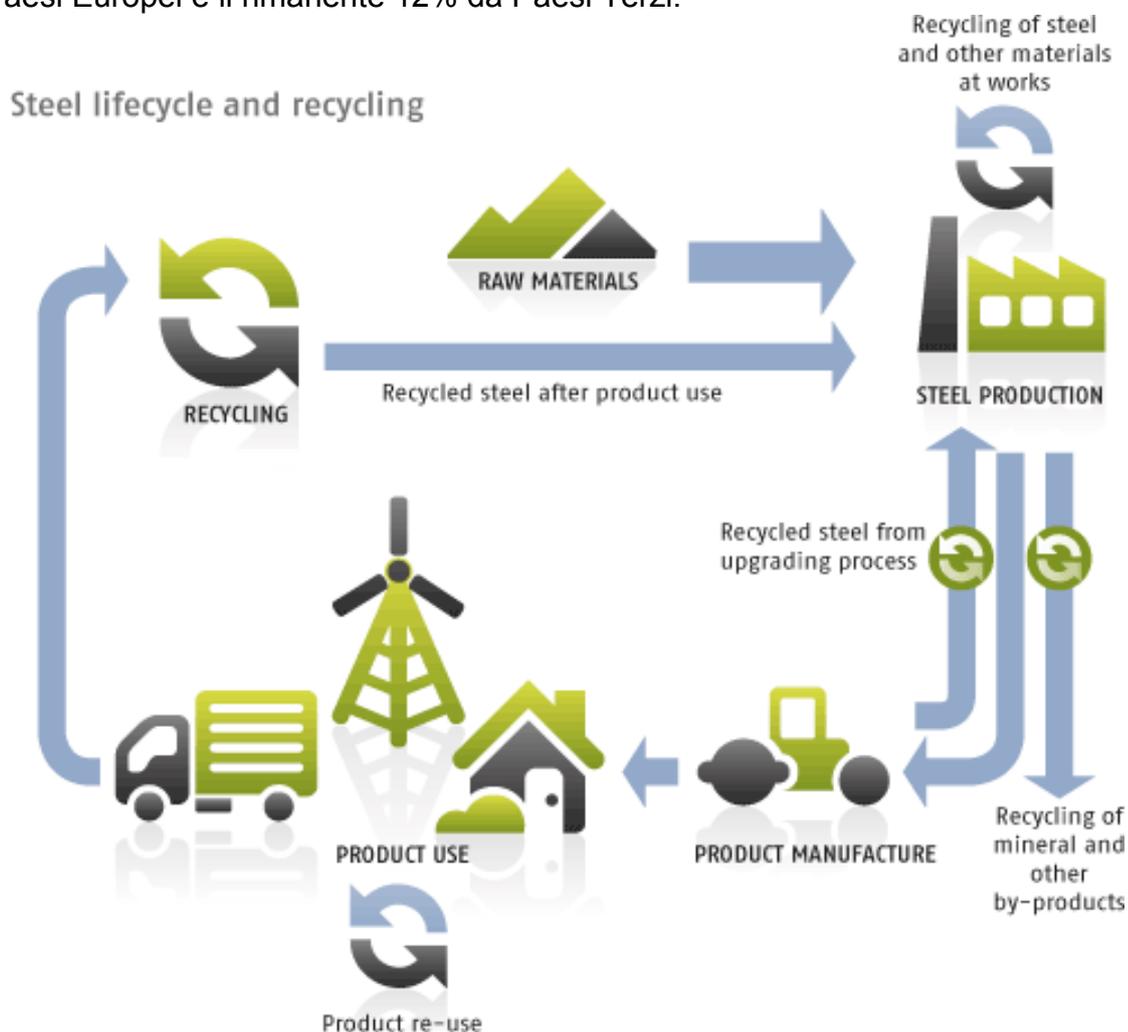


Figura 71: Ciclo di vita dell'acciaio

Negli ultimi anni è cresciuta enormemente la consapevolezza di governi, istituzioni, imprese e privati cittadini della necessità di ridurre il contributo antropico al *riscaldamento globale* e ai cambiamenti climatici, attraverso impegni condivisi e assunzioni di responsabilità da parte di tutti i soggetti coinvolti. Come noto, la CO₂ e gli altri principali gas serra non sono inquinanti a livello locale, ma producono effetti di alterazione del clima su scala globale. Pertanto, come unanimemente sostenuto dalla comunità scientifica internazionale, un contrasto efficace al cambiamento climatico è possibile solo se la sfida è condotta a livello globale attraverso politiche e strategie di riduzione delle emissioni di gas serra, applicate a livello internazionale con il coinvolgimento di tutti i Paesi grandi emettitori e di tutte le fonti di emissione.

Nonostante ciò, negli ultimi anni, anche a fronte della grave crisi che ha investito l'economia globale a partire dal 2008, mentre nell'Unione Europea il tema è rimasto tra le priorità strategiche dell'agenda politica e viene perseguito con decisione attraverso un

costante innalzamento dell'asticella degli obiettivi e dei vincoli, gli altri principali soggetti internazionali hanno decisamente allentato l'attenzione su questa problematica, sfilandosi dal **Protocollo di Kyoto** o preferendo rimandare a "tempi migliori" la definizione di ulteriori obiettivi vincolanti.

Questa situazione è emersa in maniera eloquente in occasione del consueto vertice annuale delle *Nazioni Unite* sui cambiamenti climatici, che è stato ospitato a fine novembre 2011 a *Durban* in Sud Africa, il quale ha sancito, in vista dello scadere del Protocollo di Kyoto, l'impossibilità di definire nell'immediato un nuovo accordo internazionale sulla riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, che coinvolga in maniera vincolante tutti i paesi industrializzati e i paesi emergenti. Le conclusioni del vertice, pur garantendo una sopravvivenza formale del Protocollo, a cui dopo il 2012 manterranno l'adesione solo i Paesi dell'Unione Europea e un numero esiguo e irrilevante di altri Stati, rimandano di fatto alla definizione di un futuro e indefinito accordo con impegni da formalizzare non prima del 2015, che non potranno essere in ogni caso applicati e divenire vincolanti prima del 2020.

Al contrario l'Unione Europea, come noto, comincerà da subito a imporre unilateralmente alla propria industria i nuovi vincoli sulla riduzione delle emissioni di CO₂ per il periodo 2013-2020, resi più onerosi dalla revisione dello schema di *Emissions Trading* comunitario. In questo contesto l'industria siderurgica italiana è da tempo impegnata responsabilmente a minimizzare le proprie emissioni di CO₂ e può vantare relevantissimi risultati in questo campo, ottenuti negli ultimi vent'anni attraverso ristrutturazioni, avanzamenti tecnologici, miglioramenti nell'efficienza dei processi e nel risparmio energetico. A partire dal 2005 il settore è incluso nel campo di applicazione della *Direttiva ETS*: tutti gli impianti soggetti sono tenuti a rigorose procedure di monitoraggio, verifica e comunicazione delle proprie emissioni di CO₂, che vengono annualmente certificate da enti terzi indipendenti e pubblicate su una apposito registro nazionale ed europeo.

Il contributo del settore siderurgico nazionale alla riduzione delle emissioni di CO₂ è testimoniato dagli ultimi dati ufficiali pubblicati dall'**UNFCCC** (Organo delle Nazioni Unite), come rappresentati nel grafico riportato di seguito.

Escludendo l'anno 2009, che ha fatto registrare un crollo delle emissioni a causa del drastico calo della produzione nazionale d'acciaio, dal 1990, anno di riferimento del Protocollo di Kyoto, fino al 2008 la siderurgia italiana ha ridotto le proprie emissioni in termini assoluti del 30%.

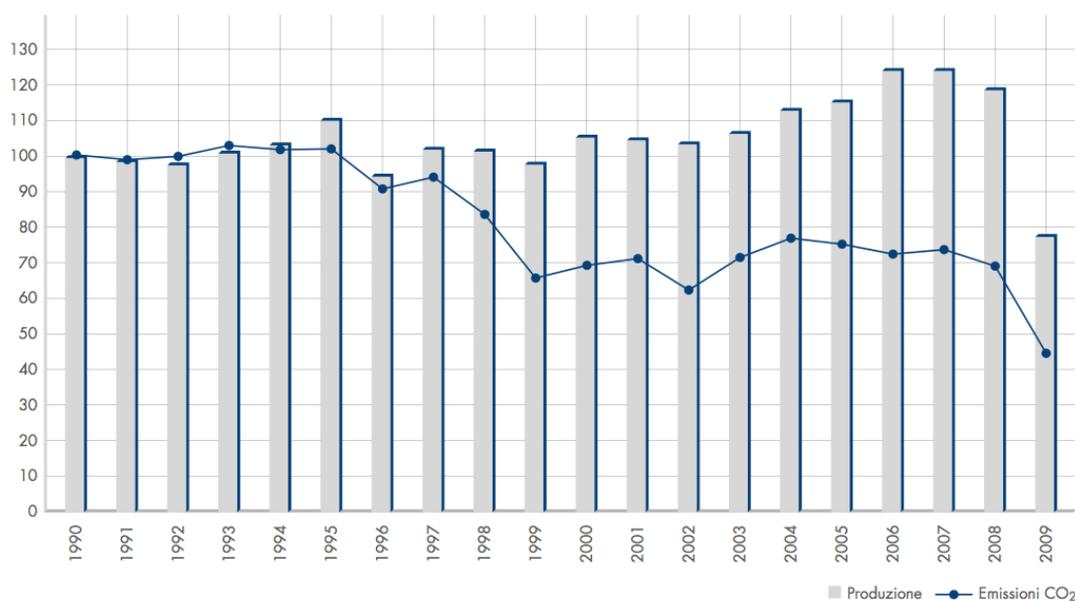


Figura 72: Emissioni di CO₂ della siderurgia italiana dal 1990 al 2009 (valori indicizzati, 1990=100)

Fonte: UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)

Per quanto riguarda le strutture in calcestruzzo, una struttura in calcestruzzo **eco-efficiente** è quella dove:

- L'impatto ambientale totale è stato minimizzato durante l'intero ciclo di vita;
- La struttura è stata progettata e costruita correttamente per soddisfare l'utilizzo per cui è stata ideata;

E dove

- I materiali sono fabbricati con un impatto ambientale ridotto.
- Il cemento è prodotto utilizzando le moderne tecniche produttive, riciclando materie prime e utilizzando energia prodotta da fonti alternative.
- Il calcestruzzo usa il minor quantitativo di cemento per ottenere i requisiti richiesti di resistenza e durabilità.

L'approccio basato sul ciclo di vita è il metodo standardizzato per identificare e valutare gli effetti ambientali dei prodotti da costruzione (estrazione, lavorazione, trasporto, utilizzo, manutenzione e smaltimento). Esistono vari modi per ottimizzare l'efficienza ecologica e l'economia del ciclo di vita di un progetto in calcestruzzo, come ad esempio il riciclare o l'utilizzare sottoprodotti di scarto derivanti da altri processi industriali durante la fabbricazione, o l'impiegare strategie di progettazione adeguate, che sfruttino le proprietà termiche del calcestruzzo.

Alla fine degli anni '90, i professionisti del settore delle costruzioni e gli utilizzatori finali, hanno iniziato a richiedere maggiori informazioni ambientali sui prodotti da costruzione, come ad esempio quali tipi di materie prime utilizzavano, il consumo energetico e le relative emissioni. L'industria ha risposto a questa esigenza attraverso le dichiarazioni ambientali di prodotto (**EPDs: Environmental Product Declarations**), che permettono di comunicare le performance del prodotto in un modo credibile e comprensibile.

I "tre pilastri" dell'edilizia sostenibile devono essere tenuti in opportuna considerazione quando si effettua una valutazione integrata delle performance di un edificio. Insieme con l'*aspetto ambientale*, devono essere considerate anche la *responsabilità sociale* (salute, confort e sicurezza) e gli aspetti di *crescita economica* (la disponibilità, la stabilità di valore nel tempo).

Il calcestruzzo è un materiale da costruzione:

- Versatile perché può assumere ogni tipo di forma e geometria ed è disponibile in una ricca varietà di colori;
- Robusto perché in grado di fornire protezione nei confronti di tutte le condizioni climatiche, di terremoti, incendi, inondazioni, esplosioni, ecc.;
- Durevole anche perché la vita di servizio originale di una struttura in calcestruzzo può essere facilmente prolungata attraverso l'applicazione di semplici misure;
- Con elevata massa termica che contribuisce attivamente a mantenere delle buone condizioni climatiche all'interno degli edifici;
- Con buone capacità d'isolamento acustico;
- In grado di fornire una buona protezione contro le emissioni radioattive prodotte dalla presenza di radon nel suolo;
- Inorganico e non infiammabile per la sicurezza antincendio;
- Che può essere completamente riciclato all'interno del settore delle costruzioni dopo la demolizione;
- In grado, quando demolito, frantumato come pietrisco e depositato all'aria aperta, di riassorbire una buona parte della CO₂ emessa durante la sua produzione.

Il calcestruzzo è un materiale da costruzione che quando è progettato, prodotto e utilizzato in modo appropriato può contribuire attivamente a realizzare uno sviluppo sostenibile, grazie alla possibilità di:

- Produrre il cemento tramite l'utilizzo di combustibili alternativi e di materie prime alternative, riducendo l'uso di risorse naturali non rinnovabili;
- Recuperare materiali alternativi nella produzione di nuovo calcestruzzo, potendo utilizzare, ad esempio, anche lo stesso calcestruzzo riciclato;
- Progettare facilmente il mix design della miscela di calcestruzzo in funzione delle esigenze di progetto come ad esempio adattare il tipo di resistenza del materiale e la porosità per rispettare i criteri prestazionali prescritti;
- Ottimizzare la progettazione della miscela di calcestruzzo basandola sulla disponibilità locale delle materie prime, minimizzando il trasporto di materiali;
- Aggiungere additivi che influiscono in modo significativo sulle proprietà del calcestruzzo determinando il miglioramento della qualità e delle prestazioni correlate con vari aspetti della sostenibilità;
- Migliorare la fluidità, riducendo così l'emissione di rumore e l'energia richiesta durante la messa in opera;
- Ridurre la permeabilità, aumentando la durabilità del prodotto;
- Ridurre i danni legati alle condizioni ambientali quali la corrosione indotta da carbonatazione, quella indotta dai cloruri in ambiente marino e non, l'attacco dei cicli gelo-disgelo o quello chimico derivante dalle sostanze presenti nel terreno o nell'acqua;
- Migliorare la qualità per ottenere una migliore finitura e una riduzione degli interventi di manutenzione.

Siamo ormai tutti consapevoli delle disastrose conseguenze provocate dagli effetti dei cambiamenti climatici a livello mondiale. Il report pubblicato nel 2007 dall'**Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)** conclude che gli anni dal 1995 al 2006 "si collocano tra i dodici anni più caldi, per quanto riguarda la misurazione della temperatura globale della superficie, rilevata tramite strumentazione", fin dal 1850. Il report evidenzia anche i problemi determinati dall'innalzamento del livello del mare e dalla contrazione dell'estensione delle aree innevate e dei ghiacciai, tutti fenomeni compatibili con il riscaldamento globale, sottolineando anche come le onde di calore stiano diventando sempre più frequenti.

Il **report Stern** evidenzia invece come i cambiamenti climatici potrebbero causare serie ripercussioni sull'economia mondiale se la società non sarà in grado di adattarsi e di adottare, contemporaneamente, anche delle specifiche azioni orientate a ridurre le emissioni di gas serra, per cercare di prevenire le possibili conseguenze dovute a ulteriori cambiamenti climatici.

Gli effetti che i cambiamenti climatici potranno provocare in Europa (riduzione delle piogge in alcune aree del continente, piogge più elevate e aumento del livello del mare in altre aree, inverni più temperati, estati più torride e siccitose ed eventi climatici estremi) influenzeranno la stabilità del suolo, l'erosione delle coste, le inondazioni e le onde di calore.

E' necessario emanare nuove norme e applicare nuovi standard per l'edilizia per adattarsi ai cambiamenti climatici. La mancanza dell'attivazione di misure proattive oggi, renderà necessario attivare misure molto più costose in futuro.

Gli esperti prevedono che gli eventi meteorologici estremi, come ad esempio inondazioni, la crescita del livello del mare e i disastri naturali, incideranno pesantemente sulla società con effetti devastanti. Anche in questo caso i prodotti del calcestruzzo possono giocare un

ruolo importante e alla portata di tutti per aiutare la società a combattere e prevenire le dannose conseguenze dei cambiamenti climatici, proteggendo le persone, le proprietà e l'ambiente. Essendo un materiale resistente e versatile, il calcestruzzo sarà in grado di fornire il livello richiesto di adattamento ai cambiamenti climatici in grado di resistere al crescente numero di eventi estremi.

Le costruzioni in calcestruzzo, in caso di danni causati dall'acqua, possono essere recuperate rapidamente, riducendo così il tempo necessario per ripristinare un'area danneggiata dalle inondazioni.

Più si costruiscono edifici ed infrastrutture robuste, meno sfavorevole sarà l'impatto futuro legato agli eventi meteorologici avversi sulla società e sull'ambiente.

Per aiutare l'Italia a combattere e adattarsi ai cambiamenti climatici attraverso uno **sviluppo sostenibile** è necessaria la cooperazione di tutti gli *stakeholder* coinvolti.

Un ambiente edificato sostenibile, capace di affrontare le sfide future, deve:

- Garantire una vita lunga, al fine di evitare la costruzione, la demolizione e la ricostruzione dell'opera;
- Consumare poca energia durante la fase di utilizzo considerando l'intero ciclo di vita;
- Essere "in grado di adattarsi", permettendo la flessibilità e l'adattabilità futura.

Sfortunatamente, alcuni approcci alla progettazione adottati per mitigare i cambiamenti climatici, non prendono in considerazione anche l'aspetto dell'adattamento. Alcune regolamentazioni e standard nazionali per la progettazione, sottolineano, con eccessiva enfasi, la minimizzazione degli impatti dell'energia utilizzata per la produzione dei prodotti, mentre poca o nessuna attenzione è dedicata, ad esempio, alle performance dell'edificio durante la fase di utilizzo considerando l'intero ciclo di vita.

I benefici dei materiali pesanti utilizzati nei lavori di costruzione devono essere riconosciuti all'interno delle legislazioni esistenti e future, come ad esempio nella *Direttiva sulle performance energetiche degli edifici*. In aggiunta, gli strumenti nazionali messi a disposizione per la valutazione sia dell'energia consumata, sia delle performance sostenibili di un edificio, necessitano di essere emendati per interpretare correttamente i benefici della massa termica e dei cambiamenti climatici.

Il calcestruzzo è in grado di giocare un ruolo strategico ed è indispensabile per l'adattamento ai cambiamenti climatici. Tuttavia *Federbeton*, nell'ottica del progetto d'innovazione che sta portando avanti, richiama l'attenzione sul fatto che per poter aiutare le generazioni future è necessario:

- Assicurare che tutte le nuove infrastrutture e gli edifici siano costruiti per essere in grado di adattarsi ai cambiamenti climatici;
- Tenere in opportuna considerazione tutti gli aspetti economici e sociali dei cambiamenti climatici di lungo termine, costruendo un futuro sicuro per quelli più esposti e includendo la realizzazione di case a bassa, o a zero emissione, alla portata di tutti;
- Considerare l'ambiente complessivo e le performance energetiche dell'intero edificio o dell'infrastruttura durante l'intero ciclo di vita;
- Considerare in modo opportuno, nelle normative sugli edifici, sia l'efficienza termica complessiva e i maggiori benefici dei materiali pesanti durevoli, sia il contesto dei cambiamenti climatici, in modo tale che sia quantificato e precalcolato l'utilizzo sia passivo che attivo dell'efficienza termica;

- Stabilire linee guida per la pianificazione e l'uso del territorio per massimizzare, per esempio, il riutilizzo delle aree dismesse ed evitando la costruzione su alvei di piena.

Possiamo quindi concludere che l'innovazione che sta pervadendo tutta la filiera del cemento e del calcestruzzo armato sta proprio in questo cambio radicale di mentalità nel progettare e realizzare i prodotti che vengono proposti sul mercato.

Oggi gli operatori stanno sempre più comprendendo che le prestazioni da proporre al mercato non sono più solo quelle tradizionali della statica/dinamica contenute nei manuali della scienza delle costruzioni ma quelle, molto più numerose, sopra descritte che conferiscono o meno, nel loro complesso, il livello di eccellenza indispensabile per competere con materiali alternativi o soluzioni costruttive concorrenti.

Il problema della **sostenibilità economica**, che anche secondo la normativa è uno dei requisiti più importanti di una costruzione, può essere posto e risolto in termini di ottimizzazione strutturale. Il concetto di ottimizzazione a cui ci si vuole rivolgere è legato alla nozione più ampia di *correttezza costruttiva*, intesa come l'integrazione di tutti gli aspetti coinvolti nella realizzazione di un'opera architettonica: la finalità utilitaria, la concezione strutturale, l'esigenza estetica le limitazioni economiche.

Parlando di costi, l'alto livello di *'prefabbricabilità'* delle costruzioni in acciaio, e la facilità di assemblaggio della carpenteria metallica, consentono di realizzare rapidamente soluzioni finite, *'chiavi in mano'* in tempi record. L'assemblaggio in officina, dove si garantiscono controlli, collaudi e standard qualitativi di assoluta affidabilità, riduce, inoltre, i rischi dovuti a fattori e condizioni ambientali tipici della costruzione in opera in cantiere.

La rapidità costruttiva è, in definitiva, un importante elemento da tenere in considerazione nella valutazione del costo finale, anche in relazione alla ridotta manodopera richiesta.

La costruzione in acciaio permette, così, un rapido ritorno degli investimenti, riducendo gli oneri finanziari ed anticipando il momento in cui il fabbricato finito comincia a rendere. La standardizzazione delle soluzioni in acciaio diminuisce i tempi di consegna senza limitare la personalizzazione architettonica dell'opera

3. Tipologie strutturali degli edifici alti

3.1 Introduzione

Tra le numerose problematiche legate alla realizzazione di un edificio alto, sono di fondamentale importanza: la scelta della **tipologia strutturale** (acciaio, calcestruzzo o mista), la definizione delle **azioni sollecitanti** di progetto ed il **controllo** in fase di esecuzione.

La struttura statica di un edificio alto è progettata per sostenere i carichi di progetto, sia verticali che orizzontali, limitando le oscillazioni indotte dal vento e dal sisma.

A partire dagli anni '90 hanno cominciato ad emergere nuove problematiche: l'attenzione all'inserimento nel contesto storico urbano ed ambientale, la conservazione dell'energia, la possibilità di illuminazione e ventilazione naturali, l'analisi del comfort sotto l'azione del vento.

I molteplici aspetti fino ad ora accennati, da quelli *urbanistici* a quelli *estetici*, da quelli *funzionali* a quelli *tecnologici* e *strutturali*, legati l'un l'altro in un rapporto di necessità-complementarietà con l'insieme, chiariscono come sia obbligatoriamente complessa ed articolata l'analisi dell'edificio alto.

Se nel progetto d'architettura bisogna conciliare esigenze di tipo funzionale, estetico e tecnologico con il problema statico, si comprende allora come ciò sia ancora più vero nel caso del grattacielo, per il quale l'incidenza della componente strutturale è tale da condizionarne la matrice d'impianto stessa, sia in termini di modalità utilizzative che sotto l'aspetto puramente formale.

L'obiettivo è quello di individuare quali siano i fattori discriminanti che consentono di identificare, in maniera chiara e puntuale, criteri di *classificazione* e quindi di *comparazione* tra i differenti modelli strutturali, partendo dal semplice presupposto che l'intensità e gli effetti delle forze che agiscono sul grattacielo -il quale viene schematizzato idealmente come una trave a sbalzo dalle fondazioni- dipendono in maniera direttamente proporzionale dall'altezza complessiva della costruzione.

Se i primi edifici alti venivano progettati considerando i soli carichi di gravità in seguito, compresa la necessità di un'adeguata controventatura, si cominciò a tener conto principalmente di quelli laterali, fino a giungere negli anni Ottanta alla nozione di "*struttura ottimale*" secondo la quale, ai fini di una migliore utilizzazione senza sprechi dei materiali e quindi di una maggiore economia di costruzione, si deve ricercare l'uguaglianza tra l'efficienza del sistema rispetto alle forze orizzontali e quella nei confronti dei pesi verticali. Naturalmente quest'ultima condizione è quasi sempre irraggiungibile, in quanto le membrature controventanti risultano nella maggior parte dei casi sovrabbondanti rispetto ai carichi di gravità, proprio in virtù dell'amplificazione dei carichi laterali dovuta all'altezza degli edifici: infatti se quest'ultima si rapporta ai costi strutturali, si nota come quelli relativi al sistema resistente alle forze orizzontali tendono ad aumentare progressivamente con il numero di piani, mentre per i sistemi contro i carichi di gravità il costo dei solai rimane costante o varia minimamente e quello delle colonne cresce solo linearmente con l'altezza. Conseguentemente al fatto che le azioni del vento condizionano in misura maggiore la progettazione strutturale di un grattacielo, gli ingegneri catalogano e raggruppano le tipologie dell'edificio alto in base alla primaria importanza del sistema controventante della costruzione che è essenziale venga accuratamente analizzato e verificato nel progetto.

La tipologia dell'edificio alto ha subito molte variazioni a partire dal primo grattacielo costruito a Chicago alla fine dell'800. La crescita in altezza e le nuove forme hanno determinato l'ideazione e lo sviluppo di nuovi sistemi strutturali: da una prima impostazione "*a gabbia*" dell'edificio, si sono susseguite procedure che legano tra loro funzionalità, equilibrio statico e dinamico, tecnologia e aspetto architettonico.

Sono nati quindi sistemi a telaio controventati, strutture a nucleo centrale, a tubo esterno, a fascio di tubi, a “megatelaio”, ecc.

Negli anni '50 e '60 il grattacielo assume la sagoma di un prisma puro. Oggi i progettisti si cimentano in torsioni, segmentazioni e geometrie inusuali. La forma dell'edificio alto rispetta quindi la sua struttura.

Determinanti nel progetto del sistema statico di un edificio a torre sono le azioni orizzontali del sisma e del vento. La maggiore altezza infatti rende più pericolose le azioni laterali che richiedono una maggiore resistenza strutturale e inducono oscillazioni che devono essere opportunamente valutate per garantire il comfort degli occupanti dell'edificio.

Per edifici situati in zona sismica sono preferibili strutture flessibili, mentre in condizioni di forte vento la soluzione strutturale migliore è un edificio rigido e pesante. Nel caso i due problemi si presentassero contemporaneamente, la soluzione ideale si prospetta nell'aggiunta di dispositivi di smorzamento, che riducono efficacemente la risposta della struttura alle azioni orizzontali.

I codici di progetto prevedono l'assunzione dei carichi da vento come carichi statici equivalenti, che però non riescono a descrivere, per gli edifici alti, i complessi fenomeni dinamici generati dall'interazione vento-struttura. Fondamentali in questo caso risultano essere gli studi in galleria del vento: si individuano infatti i carichi di pressione realistici sulla struttura, si misurano le accelerazioni indotte dal vento, si individua una forma aerodinamica che riduca le sollecitazioni indotte dal vento, e si valuta la necessità di utilizzare un dispositivo di smorzamento. Negli ultimi anni si stanno inoltre diffondendo simulazioni numeriche con modelli di fluidodinamica computazionale: essi sono in grado di simulare i complessi comportamenti dinamici di un flusso e la risposta aerodinamica di interazione fluido-struttura.

Purtroppo dopo l'11 Settembre 2001 ci si chiede se l'edificio alto risulti essere una tipologia strutturale ancora proponibile. L'attacco terroristico alle **Torri Gemelle** del World Trade Center ha infatti focalizzato l'attenzione sulla vulnerabilità di queste strutture. Per questo motivo i progettisti, gli enti di ricerca e gli istituti normativi si concentrano ora in modo più scrupoloso sul progetto di una struttura soggetta all'azione del fuoco, garantendo migliori dispositivi di protezione passiva e attiva, e un'adeguata progettazione delle vie di fuga.

L'approccio generale al progetto per le azioni naturali del vento, del sisma e del fuoco è chiamato *performance based design*, in quanto basato sulle prestazioni della struttura: si individuano alcuni livelli di rischio ed il corrispondente comportamento richiesto all'edificio.

L'approvazione e la realizzazione in tutto il mondo di un numero sempre maggiore di edifici alti sono la prova che questa tipologia presenta ancora molte potenzialità di sviluppo. Le critiche mosse sono causate soprattutto dall'eccessivo consumo di energia legato alla realizzazione e alla gestione, dalla maggiore quantità di materiale utilizzato rispetto a edifici multipiano, a parità di superficie abitabile, e dalla presunta incompatibilità con un ambiente storico urbano.

Gli aspetti ecologici vengono affrontati con scelte progettuali che limitano l'impatto ambientale di questo tipo di edifici come l'utilizzo di materiali riciclati o riciclabili, uso di fonti energetiche alternative, ecc.

L'inserimento nel contesto urbano viene attentamente valutato per migliorare l'immagine della città e aumentare gli spazi pubblici aperti e i servizi alla comunità.

E' difficile tuttavia stabilire le caratteristiche che rendono “alto” un edificio, soprattutto perché l'altezza è una questione del tutto relativa al contesto urbanistico. Le differenze che caratterizzano le strutture multipiano dei grattacieli rispetto alle strutture a telaio di edifici multipiano di diversa altezza sono sostanzialmente due: la necessità di assorbire notevoli carichi alla base senza creare ingombri eccessivi e la necessità di resistere ad azioni orizzontali anche molto elevate, causate da vento e sisma, senza deformazioni

eccessive. Il primo problema è stato risolto grazie all'utilizzo di materiali ad elevata resistenza: acciaio, calcestruzzo armato e i nuovi calcestruzzi ad elevate prestazioni. Il secondo problema è risolvibile mediante la scelta strutturale migliore in funzione delle forze naturali che si presentano: l'ingegneria strutturale ha ideato negli ultimi anni modelli sempre più precisi per la descrizione delle azioni naturali e schemi strutturali innovativi per resistere alla turbolenza del vento.

3.2 Cenni Storici

L'**English Heritage**, l'ente consulente del governo britannico per l'ambiente storico, definisce gli edifici alti come quegli edifici *“molto più alti di quelli nelle vicinanze e che modificano il panorama della città”*; il **National Fire Protection Association** definisce invece gli edifici alti come quegli edifici *“di altezza maggiore di 25 m, dove l'altezza dell'edificio è valutata dal piano più basso in cui i veicoli dei vigili del fuoco possono accedere, fino al pavimento del piano abitabile più alto”*. Il **Council on Tall Buildings and Urban Habitat** nel 1995 definì l'edificio alto come *“un edificio la cui altezza crea condizioni differenti nel progetto, nella costruzione e nel suo utilizzo rispetto a quelle degli edifici ordinari esistenti in un dato periodo ed in una data regione”*.

Le opere più imponenti dell'antichità avevano carattere prevalentemente difensivo e simbolico: le piramidi egizie, le ziggurat mesopotamiche, i templi dei Maya, le torri delle cinta murarie, i campanili, i minareti, le pagode, i fari dei porti, presentavano spazi interni molto ridotti, e di conseguenza non sono confrontabili con gli attuali edifici alti.

La costruzione in pietra che ha raggiunto l'altezza più elevata è stata la **Cattedrale di Ulm**, con i suoi 161 m: la cattedrale è del XIV secolo ma la cima della torre fu completata solo nel 1890. Invece l'edificio in pietra per uso commerciale ha raggiunto la massima altezza di 64 m con il **Monadnock Building** di Chicago nel 1891.

La nascita del grattacielo moderno si ebbe nella seconda metà del XIX secolo a Chicago, con la costruzione dell'**Home Insurance Building**, nel 1885 con 42 m di altezza, ossia 10 piani, di William Le Baron Jenney: la struttura portante a telaio in acciaio, in grado di sopportare il peso proprio di tutto l'edificio, è integrata da una struttura di base in granito e da murature in mattone, le quali costituiscono la facciata dell'edificio e la struttura irrigidente e controventante.

F. L. Wright presentò il grattacielo, così come nacque in America alla fine del XIX secolo, come una struttura tripartita: *“Mentre i piani inferiori hanno particolari esigenze, i piani intermedi dovranno ripetersi identici perché hanno la stessa funzione. Il coronamento, per sua natura, dovrà rendere manifesta la conclusione dell'edificio”*. Sullivan paragonò questa tripartizione, ben evidente nei suoi edifici, alla suddivisione in base, tronco e capitello della colonna classica.

Alla fine dell'800 la forma architettonica del grattacielo con struttura in ferro si era diffusa in molte città americane, soprattutto a New York, grazie al sottosuolo roccioso dell'isola di Manhattan. Si vide inoltre la nascita di edifici alti non solo a carattere direzionale ma anche residenziale. Nel 1913 venne costruito il **Woolworth Building**, con 60 piani ed un'altezza di 242 m; successivamente si arrivò a 319 m con il **Chrysler Building** del 1930 e a 375 m con l'**Empire State Building** del 1931, che detenne il primato d'altezza fino al 1970. Tra il 1932 e il 1937 venne edificato il **Rockefeller Center**, un complesso di grattacieli.

Un contributo essenziale alla forma del grattacielo fu fornito da Ludwig Mies Van der Rohe, il quale realizzò un grattacielo costituito da un prisma puro, il **Seagram Building** di Manhattan del 1958, alto 157 m. Lo Stile Internazionale degli anni '60 infatti richiese all'edificio di essere funzionale e diretta espressione dei materiali e della struttura: gli

edifici alti di questo stile avevano strutture portanti prevalentemente a gabbia o a nucleo centrale, e la forma prismatica ne sottolineava lo sviluppo verticale.

Nel 1968 venne realizzato a Chicago il **John Hancock Center**, che raggiunse i 344 m, mentre il **World Trade Center** si imponeva nel 1970 nel panorama di New York con un'altezza di 412 m. Nel 1974 venne costruita la **Sears Tower** a Chicago, con 442 m d'altezza. Questi edifici furono espressione di forme strutturali originali, come i sistemi a tubo esterno e a fascio di tubi, messi in evidenza anche dall'**Hong Kong & Shanghai Banking Co.** del 1986 e dal **Bank of China** del 1990 a Hong Kong.

Alla fine del XIX secolo la produzione in massa di laminati in acciaio permise l'utilizzo dell'ossatura metallica sia come struttura portante, da rivestire con materiali tradizionali, sia come base per l'invenzione di nuove forme architettoniche, fondate sulla struttura a telaio o reticolare. Nel 1889 **Eiffel** realizzò a Parigi la torre simbolo della città, con i suoi 321 m di altezza. Dalle città americane venne infatti lo stimolo per i primi progetti europei di grattacielo, anche se in questo contesto l'idea fece fatica ad attecchire, nonostante la presenza di personaggi di rilievo come Le Corbusier.

I primi grattacieli italiani vennero costruiti in calcestruzzo armato a Milano negli anni '50 e '60 del '900: il grattacielo di Piazza della Repubblica o **Torre Breda**, il **Grattacielo Pirelli** e la **Torre Velasca**.

3.3 Schemi statici degli edifici alti

Si è visto come l'evoluzione dell'edificio alto abbia portato da una iniziale **struttura a gabbia**, composta da muratura perimetrale controventante (per massa) e telai metallici interni portanti i soli carichi di gravità (nodi a cerniera), ad un sistema a **scheletro in acciaio**, ai **telai con nodi rigidi resistenti a momento**, ai **telai controventati** (con travi reticolari verticali e orizzontali), ai **sistemi a setto** e a **nucleo**, ad una **struttura tubolare** (in cemento e in acciaio), che si configura come tubo esterno (intelaiato e controventato), parallelamente come doppio tubo (combinazione tra rigidità del nucleo interno e resistenza al ribaltamento del tubo perimetrale) e infine come fascio di tubi, al limite controventati, per arrivare poi a sistemi interagenti in cui travi trasversali di irrigidimento collegano la struttura interna a quella perimetrale. Passando poi ad evoluzioni più spinte come i **telai giganti**, le **megastrutture** (con base allargata e sommità rastremata), le **costruzioni cellulari** (sistemi a tubo con centro cavo), gli **edifici a ponte** (torri legate da strutture sospese), e le strutture ancorate tramite cavi o puntellate.

La classificazione degli edifici alti che viene generalmente proposta individua i seguenti schemi statici caratterizzati da riferimenti puramente operativi:

Sistema a gabbia (fig.73): erano strutture miste costituite da pareti perimetrali in muratura continua, pilastri di mattoni o pietra lavorata, e da telai interni metallici, costituiti da colonne in ghisa collegate da travi e travetti in ferro.

I muri esterni erano i soli elementi che garantivano la rigidità laterale ai fini di una necessaria controventatura unicamente attraverso l'effetto stabilizzante del loro peso; infatti, i "*telai pendolari*" interni, essendo le connessioni tra le colonne circolari *flangiate* e le travi ad I realizzate attraverso un'unica bullonatura a mano, con cui si potevano costruire al massimo nodi a cerniera, non provvedevano alcun irrigidimento contro le forze orizzontali del vento o del sisma ma portavano solo i carichi di gravità.

Poiché lo spessore delle pareti portanti in muratura aumentava proporzionalmente con il numero dei piani dell'edificio, l'altezza massima raggiungibile nelle costruzioni di questo tipo era di 10-12 livelli. Invece, attualmente nella costruzione di edifici alti, la struttura a muratura continua, usata nel passato con pareti di soltanto solidi materiali lapidei, viene impiegata in modo quasi esclusivo mediante muri rinforzati con armature metalliche, per i quali si può considerare anche la loro resistenza a flessione. Sia come sistema di pareti controventanti che a muri portanti, due sono i tipi di muratura armata maggiormente in uso: *muratura con cavità unitarie* e *muratura con cavità continue*.

La prima è provvista di cavità verticali unitarie, cioè distribuite ad intervalli regolari lungo le pareti in cui viene predisposta, prima del riempimento di malta, l'armatura a tutta altezza e le barre metalliche a traliccio nei giunti per il rinforzo orizzontale; mentre la seconda è composta da due file esterne parallele di muratura solida, nella cui cavità verticale continua – cioè distribuita per tutta la lunghezza delle pareti – viene inserita l'armatura di rinforzo nelle due direzioni, con riempimento di malta.

La letteratura sul grattacielo solitamente sottovaluta l'importanza e l'influenza del significato tecnologico che il sistema a gabbia riveste nella storia delle origini e dell'evoluzione dell'edificio alto, dando per scontato che la vera rivoluzione costruttiva sia esclusivamente quella dell'invenzione dello scheletro in acciaio. Al di là dei sistemi a telaio che segnano la svolta, va sottolineato il ruolo di tappa fondamentale della struttura a gabbia in muratura nel progresso dell'edilizia alta, in quanto con essa si gettarono già le basi concettuali dei sistemi futuri.

Difatti, la concentrazione della membratura controventante unicamente lungo il perimetro completo esterno consente di classificare il tradizionale sistema a gabbia anche come una struttura tubolare a bassa efficienza anticipando i "*sistemi scatolari*" della seconda metà

del XX sec.; naturalmente con la differenza che, se i sistemi a tubo reagiscono a flessione come una mensola tridimensionale a sbalzo dalle fondazioni grazie all'uso dell'acciaio e/o del cemento, il sistema a muratura solida resisteva contro le spinte orizzontali del vento attraverso l'inerzia della massa della struttura muraria stessa. Essendo quest'ultima costituita da pareti disposte a taglio nelle due direzioni, sono già presenti anche i presupposti dei "sistemi a setti e a nucleo"; inoltre dalla membratura interna di travi e pilastri della gabbia tradizionale si sviluppò anche il sistema a telaio.

In definitiva si può affermare che da tale costruzione primitiva abbiano avuto origine i fondamentali schemi strutturali per la realizzazione degli edifici a grande altezza: il sistema a gabbia si può definire l'*archetipo* strutturale dei moderni grattacieli.

L'insieme degli elementi strutturali orizzontali e verticali definiscono uniformemente nello spazio il volume dell'edificio. La facciata risulta in genere dotata di propria individualità e concettualmente svincolata dalla pilastrata interna. Le dimensioni della maglia di pilastri sono per lo più dettate da parametri di tipo funzionale o da modalità di articolazione del volume edilizio. Risultano esserci in genere una disposizione regolare, secondo luci ordinarie, della pilastrata ed un dislocamento degli elementi di servizio. La griglia così definita esaurisce in sé, con multipli e sottomultipli, tutti i problemi di posizionamento e dimensione correlati al progetto.

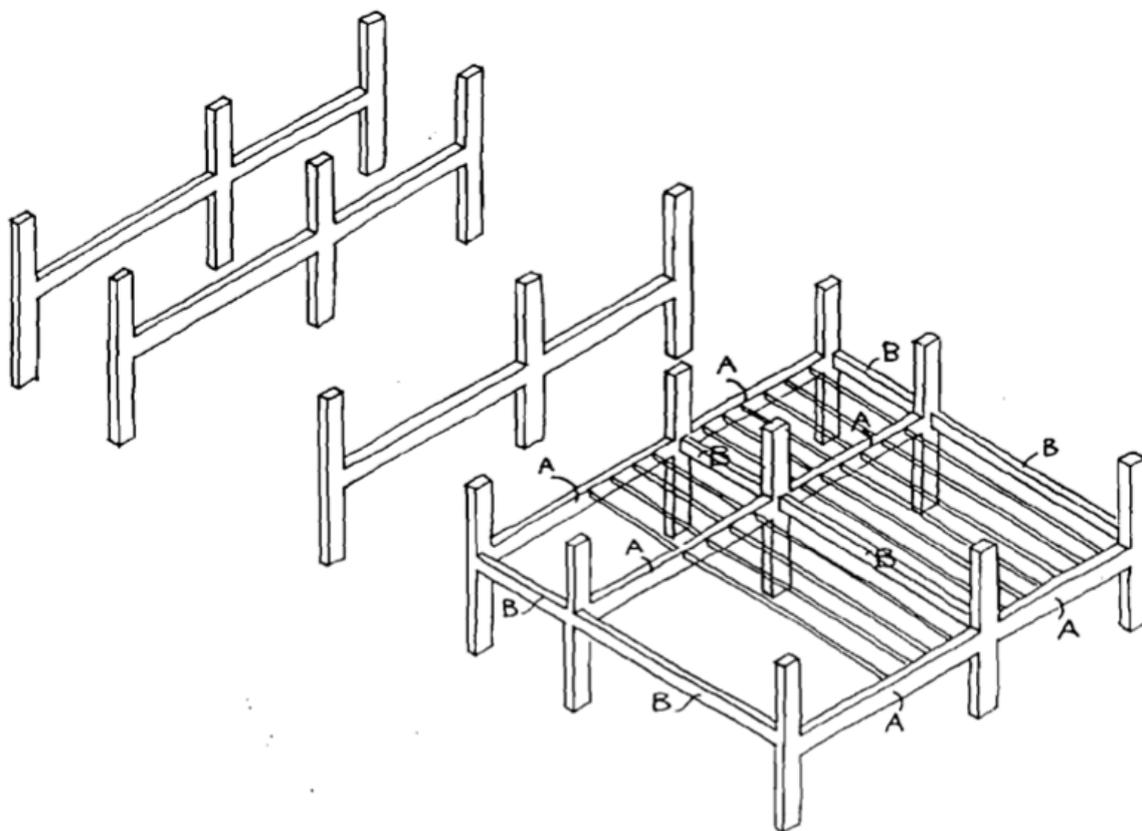


Figura 73: Schema strutturale "a gabbia"

Sistema orientato: nel caso l'asse longitudinale prevalga su quello trasversale, la somma delle forze ribaltanti agenti secondo la direzione di minima inerzia ortogonale a tale asse richiede in definitiva una strutturazione degli elementi statici orientata in senso trasversale. Ne deriva una distribuzione "a pettine" degli ambienti disposti in serie lungo le facciate maggiori, mentre il sistema di distribuzione e di servizio è posto in posizione mediana. E' importante quindi da un punto di vista funzionale l'ottimizzazione dello spessore trasversale, in quanto la possibilità di costruire l'eccezione è confinata esclusivamente nei

punti terminali. Vi è di conseguenza una distribuzione unidirezionale, parziale o totale, degli elementi portanti con forte orientamento dell'impianto funzionale e tipologico.

Sistemi a telaio: si intendono strutture - in acciaio, calcestruzzo armato, misto acciaio/cemento - costituite da membrature lineari (*monodimensionali*), verticali (*pilastr*i), orizzontali (*travi*) e eventualmente oblique (*controventi*) che resistono alle forze laterali tramite la rigidezza - flessionale e/o assiale - degli elementi e quella dei nodi a cui sono connessi.

Tali sistemi si possono classificare in telai pendolari, telai resistenti a momento (*nodi rigidi*), telai controventati, telai interagenti (o "*outrigger*"), telai di ordine superiore.

Sistema a telaio pendolare (fig.74): adottato alla fine del secolo scorso in sostituzione dei sistemi a gabbia, da cui si sono sviluppati, ed oggi non più utilizzati, costituivano le prime strutture interamente a scheletro metallico degli edifici alti formate da travi e colonne connesse con giunti a cerniera o con incastri di scarsissima rigidezza; poiché le connessioni, realizzate mediante angolari sovrapposti bullonati a mano disposti tra le flange degli elementi (un primo tentativo di nodo rigido) non erano in grado di trasferire i momenti flettenti dai pilastri alle travi e viceversa, queste strutture vengono definite "*telai non resistenti a momento*". In assenza di una necessaria rigidezza dei nodi per la resistenza contro le forze laterali indotte dal vento, affidata alla sola rigidezza flessionale degli elementi di grandi dimensioni, la massa del rivestimento o del tamponamento murario forniva una sufficiente controventatura all'intero sistema – *frame and curtain*.

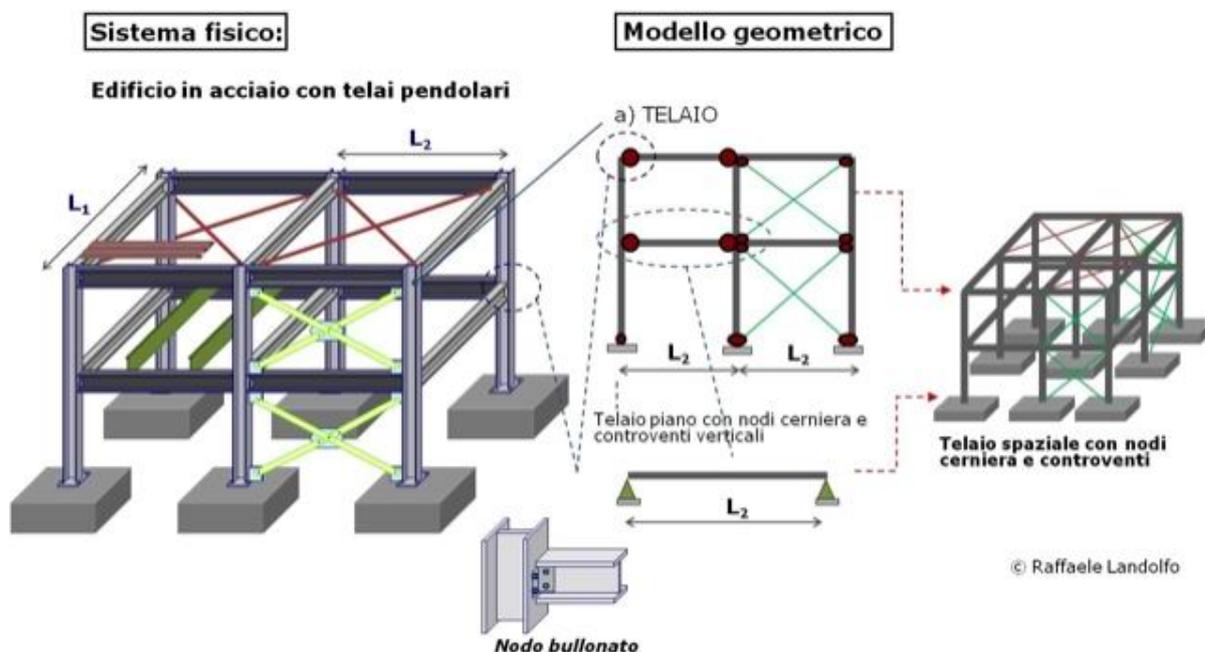


Figura 74: Schema di un edificio in acciaio con telai pendolari e relativo particolare del nodo bullonato.

Sistema a telaio rigido o a nodi rigidi (fig.75): nel caso vi sia una grande spaziatura tra i pilastri, la rigidità dei nodi e l'effetto portale controventano l'intero edificio. Il limite strutturale risulta essere la rigidità dei singoli telai. Questa soluzione tipologica accentua una maggiore libertà nell'uso dello spazio, unita ad una

tendenza ad ordinare ed organizzare la superficie di piano in modo da esaltare l'assenza di barriere e di diaframmi visivi.

E' stato a lungo accettato come sistema resistente sia ai carichi orizzontali che verticali.

In edifici fino a trenta piani, i carichi laterali sono sopportati dall'azione del telaio, mentre, nel caso siano presenti più piani, la rigidità del telaio risulta insufficiente per limitare l'oscillazione dovuta alle forze laterali.

Il principio cardine sta nella connessione *trave-colonna*: questa deve avere sufficiente rigidità da mantenere immutato l'angolo originale tra le componenti intersecanti. Il comportamento "monolitico" e la relativa rigidità dei giunti rendono questo sistema particolarmente adatto alle costruzioni in calcestruzzo armato. La resistenza e la rigidità sono proporzionali alle dimensioni di travi e colonne e inversamente proporzionali alla distanza tra le colonne: per ottenere quindi un'efficiente azione del telaio, si devono prevedere all'esterno dell'edificio colonne molto vicine e travi profonde. I telai rigidi sono molto duttili e quindi si deve porre particolare attenzione al dettaglio dei giunti per costruzioni in zona sismica.

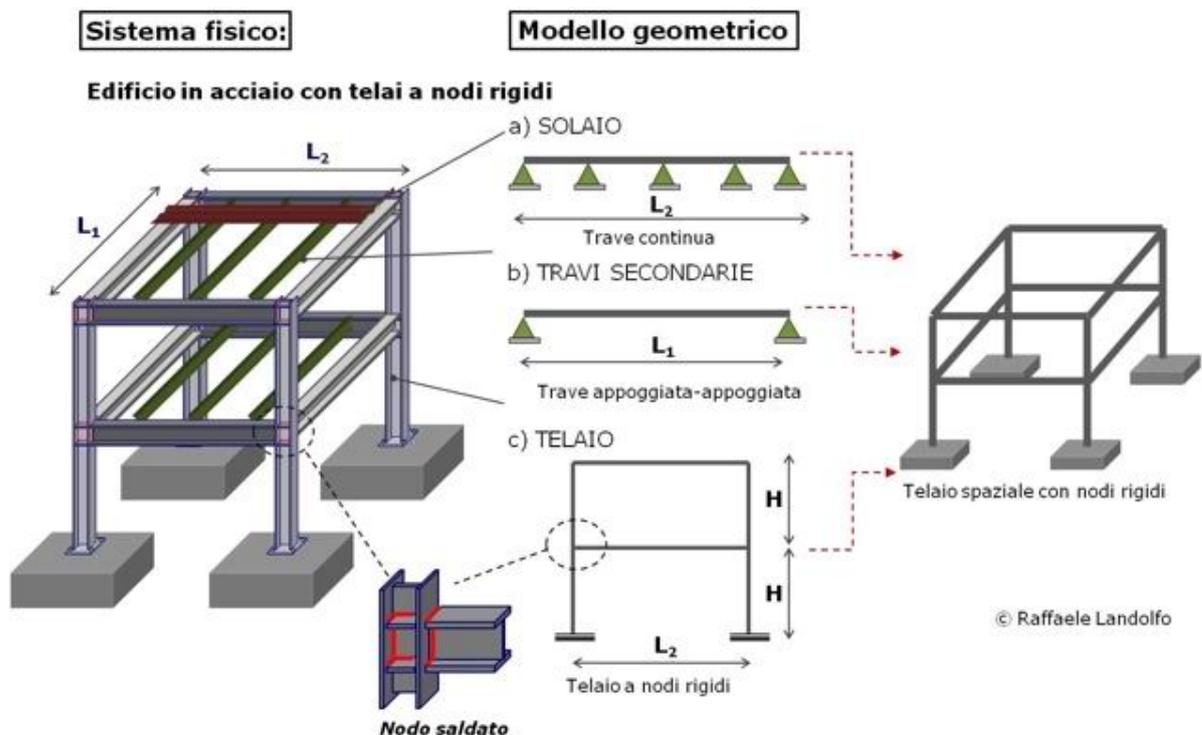


Figura 75: Schema di un edificio in acciaio con telai rigidi e relativo particolare del nodo saldato.

Sistema a telaio controventato o a telaio con pareti: questi sistemi sono più rigidi del telaio a nodi rigidi e possono essere utilizzati per strutture con più di trenta piani. Il sistema a telaio controventato è un sistema resistente alle azioni laterali molto efficiente e conveniente dal punto di vista economico: esso migliora la funzionalità del telaio rigido eliminando il momento flettente da colonne e travi grazie a dei controventi. Il comportamento è quello di una trave reticolare verticale costituita da travi e colonne che sopportano i carichi verticali e da elementi di controventamento, che possono essere ad X (fig.76), diagonali (fig.77), a V (fig.78), a K (fig.79) o a K eccentrici. Questo sistema è utilizzato per edifici in acciaio, mentre il sistema a telaio con pareti è adatto a costruzioni in calcestruzzo armato o compositi.

Le pareti sono elementi verticali a sbalzo che resistono alle azioni orizzontali sull'edificio trasmesse loro attraverso i diaframmi di piano.

Le pareti aumentano la rigidezza e la resistenza della struttura e possono avere varie forme: circolare, ovale, scatolare, triangolare o rettilinea.

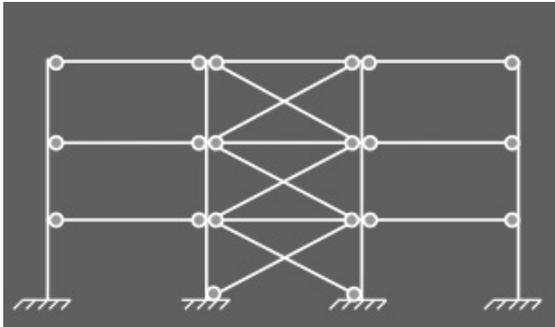


Figura 76: Schema di controventi ad X

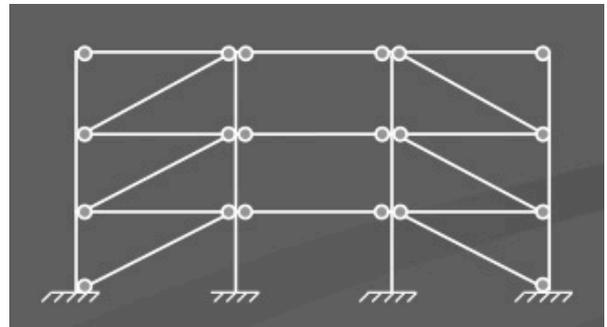


Figura 77: Schema di controventi diagonali

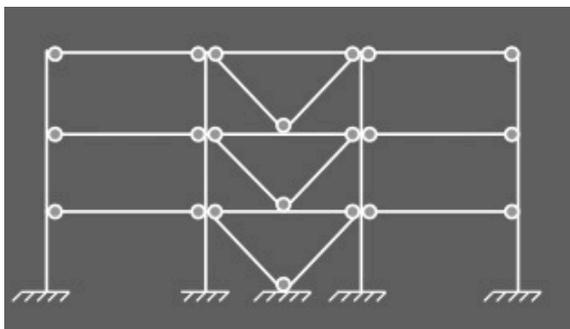


Figura 78: Schema di controventi a V

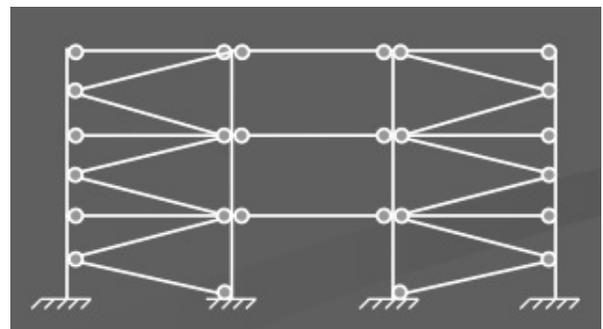


Figura 79: Schema di controventi a K.

Sistemi outrigger (fig.80): questo sistema è una modificazione dei sistemi a telaio controventato e con pareti, ed è applicabile sia a costruzioni in acciaio che composite. Esso comprende un nucleo centrale, con eventuali sistemi controventanti, e travi orizzontali, semplici o reticolari (*outrigger*) che collegano il nucleo alle colonne esterne, molto spesso interconnesse con una trave esterna di collegamento. Nel caso l'edificio sia soggetto ad azioni orizzontali, la rotazione del nucleo centrale è bloccata dal vincolo *outrigger*. Queste strutture possono essere utilizzate per edifici con più di 100 piani ed hanno una migliore resistenza laterale nel caso la profondità sia pari a due piani.

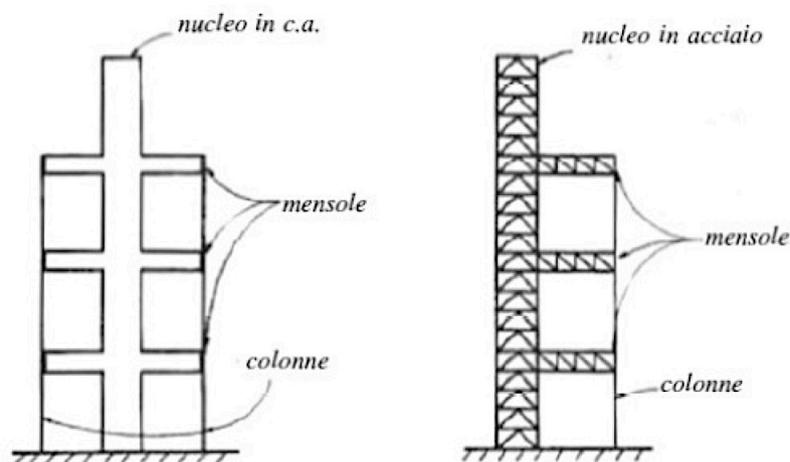


Figura 80: Schemi di telai "outrigger" con nucleo in c.a. e nucleo in acciaio.

Sistema a nucleo (fig.81): sono strutture dove elementi tubolari verticali di irrigidimento, composti intorno al nucleo da telai rigidi oppure da intelaiature controventate, ovvero da pareti piene, resistono alla totalità o alla maggior parte delle forze laterali in ogni direzione attraverso un comportamento a mensola pura tridimensionale a sbalzo dalle fondazioni.

L'evoluzione del sistema a telai verso l'impianto "a nucleo" nasce da una semplice considerazione: il nucleo baricentrico dei servizi, dotato di elevata inerzia, concentra in sé la funzione controventante, tanto più elevata quanto più grande risulta la sua sezione orizzontale, e lascia al resto della struttura l'onere delle sole forze peso. In questo modo si ha un notevole alleggerimento del peso degli elementi strutturali perimetrali di facciata e del resto della struttura che, in tale situazione, possono anche essere progettati e dimensionati con il solo onere dei carichi verticali.

Fra l'altro il nucleo, considerato come una scatola molto rigida, quindi come una struttura tridimensionale, è capace di portare tutti i tipi di carico, dalle forze assiali a quelle di taglio, dai momenti flettenti a quelli torcenti.

Infatti molti edifici alti sono soggetti a sollecitazioni torsionali dovute al non allineamento degli elementi irrigidenti rispetto ai punti di applicazione dei carichi orizzontali; queste forze possono anche essere indotte dalla formazione periodica di vortici di vento alternativamente su ogni lato della struttura, spostando il centro di pressione fuori della linea del centro di taglio dell'edificio. I nuclei, in quanto sistemi spaziali, sono un mezzo efficiente per resistere a tali sollecitazioni: per questo sono anche definite come "strutture tubolari a media/parziale efficienza".

Questa tipologia strutturale spinge verso una maggiore simmetria che consente comportamenti indifferenti nelle diverse direzioni di sollecitazione.

Le strutture così definite possono essere realizzate sia in calcestruzzo che in acciaio: i nuclei in cemento armato, composti normalmente da pareti piene, sono più diffusi per via della facilità e velocità di costruzione attraverso la tecnica delle casseforme scorrevoli; mentre i tubi in acciaio, costituiti generalmente da mensole reticolari, risultano meno adottati a causa della difficoltà e dei costi dei collegamenti bullonati o saldati che riducono i tempi di fabbricazione. I nuclei compositi, invece, sono anch'essi poco usati e solitamente si presentano come tralicci metallici rivestiti di cemento oppure come strutture intelaiate le cui colonne in acciaio sono riempite di calcestruzzo.

Nello schema a nucleo gli elementi costitutivi tendono a specializzarsi: al nocciolo centrale, massivo e dotato di grande inerzia, viene deputato il ruolo di "colonna vertebrale", capace di contrastare le sollecitazioni laterali trasmesse tramite i solai dalle facciate; ma se gli orizzontamenti vengono analizzati tenendo conto del ruolo aggiuntivo di puntoni, per la struttura portante del perimetro, alla quale competono quasi sempre solo i carichi propri, deve essere valutato l'impatto del vento, che a determinate altezze può raggiungere l'effetto di un carico dinamico corrispondente anche a centinaia di km/h.

Queste caratteristiche conferiscono una serie di conseguenze: l'insieme dei servizi deve trovare la giusta collocazione all'interno del nucleo, lasciando completamente libero lo spazio rimanente al piano; la distanza tra la facciata ed il nucleo, identica su tutti e quattro i fronti, deve essere ottimizzata in rapporto alla destinazione funzionale e comunque può al massimo corrispondere al lato del nucleo stesso; l'equivalenza delle quattro facciate comporta il sommarsi nelle zone d'angolo di sollecitazioni tra loro ortogonali con conseguente sovrapposizione dell'orditura del solaio.

Lo schema ideale di riferimento presenta una matrice poligonale con nucleo concentrico, centrale e simmetrico rispetto al perimetro dell'edificio, in cui il rapporto di complementarità tra spazio servente e servito è di tipo anulare a spessore costante su tutti i fronti.

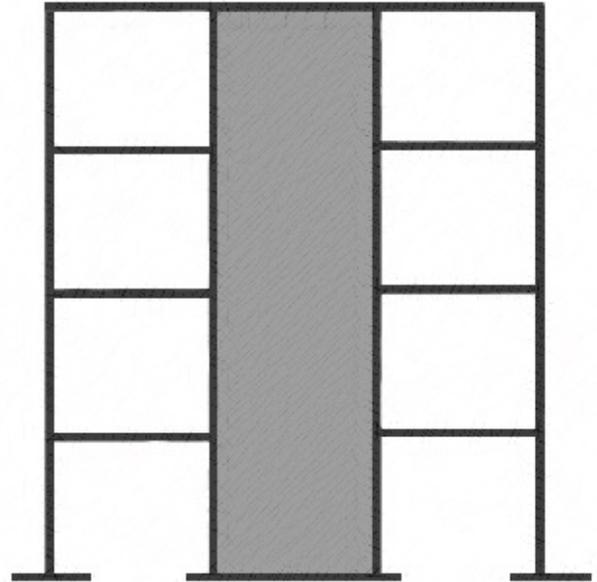
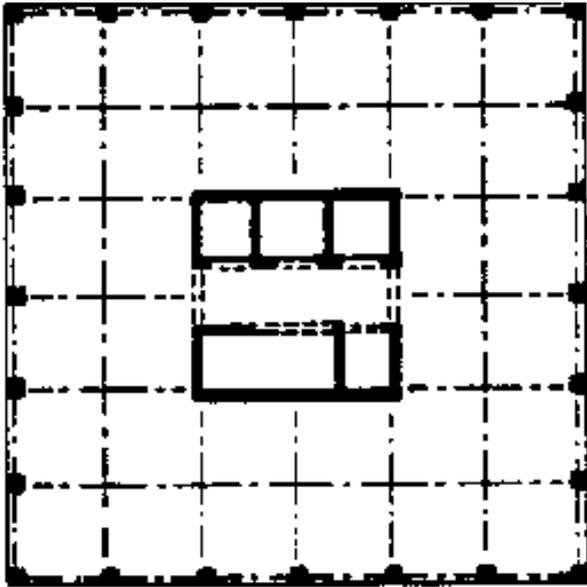


Figura 81: Schema di struttura "a nucleo".

Sistema a tubo: si intendono strutture tridimensionali composte da tre, quattro, o possibilmente più telai rigidi oppure intelaiature controventate ovvero pareti piene, concentrate lungo il perimetro e connesse rigidamente attraverso gli spigoli a formare una mensola scatolare a tutt'altezza, capace di resistere ai carichi laterali del vento o eventualmente del terremoto e alle forze di ribaltamento in qualsiasi direzione.

Sistema a tubo esterno (fig.82): consiste nel confinare il sistema di controventamento esclusivamente su tutto il profilo esterno dell'edificio che, sufficientemente rigido da realizzare il cosiddetto "effetto parete", ossia da adottare un comportamento a mensola pura, resiste alla totalità dei carichi orizzontali; la struttura interna, solitamente un'ossatura a pilastri disposta intorno al nucleo dei servizi, trasporta invece i soli carichi di gravità.

Caratterizzato in genere dalla flessibilità a taglio ridotta, tale da minimizzare l'effetto di "shear lag", garantisce la stabilità laterale attraverso la sua rigidità assiale, con l'intera dimensione planimetrica dell'edificio che partecipa alla resistenza al rovesciamento; inoltre essendo una struttura di tipo tridimensionale, è capace di portare tutti i tipi di forze, specialmente i momenti torcenti. Per questi motivi tali sistemi, rispetto alle strutture a nucleo di cui abbiamo parlato in precedenza, vengono definiti come *strutture tubolari ad alta efficienza*.

Questo sistema è quindi una logica estensione dei telai resistenti a momento, rispetto a cui le rigidità degli elementi costituenti sono drasticamente incrementate mediante la diminuzione delle luci delle campate e l'aumento delle dimensioni delle sezioni.

Complessivamente la disposizione di colonne perimetrali ad interassi ridotti e di grandi travi principali di bordo rende il comportamento dei tubi intelaiati sotto i carichi laterali simile a quello di un'enorme trave scatolare rigida a sbalzo dalle fondazioni resistente ai momenti ribaltanti. Questo sistema resistente garantisce la resistenza alle azioni laterali, grazie all'elevato numero di unioni rigide lungo il perimetro che creano un largo tubo. La rigidità complessiva viene concentrata nelle strutture di facciata mentre gli elementi interni si configurano come sostegno dei carichi verticali trasmessi dai solai. All'interno ogni fattore determina la stabilità complessiva dell'insieme. L'ossatura interna risulta svuotata di forza aggregante grazie all'accumulo di rigidità sull'involucro esterno, permettendo in questo modo

di articolare lo spazio in modo discontinuo, con la possibilità di eliminare alcuni solai per ricavare vani ad altezza multipla.

Per mantenere comunque un buon grado di trasparenza della facciata è possibile infittire la pilastrata perimetrale oppure vincolare quest'ultima con elementi diagonali di controventamento in modo da ridurre la stessa ad un insieme di "archi a tre cerniere", con la conseguente presenza di soli sforzi di trazione e compressione nelle aste, assenza di momenti flettenti all'incastro e massima indeformabilità. L'efficienza del sistema è condizionata dal rapporto altezza-larghezza, dalle dimensioni in pianta, dallo spazio tra le colonne e i collegamenti e dalle loro dimensioni.

Il tubo intelaiato può essere realizzato sia in cemento armato, con efficienza sui 70 piani circa, che in acciaio di altezza massima raggiungibile intorno ai 90 livelli.

La natura monolitica delle costruzioni in calcestruzzo è adatta idealmente per tale sistema in quanto consente di realizzare collegamenti continui tra gli elementi. La struttura metallica, invece, richiede la saldatura dei nodi trave-colonna per sviluppare rigidità e continuità: la formazione di elementi a croce, detti anche ad albero, prefabbricati, saldati in officina e poi montati in cantiere bullonando insieme le travi di bordo in mezzzeria, dove il momento è minimo, rende il sistema più pratico e veloce. Nella versione mista, con tubo esterno in c.a. e telai interni metallici, il sistema può raggiungere in alcuni casi anche 80 piani.

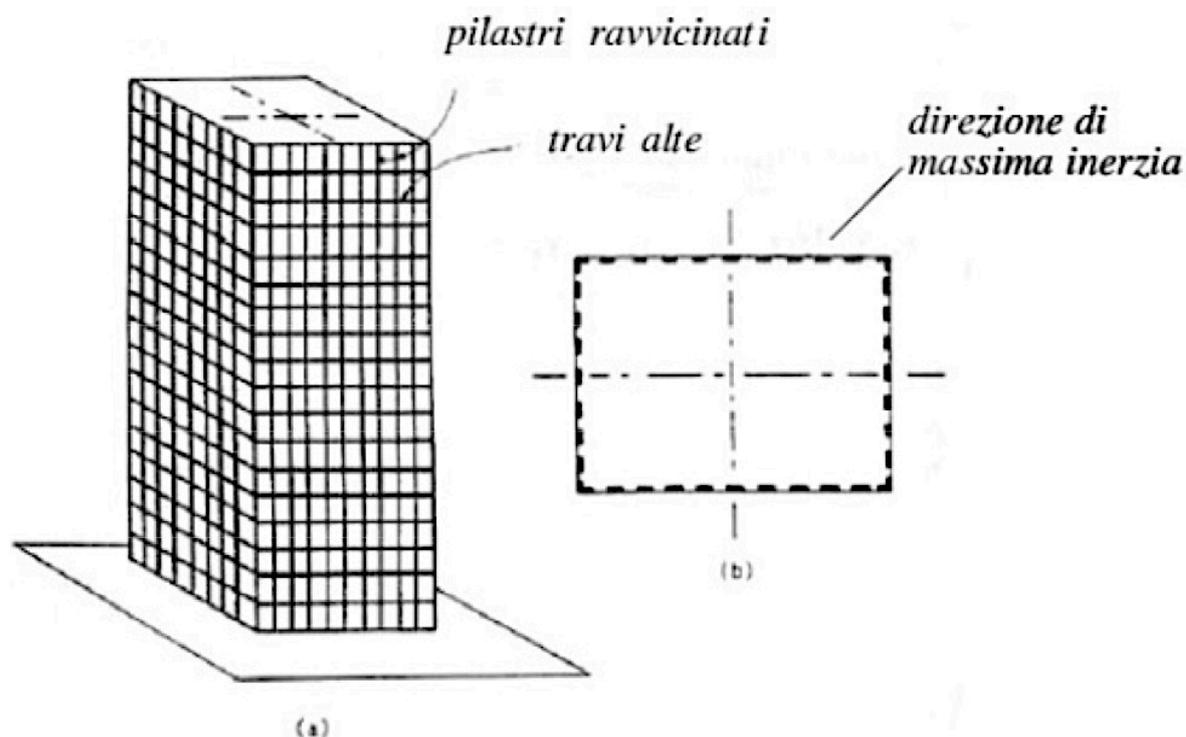


Figura 82: Schema di struttura a tubo intelaiato.

Sistema a tubo controventato (fig.83): aggiungendo controventi diagonali alti più piani sulla faccia del tubo vengono incrementate la rigidità e l'efficienza del sistema. Questo sistema può essere impiegato per altezze molto elevate e consente di avere un maggiore spazio tra le colonne perimetrali rispetto al sistema a tubo esterno. Per ottenere il minor numero di diagonali per ciascuna faccia, è opportuno che queste si intersechino nello stesso punto sulle colonne angolari. Negli edifici in acciaio vengono utilizzate diagonali o travi reticolari in acciaio,

mentre negli edifici in calcestruzzo armato le diagonali sono costituite da pareti in calcestruzzo.

Il controvento fa sì che le colonne lavorino insieme nel resistere ai carichi verticali e orizzontali, in modo che si crei un comportamento di trave a sbalzo prossimo a quello di un tubo rigido. Questo sistema è particolarmente adatto per edifici alti, snelli e con ridotte aree di piano. Inoltre elimina il rischio di un eccessivo carico assiale sulle colonne d'angolo. Può essere utilizzato per edifici con più di 100 piani, ma presenta dei problemi nella definizione dei particolari relativi ai rivestimenti.

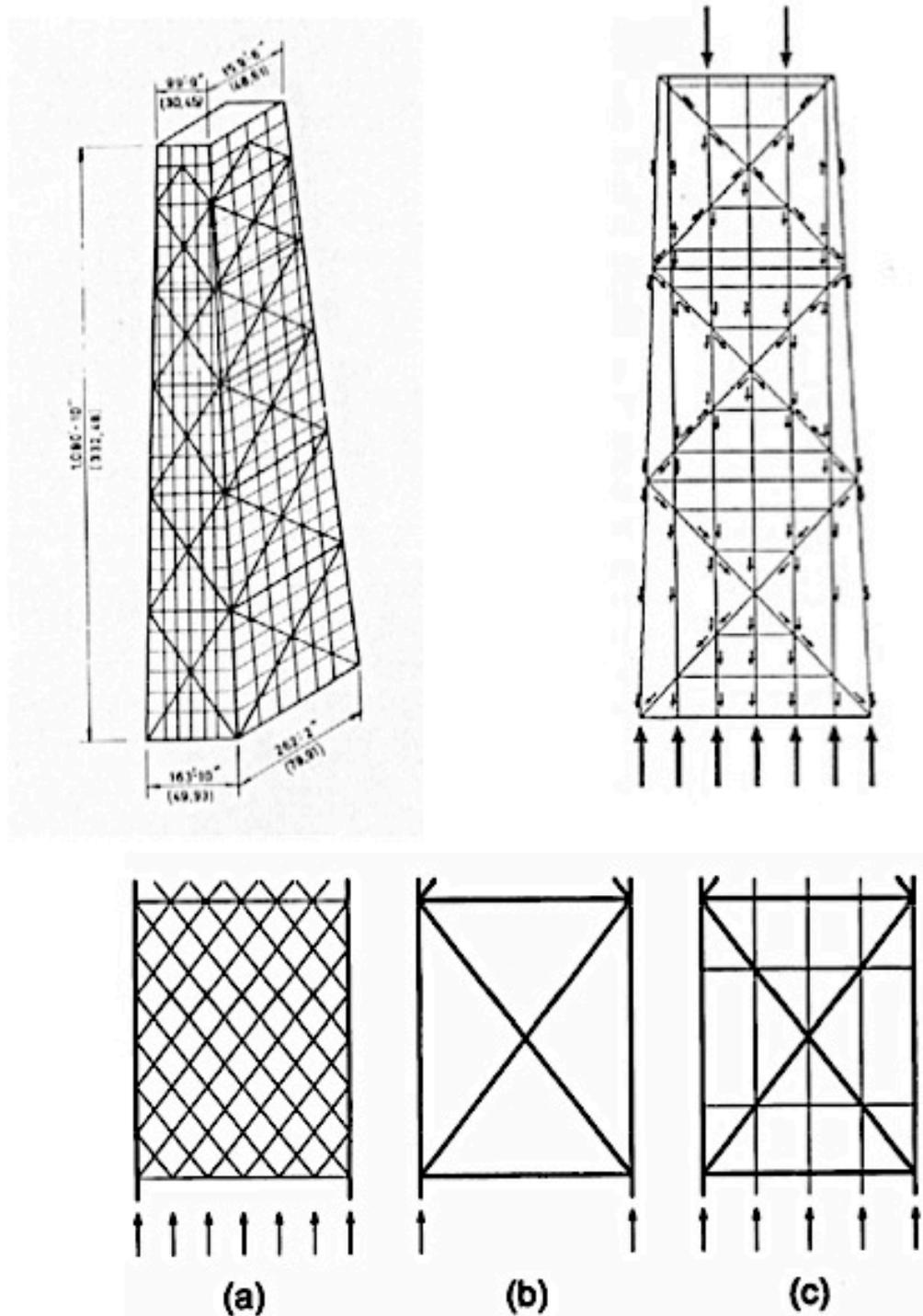


Figura 83: Schema di struttura a tubo controventato.

Sistema a doppio tubo (fig. 84): si configura come un tubo esterno intelaiato, sia in calcestruzzo che soprattutto in acciaio, concentrato lungo il perimetro esterno collaborante con il tubo interno a pareti piene, solitamente in cemento armato, disposto nel nucleo dei servizi in modo coassiale rispetto al primo senza altri sostegni intermedi.

L'eccellente capacità di resistenza al ribaltamento della scatola periferica è combinata con l'ottima abilità di sopportare le forze di taglio del nucleo centrale; l'effetto moltiplicatore di stabilità e rigidità laterali è garantito dalla connessione dei due tubi concentrici.

Il collegamento rigido tra il nucleo centrale e l'involucro esterno va ad aumentare la stabilità del sistema, e questa solidarizzazione può presentarsi in modo discontinuo in più punti oppure in forma diffusa ad ogni piano. Questo sistema rappresenta la combinazione di due tubi, uno interno ed uno esterno: questi due sistemi strutturali principali, disposti coassialmente, ripartiscono lo sforzo complessivo ed aumentano il grado di collaborazione di ciascun elemento. L'insieme strutturale è notevolmente esaltato, consentendo un notevole innalzamento della soglia di utilizzazione dei materiali, e quindi anche quella altimetrica. Questo sistema può essere utilizzato per edifici con più di 100 piani ed è particolarmente efficace quando l'oscillazione laterale diventa un elemento critico e condizionante nel progetto.

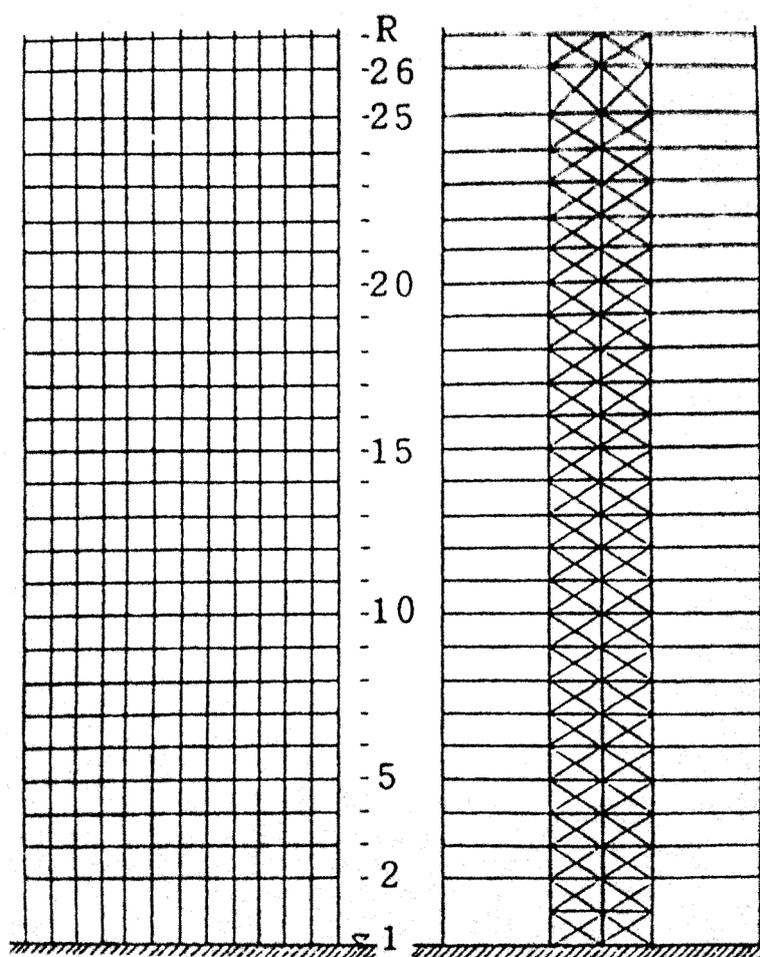


Figura 84: Schema di struttura a doppio tubo.

Sistema a fascio di tubi (fig.85): per tubi fasciati si intende una struttura multipla costituita da un insieme di elementi tubolari verticali legati a fascio tramite il loro lato comune.

Il principio è quello di amplificare la rigidità e la stabilità laterali per raggiungere così altezze più elevate: il prodotto dell'unione dei singoli tubi riduce l'ammontare degli effetti complessivi della deformazione da taglio rendendo le strutture in posizione di flangia, ortogonali quindi alla direzione del vento, molto più efficaci ed il comportamento dell'intera costruzione più simile a quello di una trave scatolare a sbalzo dalle fondazioni.

Nel caso la resistenza al ribaltamento sia aumentata dal collegamento di più elementi a tubo, ciascun tubo si configura come elemento autonomo dagli adiacenti. Si ha di conseguenza la rottura della logica di conformazione anulare dello spazio di piano: il sistema dei servizi non appare più vincolato ad alcun criterio posizionale, senza dimenticare comunque l'efficace gestione funzionale dello spazio interno.

La totale indipendenza di ciascun modulo permette assoluta libertà nella logica combinatoria di aggregazione e consente di alterare la stereometria d'insieme e diversificare l'altimetria dei singoli elementi strutturali.

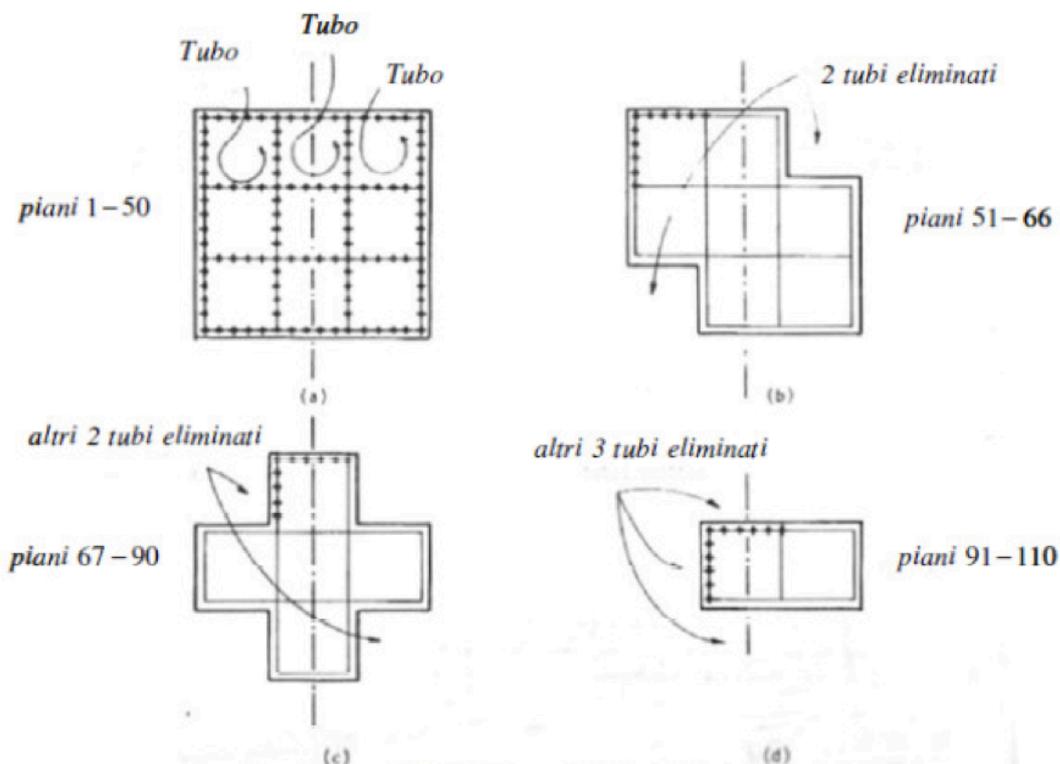
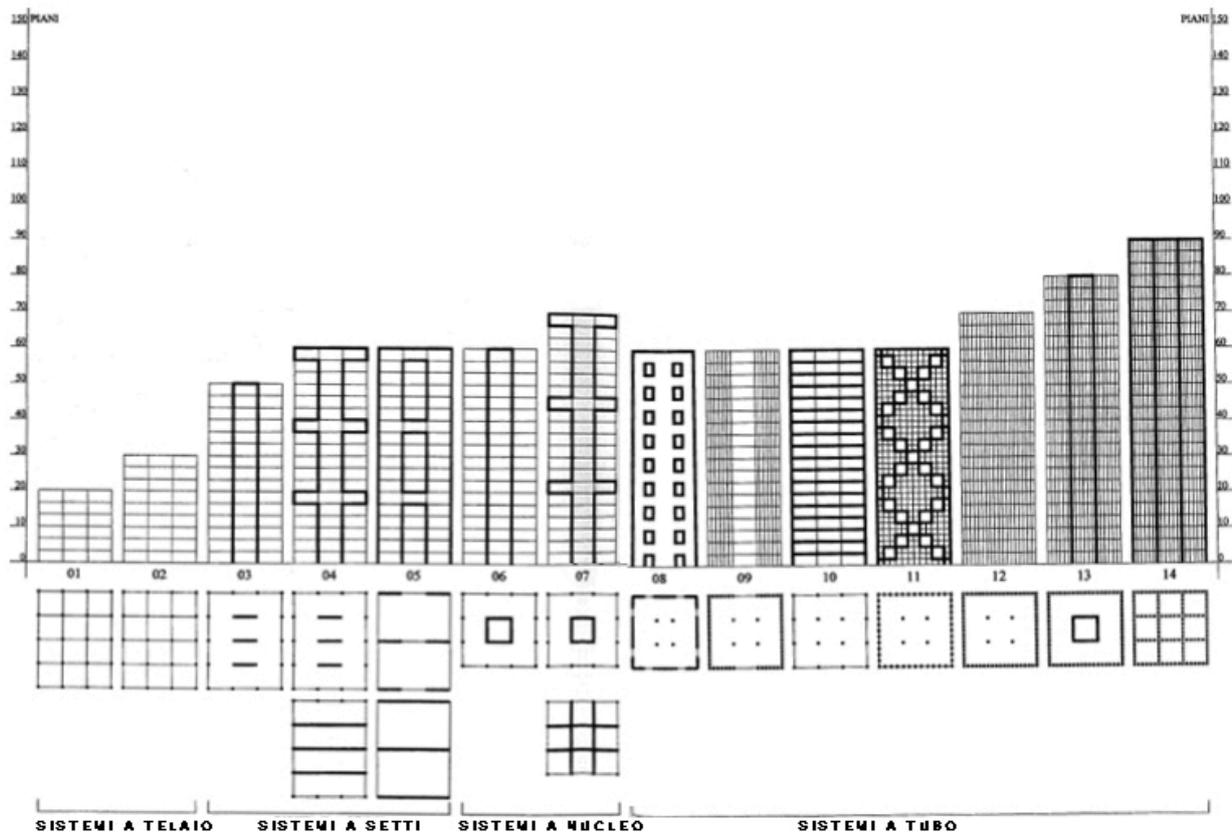


Figura 85: Schema strutturale "a fascio di tubi" della Sears Tower, Chicago, 1973

Classificazione dei sistemi strutturali degli edifici alti in cemento (fig.86)



01 – Telai semirigidi

02 – Telai rigidi

03 – Setti e telai rigidi

04 – Setti interagenti

05 – Setti accoppiati

06 – Nucleo e telai rigidi

07 – Nucleo interagente

08 – Tubo a pareti piene

09 – Tubo parziale intelaiato

10 – Tubo Vierendeel

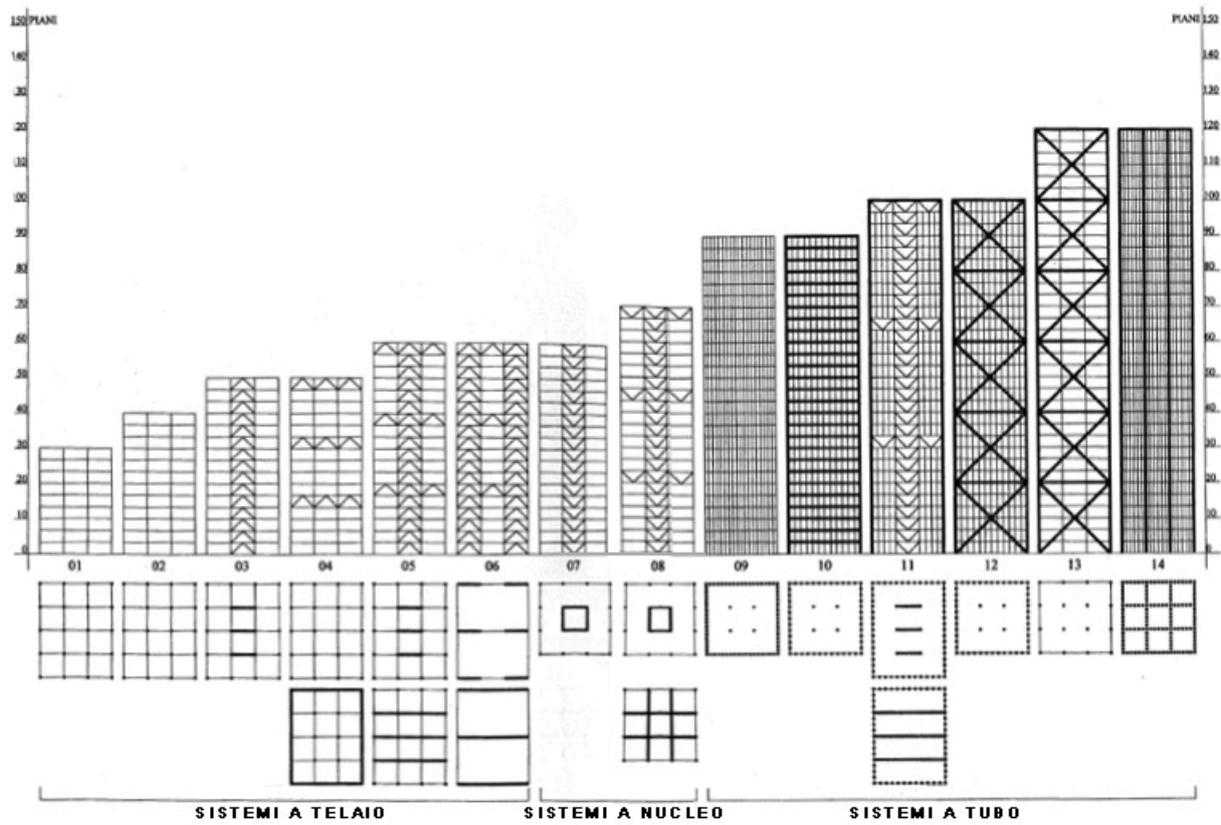
11 – Tubo intelaiato controventato

12 – Tubo intelaiato

13 – Doppio tubo intelaiato

14 – Fascio di tubi intelaiato

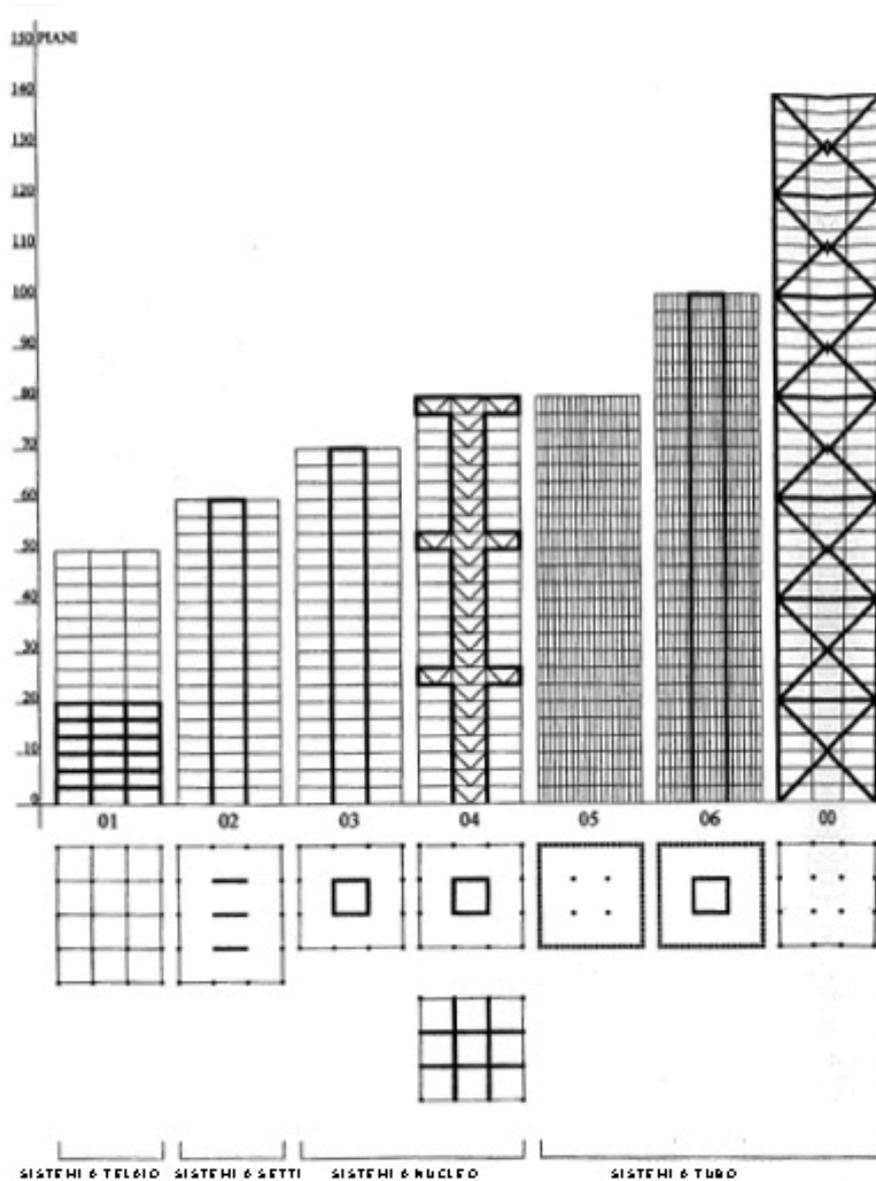
Classificazione dei sistemi strutturali degli edifici alti in acciaio (fig.87)



- 01 – Telai semirigidi
- 02 – Telai rigidi
- 03 – Telai e mensole a traliccio
- 04 – Telai e reticoli a nastro
- 05 – Telai interagenti
- 06 – Telai giganti
- 07 – Nucleo e telai rigidi

- 08 – Nucleo interagente
- 09 – Tubo intelaiato
- 10 – Tubo Vierendeel intelaiato
- 11 – Tubo interagente
- 12 – Tubo intelaiato controventato
- 13 – Tubo controventato
- 14 – Fascio di tubi intelaiati

Classificazione dei sistemi strutturali degli edifici alti in acciaio-cemento (fig.88)



- 01 – Telai rigidi in acciaio o cemento posti su telai compositi (colonne)
- 02 – Setti in cemento e telai rigidi in acciaio o compositi (colonne)
- 03 – Nucleo in cemento e telai rigidi in acciaio o compositi (colonne)
- 04 – Nucleo in acciaio o cemento interagente e telai compositi (colonne)
- 05 – Tubo intelaiato in cemento e telai in acciaio
- 06 – Doppio tubo intelaiato in acciaio e nucleo in cemento
- 07 – Tubo controventato con colonne composite e diagonali in acciaio

3.4 Elementi strutturali degli edifici alti

L'innovazione più importante nel campo della tecnica delle costruzioni si ebbe agli inizi del XX secolo quando, nella realizzazione delle strutture portanti degli edifici, si affermò l'impiego contemporaneo di due materiali: il cemento e il ferro.

Nella nuova tecnologia costruttiva le travi non sono più semplicemente appoggiate ai pilastri, ma unite a questi in un unico sistema a telaio.

La caratteristica fondamentale degli edifici d'oggi è che, pur utilizzando ancora i principi del sistema trilitico, la pietra e i laterizi come materiali strutturali sono superati e sono sostituiti dal calcestruzzo e dall'acciaio. La struttura portante di un edificio risulta così composta di uno scheletro continuo, o telaio, formato da travi e pilastri uniti in modo solidale e appoggiato su robuste fondazioni, differenziate secondo la natura del terreno.

3.4.1 Fondazioni

Le fondazioni sono quelle parti strutturali di una costruzione che trasmettono al suolo i carichi e le forze a cui la costruzione è sottoposta, in modo da garantirne la stabilità.

Le fondazioni più comuni sono quelle costituite dai plinti, che sono una sorta di larga base per i pilastri, spesso a forma di tronco piramidale. I plinti sono adatti per terreni in cui lo strato roccioso d'appoggio non è in profondità; su terreni cedevoli, argillosi, permeati d'acqua si fa ricorso alle fondazioni a platea, che costituiscono una sorta di larga zattera d'appoggio per l'edificio; infine se lo strato roccioso si trova ad una certa profondità si può far ricorso alle fondazioni su pali, che consistono in veri e propri pali in C.A. affondati in profondità nel terreno fino a raggiungere gli strati più stabili. Su queste palificazioni si appoggiano poi le fondazioni dei muri o dei pilastri.

Le strutture portanti di fondazione costituiscono l'elemento di trasmissione al terreno dei carichi verticali ed orizzontali agenti sull'edificio; il sedime di fondazione deve essere in grado quindi di reagire in modo tale da garantire condizioni di equilibrio e di stabilità all'intera costruzione.

Lo studio della fondazione riveste enorme importanza ed a nulla varrebbe eseguire una struttura perfettamente calcolata se il rapporto con il piano di posa non fosse risolto. Occorre pertanto conoscere affondo i due termini del problema: la struttura dell'edificio e la natura del terreno. Infatti la scelta del tipo di fondazione è funzione di questi due termini, e, come in ogni opera d'ingegneria, di considerazioni di caratteri economici.

La capacità portante del terreno di fondazione viene analizzata con opportune indagini geognostiche che possono essere eseguite mediante prelievo dei campioni alle varie quote con apposite sonde, mediante penetrometri capaci di valutare la resistenza per attrito ed alla punta e con metodi acustici fondati sulla misura della velocità del suono in terreni di nota composizione.

Un terreno di fondazione posto sotto carico si deforma ovvero cede in misura proporzionale ai carichi trasmessi dalle opere di fondazione; se i cedimenti sono uniformi si rileva un unico abbassamento della quota di posa mentre se sono differenziali, può verificarsi uno stato di sollecitazione non previsto per la struttura con probabili catastrofiche conseguenze. È opportuno in tal senso, quando si prevedono grandi disparità di carichi tra i corpi di fabbrica di un edificio, dovuti ad esempio ad un diverso numero di piani, predisporre giunti tra le parti che consentono un abbassamento differenziale senza che si inducano ulteriori sollecitazioni.

La progettazione delle fondazioni deve procedere secondo precise fasi che possono così sintetizzarsi:

- analisi del terreno
- scelta del sistema
- analisi delle sollecitazioni
- verifica della stabilità dell'opera
- previsione dei cedimenti.

Tali fasi sono strettamente interrelate ed occorre un buon coordinamento tra l'opera del progettista, del geologo e dello strutturista.

Nel campo delle fondazioni possono operarsi almeno tre tipi di classificazioni: la prima in relazione alla tipologia, la seconda relativa alla topologia, la terza alle modalità costruttive. Per quanto riguarda la tipologia è ormai classica la distinzione di fondazioni *dirette* o *indirette* che possono essere entrambe *continue* e *discontinue*. Si dicono fondazioni dirette quelle che trasmettono il carico al terreno per pressione sul piano di posa; fondazioni indirette quelle che agiscono sul terreno attraverso l'interposizione di un elemento, detto palo di fondazione.

I pali lavorano per attrito e/o compressione alla punta e possono essere realizzati con diversi materiali (legno, ferro e cemento) e tecniche d'infissione. I più diffusi oggi sono quelli in calcestruzzo, semplice o armato, gettati direttamente nel terreno previa trivellazione di un vano cilindrico, che fa da cassaforma. È chiaro che se il terreno non ha una consistenza tale da garantire l'integrità delle pareti del cavo cilindrico durante il getto del palo, occorre ricorrere ad un rivestimento a mezzo di un tubo forma, che può essere estratto a mano a mano che progredisce il getto del calcestruzzo. I pali in opera hanno le pareti più o meno corrugate in relazione al metodo di formazione adottato e sono pertanto adatti per fondazioni "sospese" (pali che lavorano per attrito); quelli prefabbricati, più lisci, sono più adatti per fondazioni a "castello" (pali che lavorano di punta) ed agiscono anche costipando il terreno.

Come detto sia le fondazioni dirette che quelle indirette possono essere continue o discontinue, tra le fondazioni continue si annoverano le *travi rovesce* e le *platee*, le discontinue sono costituite dai *plinti isolati*.

Sotto il profilo topologico le fondazioni si classificano in superficiali, profonde ed intermedie in relazione al rapporto tra la profondità del cavo di fondazione (p) e la sua larghezza (l);

si dicono superficiali quelle che hanno $p / l \leq 1$, intermedie quelle che hanno $p / l > 1$, profonde quelle con $p / l \gg 1$.

Per le fondazioni dirette, occorre eseguire uno scavo in trincea che, generalmente, richiede un'armatura per evitare pericolosi franamenti delle pareti. Per modalità costruttive si dividono le fondazioni di due gruppi: ordinarie e idrauliche; le prime in terreni asciutti, le seconde sono quelle che vengono eseguite in presenza d'acqua. Le fondazioni idrauliche possono realizzarsi con prosciugamento del cantiere (palancolate, abbassamento della falda), con congelamento dell'acqua; oppure senza prosciugamento lavorando nell'ambiente acquatico con pozzi, cassoni o palificate.

Gli edifici in muratura del passato avevano fondazioni realizzate anch'esse in muratura, con allargamenti e gradoni in modo da aumentare gradualmente la larghezza del muro entroterra fino a raggiungere una superficie di contatto con il piano di posa capace di ripartire il carico nei limiti di una sollecitazione ammissibile per il terreno di fondazione (sedime).

Oggi le fondazioni, sia per edifici con struttura in c.a. che per quelli con struttura in acciaio si realizzano in cemento armato, avendo cura di evitare il contatto diretto del getto e delle armature con il terreno, ovvero predisponendo uno strato di calcestruzzo magro come sottofondo (sottofondazione) che, nelle fondazioni dirette, può servire anche ad aumentare la superficie di terreno investita.

Per la fondazione in zone sismiche occorre avere particolare cura nel calcolo per fare in modo che siano assorbiti dal terreno non solo le forze verticali dovute alla gravità ma anche quelle orizzontali comunque dirette dovute al sisma. Le tipologie di fondazioni appena descritte sono nel seguito illustrate con maggiore dettaglio.

Le fondazioni in muratura

Il carattere di linearità della struttura muraria si manifesta anche nelle opere di fondazione che sono, salvo rare eccezioni, del tipo continuo. In figura 89 è rappresentata una fondazione diretta costituita da uno zoccolo di base in cemento armato che serve da tramite tra la muratura e il terreno. Le dimensioni della fondazione, ed in primo luogo la larghezza della fascia di terreno investito, vengono determinate tenendo conto dei carichi trasmessi dalla muratura in elevazione e della capacità portante del terreno. È chiaro che la superficie investita, a parità di qualità del terreno, aumenterà al crescere del carico da sopportare e a parità di carico diminuirà al crescere della sollecitazione ammissibile del piano di posa. Ancora nell'ambito delle fondazioni continue dirette l'elemento in cemento armato può essere sostituito da un progressivo aumento dello spessore della muratura procedendo dall'alto verso il basso. Si realizzerà in questo caso una muratura a gradoni che partendo dalla dimensione del muro al piano di campagna raggiungerà quella necessaria sul piano di posa.

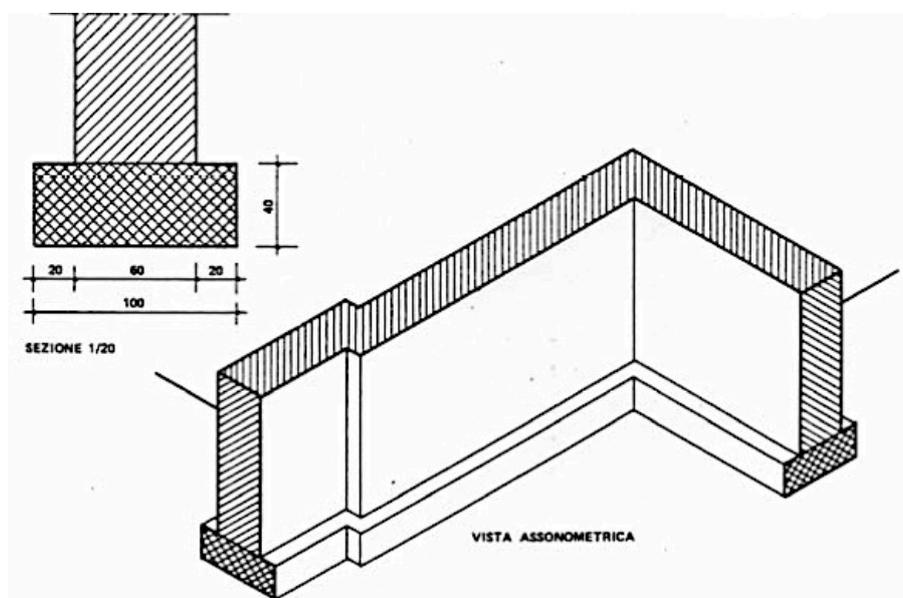


Figura 89: Schema di fondazioni in muratura.

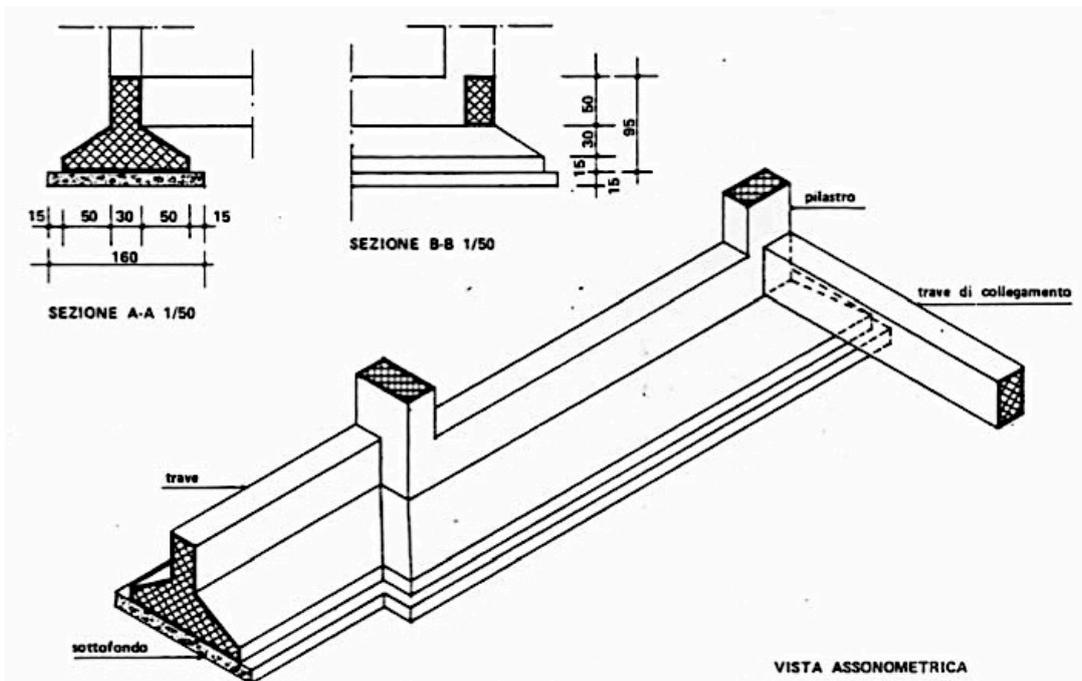


Figura 91: Schema di fondazioni con travi rovesce.

Fondazione con incrocio di travi rovesce

Quando la luce delle travi supera i valori usuali che si trovano nei fabbricati civili ($4 \div 6$ m) raggiungendo quelli, intorno agli $8 \div 10$ m, relativa agli edifici a destinazione speciale, può essere non più conveniente ripartire il carico su un solo allineamento di travi, in quanto ne risulterebbe una suola molto larga ed un carico eccessivo per la trave. S'impegna allora anche la direzione ortogonale disegnando una maglia di travi incrociate. Tale orditura per le travi di fondazione è anche richiesta per le costruzioni in zone sismiche ove esiste l'esigenza di ripartire le sollecitazioni trasmesse alla fondazione nella due direzioni ortogonali. La figura 92 mostra la fondazione diretta continua per edificio in zona sismica.

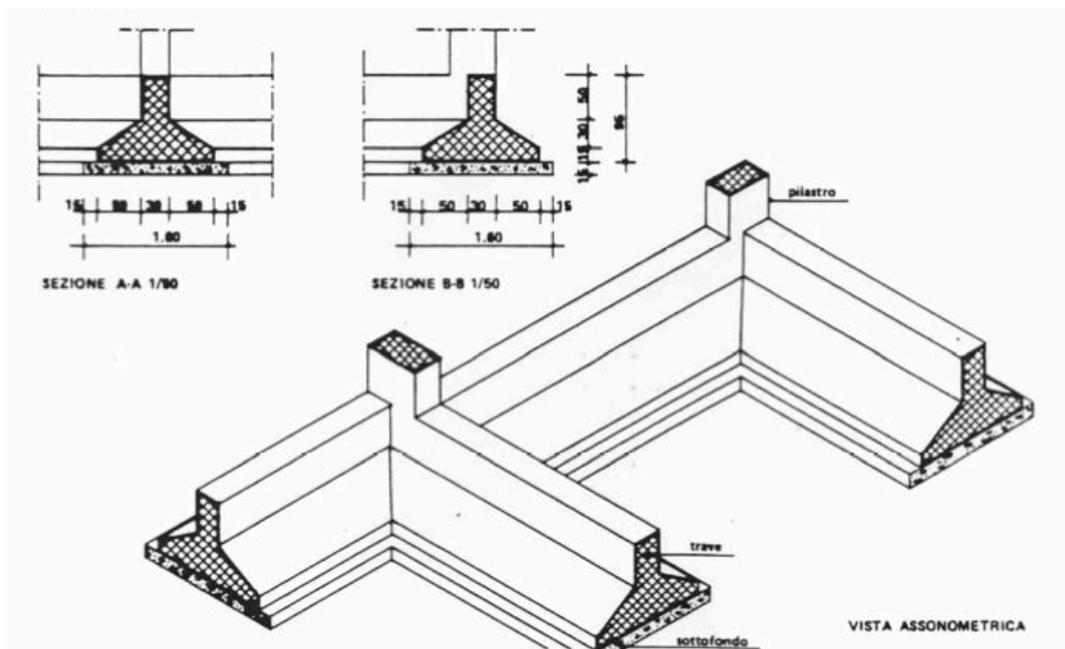


Figura 92: Schema di fondazioni con incrocio di travi rovesce.

Fondazione a platea

A volte, è necessario per la scarsa capacità di portante del terreno, o per l'elevato valore del carico, ripartire i pesi trasmessi dalle strutture verticali sull'intera superficie coperta dal fabbricato, disegnando così ancora un tipo di fondazione diretta e continua, ma più specificamente detta a platea. Questo può considerarsi un solaio rovesciato caricato dalla reazione del terreno, ed è in genere realizzata con un solettone di calcestruzzo armato che trasmette le reazioni al contorno su una maglia di travi nei cui incroci sono ubicati i pilastri. Anche in questo caso è presente il sottofondo di calcestruzzo magro che evidentemente non ha più, se non in minima parte, la funzione di ulteriore allargamento della superficie di appoggio, ma serve principalmente per realizzare un piano orizzontale pulito sul quale disporre le armature della struttura. Lo spessore del solettone così come tutta la geometria delle travi, è definito da precisi calcoli statici, ed è intuitivo che sarà piccolo in presenza di carichi modesti e terreno scadente ed alto in caso contrario (a partire da spessore nell'ordine del metro o anche superiore ad esso) (fig.93).

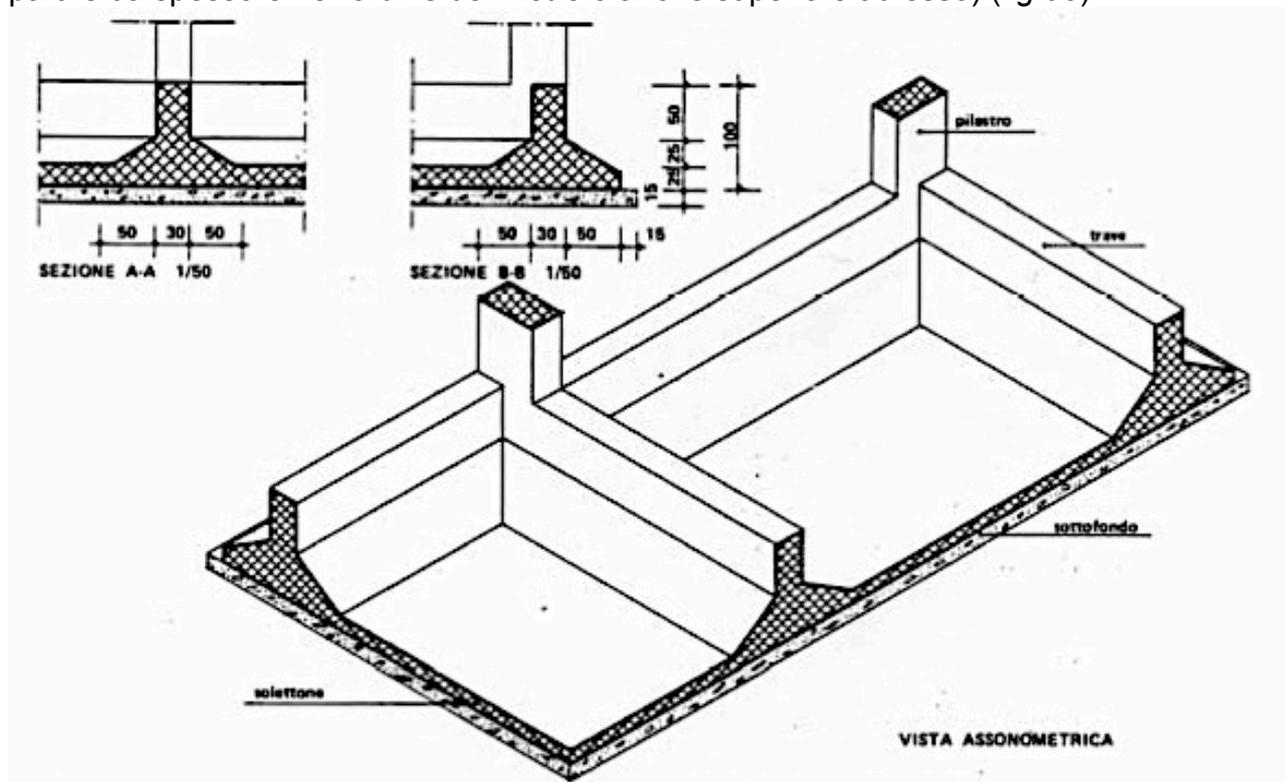


Figura 93: Schema di fondazioni a platea.

Fondazioni discontinue su pali

Quando il piano di posa della fondazione non è direttamente raggiungibile con un conveniente scavo, è possibile condurre ad esso il carico per via diretta, adottando dei pali. Si tratta di elementi cilindrici che attraverso un lavoro che è in parte di attrito sulla superficie laterale, in parte di pressione sulla base, riescono a portare un carico generalmente proporzionale al loro diametro. È possibile pertanto calcolare, per un dato terreno e per un dato palo, il limite massimo di peso sopportabile e, noto il carico trasmesso dal pilastro, computare il numero di pali necessari. Si avranno così, Com'è mostrato in figura, plinti a due, tre, quattro pali ed oltre, la cui forma e dimensione dipenderà proprio dal numero dei pali ad esso sottostanti. Infatti, per pali da 40 cm, assumendo l'interasse tra essi pari a tre volte il diametro e considerato un margine di dieci centimetri dal perimetro esterno, si avrà ad esempio per un plinto a due pali una

dimensione in pianta di cm 180 X 60 e per uno a quattro pali una dimensione di cm 180 X 180. Nella figura 94 è disegnata una fondazione su pali con travi di collegamento che, oltre ad aver spesso la funzione di costituire fondazione alle chiusure di perimetro (muri di tombagno), servono a rendere solidali i diversi elementi e, nel caso di plinti a due pali, ad assolvere l'indispensabile compito di assorbire le sollecitazioni dovute all'eccentricità trasversale del carico.

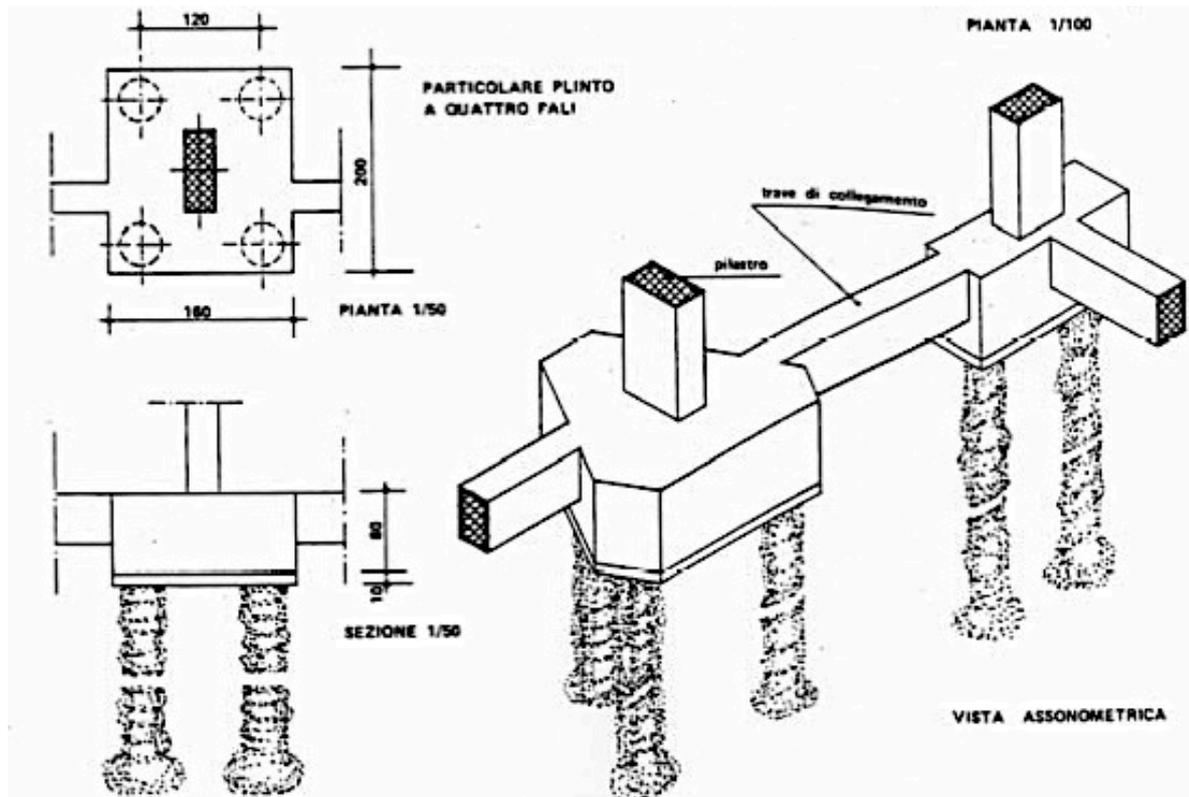


Figura 94: Schema di fondazioni discontinue su pali.

Fondazioni continue su pali

Fondazione indiretta continua è quella costituita da travi rovesce o da platea, portate da pali. La figura 95 mostra un tipo di fondazione a travi su pali ed evidenzia la disposizione di questi, dettata dalle stesse modalità illustrate nel caso delle fondazioni discontinue del paragrafo precedente precedente. L'interasse tra i pali è ancora centoventi centimetri, pari, secondo una norma a carattere generale, a tre volte il diametro; questa distanza può essere aumentata a quattro o cinque volte in presenza di pali lunghi e molto carichi o di palificate sospese, lavoranti solo per attrito.

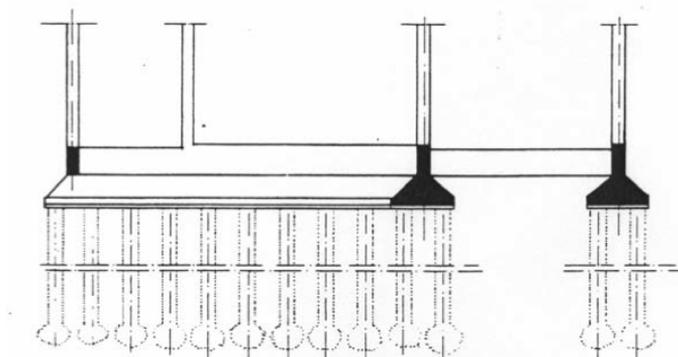


Figura 95: Schema di fondazioni continue su pali.

Fondazioni continue per strutture in acciaio

La fondazione presentata in figura è relativa ad una struttura portante in acciaio per un edificio civile. È di tipo continuo costruita da travi rovesce su sottofondo in calcestruzzo magro, alle quali vengono fissate, mediante tirafondi annegati nel getto di calcestruzzo, le piste di base dei pilastri HE. Si tratta, di una fondazione delle più semplici, di tipo superficiale, in cui la trave può costituire anche elemento di contenimento per un vespaio di pietrame a secco, o portare al suo estradosso il primo solaio di calpestio. La piastra di base del pilastro è saldata al profilo HE lungo il suo perimetro ed è munita di quattro fori per il passaggio dei perni filettati, cui sono avvitate i dadi e i controdadi necessari per l'appiombaggio ed il fissaggio delle strutture verticali. Altro è il caso di pilastri di notevole dimensioni portanti grandi carichi, per i quali l'elemento di base non può essere più di una semplice piastra, ma diviene una struttura irrigidita da nervature o profilati che si può dire costituisca un vero plinto di fondazione. Occorre osservare che, essendo l'acciaio un materiale facilmente attaccabile dall'ossidazione, è necessario, quando possibile, evitare il contatto diretto con il terreno facendo partire la struttura metallica al di sopra di una fondazione in cemento armato, ovvero usando particolari accorgimenti contro la corrosione (fig. 96).

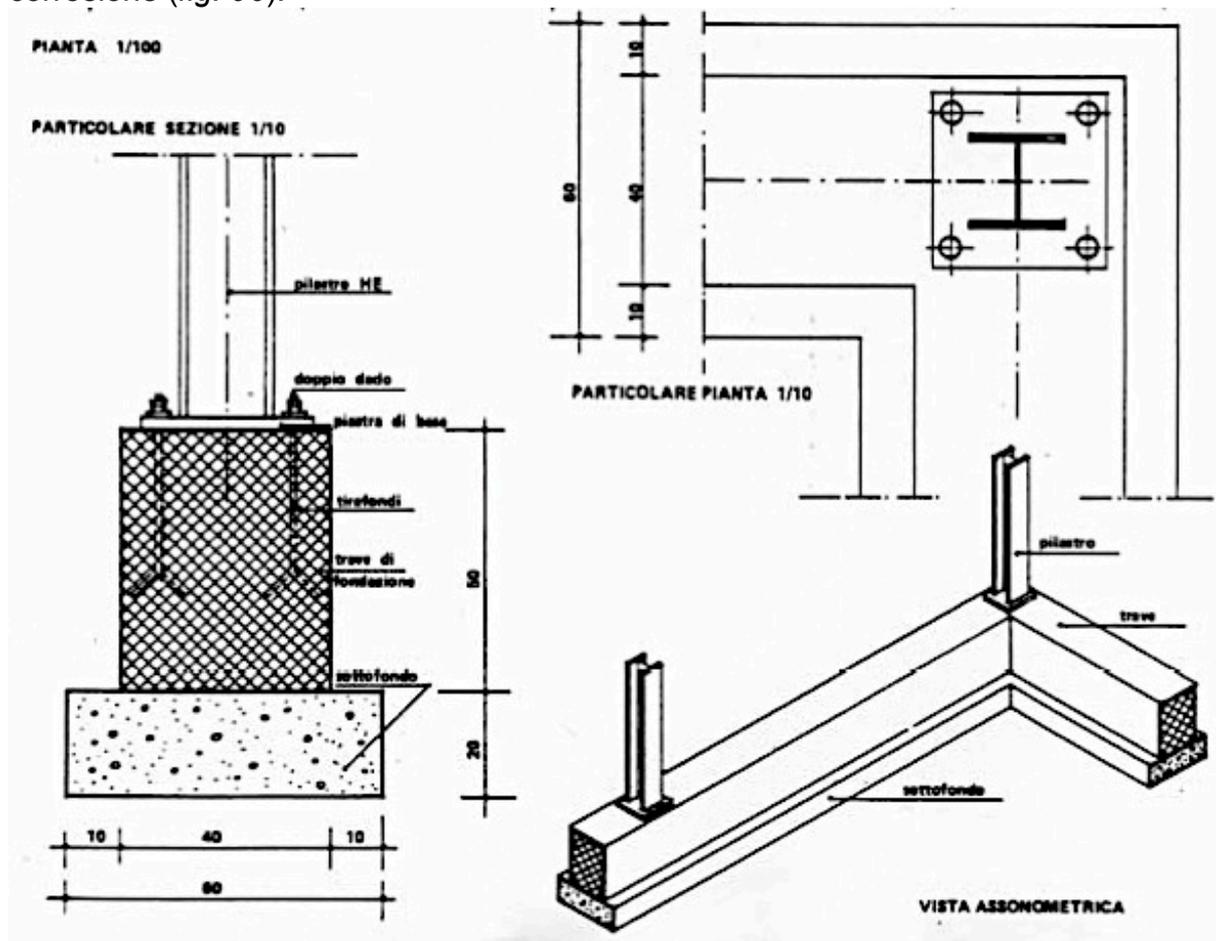


Figura 96: Schema di fondazioni per strutture in acciaio.

3.4.2 Nucleo di irrigidimento

I nuclei di irrigidimento sono realizzati in calcestruzzo armato ed hanno forma caratterizzata da grande variabilità.

Essi assolvono l'essenziale funzione statica di equilibrare le azioni orizzontali applicate all'edificio, in maniera del tutto simile ai controventi.

Le modalità costruttive di questi elementi hanno raggiunto elevati gradi di standardizzazione. Esse comprendono l'utilizzo di casseri autoavanzanti, entro i quali viene disposta l'armatura metallica predisposta mediante prefabbricazione e viene successivamente gettato il calcestruzzo portato in quota mediante una pompa anch'essa autavanzante su cremagliera.

Dal corretto funzionamento del sistema cassero, montaggio dell'armatura, pompa, dipende l'efficienza del sistema costruttivo che è condizione basilare per un coretto avanzamento delle opere strutturali.

La necessità di ridurre i tempi costruttivi richiede:

- una ricerca approfondita atta a semplificare i procedimenti di prefabbricazione delle armature e la loro posa in opera.
- un progetto raffinato del materiale calcestruzzo, le cui caratteristiche essenziali devono essere la lavorabilità, la possibilità di essere pompato ad altezze dell'ordine di 150 m, lo sviluppo di sufficiente resistenza a poche ore dal getto per consentire l'immediato avanzamento del cassero.

3.4.3 Colonne e travi

Il *pilastro* è un elemento strutturale verticale portante che trasmette i carichi, su di esso agenti dall'alto fino alla struttura di fondazione, sulla struttura di fondazione; è sottoposto a carichi verticali e orizzontali, a sollecitazioni di sforzo normale, momento flettente o, più in generale, di presso-flessione semplice o deviata. Le forme e il dimensionamento di questo elemento sono funzione del comportamento strutturale.

Le verifiche strutturali da effettuare per la stabilità di un pilastro sono la resistenza a compressione e la verifica ad instabilità per carico di punta, ossia l'inflessione laterale rispetto all'asse nelle deformazioni trasversali fra pilastri.

La *trave*, come il pilastro, è un elemento strutturale che possiede una dimensione prevalente sulle altre due. Dal punto di vista geometrico è definita come un solido generato da una figura piana in movimento nello spazio che si mantiene ortogonale alle traiettorie descritte dal suo asse. Le travi possono essere principali e secondarie: le principali sostengono i carichi agenti trasferendoli alle strutture verticali; le secondarie sono travi sostenute dalle principali.

La sezione della trave, e per sezione si intende qualsiasi posizione assunta dalla figura piana nel movimento da essa descritto, può essere piena (trave *piena*) o alleggerita (trave *alleggerita*).

Le travi a sezione piena (o a parete) possono avere sezione rettangolare o essere realizzate con profilo ad I, T, L, C, H, ecc., che consente di ridurre il peso e ottimizzare la quantità di materiale rispetto alle sollecitazioni. Le travi a sezione alleggerita possono avere profilo scatolare, a cassone, o possono essere di tipo reticolare. Le travi a cassone sono solitamente impiegate in presenza di grandi luci e sono costituite da una sezione chiusa cava con elementi interni di irrigidimento. Le travi reticolari sono formate da un elemento a maglie strutturali indeformabili, composto da aste verticali e diagonali, soggette prevalentemente a sforzi assiali, o idealmente incernierate nei nodi dove sono

applicati i carichi e racchiuse tra un corrente superiore ed uno inferiore (briglie): in questo modo si ha un sistema di aste sollecitate a compressione o a trazione, a seconda della loro posizione nella maglia reticolare.

Pilastri in acciaio

Il *pilastro in acciaio* può essere formato da profili chiusi circolari, quadrati o rettangolari o da profilati tipo HE, che presentano minore sensibilità a fenomeni di instabilità per snellezza. Può essere anche realizzato attraverso l'unione di semilavorati che, tramite connessioni (un tempo chiodatura, oggi bullonatura o saldatura), formano elementi composti.

Il sistema di connessione utilizzato tra gli elementi composti influisce sul comportamento della struttura: la chiodatura e la bullonatura prevedono l'utilizzo di elementi mobili che fanno da connettori e che necessitano di forature preventive degli elementi da unire; la saldatura, invece, attraverso la fusione metallica, permette di evitare forature ed ottenere elementi monolitici.

La capacità portante del pilastro metallico è condizionata dalla snellezza che influisce nella scelta della sezione trasversale. I profili tubolari tondi hanno la massima inerzia all'inflessione laterale (carico di punta) rispetto all'asse in qualsiasi direzione; le sezioni tubolari quadrate hanno un buon comportamento al carico di punta.

Questi profili vengono utilizzati solo di rado a causa degli assemblaggi con gli altri elementi della struttura che risultano difficili e costosi. I profili a sezione aperta sono soggetti a flessione per carico di punta e, per carichi critici, anche a torsione. Le sezioni maggiormente impiegate sono le tipo IPE e HE.

La snellezza di un pilastro, ossia l'effettiva lunghezza utile del pilastro al fine del suo dimensionamento e/o verifica, si calcola con la formula: $\lambda = l_0/\rho_{\min}$

in cui

$l_0 = 0,5 l$ (se il vincolo dei estremità è un doppio incastro)

$l_0 = 0,7 l$ (se il vincolo dei estremità è un incastro-cerniera)

$l_0 = 1 l$ (se il vincolo dei estremità è un doppia cerniera)

dove

ρ_{\min} è uguale al *raggio di inerzia* e varia in funzione della forma e della dimensione minore e della base del pilastro; il suo valore si ricava da tabelle e l_0 è la lunghezza libera di inflessione.

I pilastri meno soggetti a carico di punta sono quelli tozzi e vincolati alle estremità con incastri. Il *pilastro composto in acciaio* può essere ad elementi gemelli, cioè ottenuto dall'unione di due profilati uguali a "C" o "a doppia T" con traverse di ferro piatto (calastrelli); a cassone, congiungendo due o più profilati con tondini piatti continui o nastri di lamiera; a traliccio, con profilati verticali riuniti da calastrelli inclinati a 45°.

I pilastri a cassone hanno profili chiusi tubolari a sezione quadrata o rettangolare che sostengono carichi elevati. Il pilastro a traliccio, sollecitato a presso-flessione, si comporta come un elemento strutturale unico formato da elementi solidali; per evitare svergolamenti dovuti all'inflessione laterale degli elementi compressi, la sua larghezza deve essere compresa tra 1/10 e 1/25 dell'altezza. I pilastri molto alti hanno bisogno quindi di un irrigidimento formato da travi orizzontali collegate ad altezza intermedia. Nel pilastro composto in acciaio il collegamento delle varie parti (tronchi) di pilastro si esegue 40 o 50 cm sopra il piano dei solai; i due tronchi di pilastro possono avere la stessa sezione o sezioni differenti ed il collegamento può avvenire mediante saldatura o chiodatura.

Travi in acciaio

La trave in acciaio può essere a parete piena (con profilati a sezione semplice o composta), a cassone o reticolare. Di norma i profilati a “doppio T”, ad ali strette o larghe, sono impiegati come travi portanti (a parete piena), mentre quelli a “C”, a “L”, a “T”, ecc., si utilizzano per formare le travi composte (a “doppio T”, a cassone, ecc.) o le travi reticolari. L'altezza della trave semplice a doppio T (tipo IPE o HE) dipende dal momento flettente che agisce sulla trave stessa. Nel caso in cui l'altezza di un unico profilato sia eccessiva, si impiegano elementi gemelli (2 “C” o 2 “doppie T”) distanziati tra loro e collegati separatamente al pilastro oppure accoppiati tra loro.

La trave a parete piena è molto pesante e viene utilizzata solo per superare grandi luci con elevati carichi accidentali (ponti stradali e ferroviari). In maniera approssimativa è possibile avere un dimensionamento in altezza (h) di una trave in funzione della luce l:

- trave appoggiata agli estremi: $h = 1/10 * l$
- trave incastrata agli estremi: $h = (1/12 \div 1/18) * l$

Le travi reticolari in acciaio si impiegano per luci superiori ai 12 m. Tale opzione è necessaria per luci comprese tra i 20 m e i 60 m poiché le travi ad anima piena non sono più idonee allo scopo. Le aste delle travi reticolari oggi sono collegate con bullonatura o saldatura, che consente un'economia del peso della struttura. Le travi reticolari possono essere a briglie parallele o inclinate.

L'altezza h di una trave reticolare si proporziona in funzione della luce l:

- travi parallele comuni: $h = 1/10l$
- travi parallele trapezie: $h = 1/8l$
- travi paraboliche: $h = 1/10l$

La protezione antincendio di pilastri e travi in acciaio si può ottenere mediante getti di riempimento in calcestruzzo normale o alveolare o con malte speciali, con applicazione di intonaci (malte a base di gesso) su reti zincate di supporto, con rivestimenti in materiali ignifughi (fibre minerali, vermiculite, perlite) realizzati con feltri di fibre minerali, con lastre e pannelli in gesso o calcestruzzo oppure con elementi prefabbricati sagomati in gesso-perlite, in gesso-calce-silicati o in c.a.

3.4.4 Solai

Costituiscono l'elemento principale dell'impianto strutturale, attraverso il quale viene assicurata la collaborazione fra gli elementi verticali ed il nucleo.

Il loro impegno strutturale è improntato a forte complessità, che ne definisce le prerogative, i materiali e le modalità costruttive più adatti a soddisfarle.

Le strutture per impalcati piani sono strutture orizzontali deputate a trasferire i carichi – verticali e orizzontali – alla struttura di elevazione verticale e ad eventuali elementi strutturali di irrigidimento.

In funzione della morfologia degli elementi, gli impalcati vengono classificati in:

- impalcati costituiti da **elementi monodimensionali**: singole travi o sistemi combinati di travi di orditura principale e travetti di orditura secondaria, griglie e cassettonati);
- impalcati costituiti da **elementi bidimensionali**, di piccola o grande dimensione: solai in getto pieno e prefabbricati, sia in pannelli che a piastra

In funzione della direzione nella distribuzione dei carichi si hanno:

- impalcati **monodirezionati**, in cui la trasmissione dei carichi avviene secondo una sola direzione alla volta (direzione prevalente secondo cui lavora l'intero complesso), e possono essere distinti in impalcati a semplice orditura o a doppia orditura con travi principali e secondarie;
- impalcati **bidirezionati** (o multidirezionati), in cui la trasmissione dei carichi avviene secondo due (o più) direzioni, costituiti da griglie bidirezionate o multidirezionate di travi o da piastre.

In base ai procedimenti costruttivi si hanno:

- Impalcati in **calcestruzzo armato ordinario o presollecitato**.
Negli impalcati in c.a. si distinguono impalcati con travi parzialmente o completamente gettate in opera, solai in getto pieno (solai a soletta piena, nervati bidirezionati, solai a fungo), solai alleggeriti. I solai alleggeriti sono costituiti da elementi di solito monodimensionali (travetti) o bidimensionali (lastre o pannelli) disposti a formare un impalcato monodirezionato insieme ad elementi di alleggerimento, di norma di laterizio od in calcestruzzo leggero di argilla espansa, calcestruzzo normale sagomato, materie plastiche od elementi organici mineralizzati.
- Impalcati a struttura mista **acciaio-calcestruzzo**.
- Impalcati in calcestruzzo **armato presollecitato o a sezione mista acciaio - calcestruzzo** impieganti elementi prefabbricati.

Gli impalcati devono essere concepiti secondo la doppia possibilità di sistemi monodirezionati o bidirezionati. È opportuno considerare le modalità di connessione (*nod*i) tra l'impalcato e le strutture verticali (*appoggiato, semincastrato, incastrato*), sia che si tratti di travi monodirezionate che disposte a griglia, che di piastra vera e propria.

Le sollecitazioni raggiungono il valore massimo in mezzera, ove la formula della flessione semplice è $W = ab^2/6$.

Il regime tensionale indotto nella piastra continue riduce in modo importante gli sforzi di torsione. Gli impalcati piani assolvono sia alla funzione di trasferimento dei carichi verticali alle strutture verticali, che a quella di assorbimento e ripartizione delle azioni orizzontali sulle strutture verticali, in base all'ipotesi che debbano comportarsi come strutture rigide nel loro piano.

Altre due caratteristiche prestazionali importanti sono la sicurezza in caso d'incendio e le condizioni di benessere.

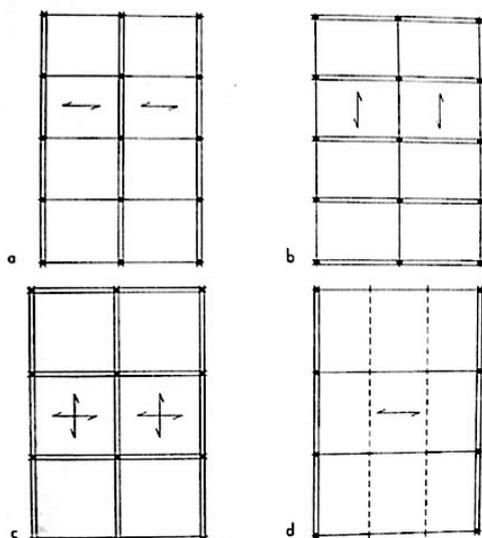


Figura 97: tipologie di impalcati piani.

a) singolo ordine di travi portanti, disposti secondo la luce minore;

b) singolo ordine di travi portanti, disposte secondo la luce maggiore qualora quest'ultima risultasse troppo ampia per l'orditura del solaio;

c) sistema di travi portanti disposte nelle due direzioni ortogonali con impalcato bidirezionato;

d) sistema di travi principali e secondarie, adottato di luci molto ampie.

Impalcati in calcestruzzo armato ordinario o presollecitato

I solai con getto in opera sono realizzati predisponendo su una cassetta, reimpiegabile o non, le armature delle nervature, fra le quali sono interposti gli elementi di alleggerimento. All'atto del disarmo delle casseforme il conglomerato deve aver raggiunto una resistenza sufficiente al fine di evitare eccessive deformazioni.

Il getto deve essere costipato in modo da consentire il completo inglobamento delle armature e l'aderenza con i blocchi. Dovendo prevedere delle asole nel solaio è opportuno non interrompere la continuità dei travetti; nel caso in cui ciò risultasse necessario è possibile operare mediante la realizzazione di un cordolo trasversale di circa 15-20 cm al fine di riportare il carico sui travetti interi e contigui a quelli interrotti.

Impalcati a struttura mista acciaio-calcestruzzo

Gli impalcati in acciaio sono realizzati mediante solai metallici o solai misti acciaio-calcestruzzo.

I solai integralmente metallici, realizzati a secco in lamiera grecata, non sono da considerare di uso corrente, preferendo sempre adottare un getto integrativo in calcestruzzo per motivi di sicurezza e rigidità dell'impalcato.

I solai misti possono essere realizzati con elementi in laterizio oppure con solette collaboranti in c.a. gettato in opera.

Una specifica soluzione tecnica è costituita dall'impiego di pannelli prefabbricati in c.a. e in c.a.p. volti a realizzare un sistema misto collaborante; in tal caso nelle travi in acciaio vanno previsti dei connettori metallici da fissare all'estradosso.

Negli impalcati a struttura mista acciaio-calcestruzzo uno dei problemi teorici e pratici di maggior rilievo riguarda il comportamento torsionale. Tali impalcati hanno infatti diversi meccanismi resistenti a torsione; meccanismi che possono venire attivati a seconda della configurazione dei controventi, della distribuzione del carico applicato e delle condizioni vincolari al contorno.

I principali sono i seguenti:

- Rigidezza a torsione pura dell'impalcato costituito da soletta, travi e controventamento orizzontale inferiore. Questo tipo di rigidità si ha quindi nel solo caso delle sezioni cosiddette a "cassone aperto";
- Rigidezza a torsione della soletta;
- Rigidezza a torsione da "ingobbamento impedito", cioè dovuta a un qualche impedimento all'ingobbamento delle sezioni di impalcato fuori del proprio piano verticale trasversale.

Considerato che il primo tipo di rigidità torsionale si ottiene controventando nel piano verticale e orizzontale inferiore le travi in profilo saldato e che questa controventatura comporta un onere piuttosto rilevante sia in officina che ancor più in fase di montaggio, si comprende come sia importante saper valutare l'efficacia e la necessità di questa controventatura ai fini della resistenza torsionale degli impalcati a struttura mista.

Impalcati in calcestruzzo armato presollecitato o a sezione mista acciaio -calcestruzzo impieganti elementi prefabbricati.

I solai con travetti prefabbricati hanno il vantaggio di rendere la realizzazione dell'impalcato estremamente veloce e di risparmiare i costi della cassaforma.

Altri vantaggi sono da individuare nel peso ridotto degli elementi, nella conseguente maneggevolezza e nell'armabilità con ferri integrativi qualora ce ne fosse bisogno.

Gli elementi strutturali impiegabili per la realizzazione dei solai possono essere:

- Travetti a traliccio elettrosaldato in acciaio ad aderenza migliorata con fondello in laterizio e strato sottile di calcestruzzo;
- Travetti in c.a.p. ipervibrato e treccia di acciaio armonico;
- Travetti precompressi a traliccio, costituiti da travetti di calcestruzzo ipervibrato, treccia di acciaio armonico e traliccio elettrosaldato sporgente dalla suola precompressa.

4. Caso studio: Torre Residenziale in acciaio con nucleo in c.a.

4.1 Definizioni delle azioni e misura della sicurezza

Principi fondamentali

Le opere e le componenti strutturali devono essere progettate, eseguite, collaudate e soggette a manutenzione in modo tale da consentirne la prevista utilizzazione, in forma economicamente sostenibile e con il livello di sicurezza previsto dalle presenti norme. La sicurezza e le prestazioni di un'opera o di una parte di essa devono essere valutate in relazione agli stati limite che si possono verificare durante la vita nominale. Stato limite è la condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze per le quali è stata progettata.

In particolare, secondo quanto stabilito nei capitoli specifici, le opere e le varie tipologie strutturali devono possedere i seguenti requisiti:

- *sicurezza nei confronti di stati limite ultimi (SLU)*: capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone ovvero comportare la perdita di beni, ovvero provocare gravi danni ambientali e sociali, ovvero mettere fuori servizio l'opera;
- *sicurezza nei confronti di stati limite di esercizio (SLE)*: capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio;
- *robustezza nei confronti di azioni eccezionali*: capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescanti quali incendio, esplosioni, urti.

Il superamento di uno stato limite ultimo ha carattere *irreversibile* e si definisce collasso. Il superamento di uno stato limite di esercizio può avere carattere *reversibile* o *irreversibile*.

Per le opere esistenti è possibile fare riferimento a livelli di sicurezza diversi da quelli delle nuove opere ed è anche possibile considerare solo gli stati limite ultimi.

La durabilità, definita come conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture, proprietà essenziale affinché i livelli di sicurezza vengano mantenuti durante tutta la vita dell'opera, deve essere garantita attraverso una opportuna scelta dei materiali e un opportuno dimensionamento delle strutture, comprese le eventuali misure di protezione e manutenzione.

4.1.1 Stati Limite

Secondo il metodo degli stati limite, la sicurezza nei riguardi di situazioni limite ultime e/o di esercizio delle strutture viene garantita, per quanto possibile, su base statistica.

Gli stati limite si suddividono in due categorie: Stati Limite Ultimi (SLU) e Stati Limite di Servizio (SLS) o di Esercizio (SLE);

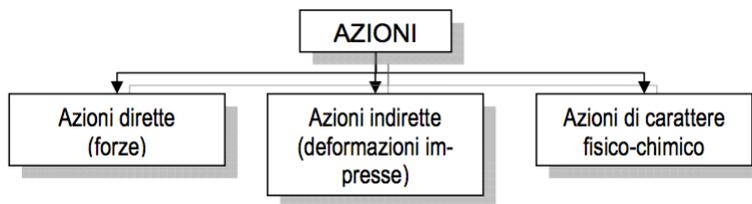
Lo stato limite è, secondo norma, lo stato raggiunto il quale, la struttura o una sua parte, non è più in grado di assolvere la sua funzione o non soddisfa più le condizioni per le quali è stata concepita.

Gli SLU definiscono situazioni estreme, corrispondenti al valore estremo della capacità portante. Gli SLS/SLE sono relazionati alle condizioni di impiego normale della struttura. Le azioni, indicate generalmente con la lettera "F", necessarie alla determinazione delle sollecitazioni o delle caratteristiche delle sollecitazioni, indicate generalmente con la lettera "S", possono essere in grado di indurre stati limite in una struttura e possono essere ricondotte a tre categorie.

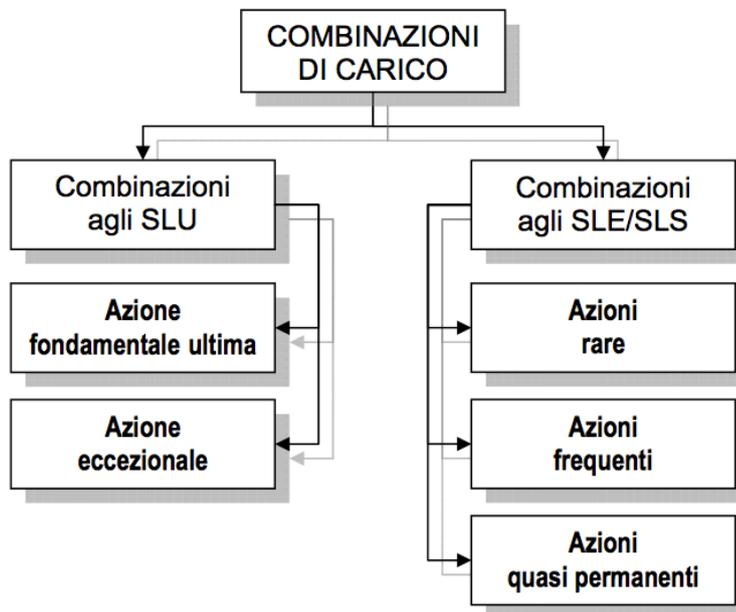
Risulta essenziale, in questo contesto, definire sia le azioni che le sollecitazioni. In dettaglio:

- si definisce “azione” **F** ogni causa o insieme di cause (carichi permanenti, carichi variabili, deformazioni impresse, agenti chimico- fisici, etc.) capaci di indurre stati limite in una struttura;
- si definisce “sollecitazione” o “caratteristica della sollecitazione” **S** ogni effetto od insieme di effetti interni (forza normale, momento flettente, forza di taglio, etc.) che, a causa delle azioni, si determinano nella struttura.

Quindi, considerando i pesi propri degli elementi costituenti la struttura, carichi permanenti, sovraccarichi variabili per gli edifici, variazioni termiche ed igrometriche, cedimenti di vincoli, azioni sismiche e dinamiche in genere, azioni eccezionali, si può tracciare il seguente schema:



Relativamente alle combinazioni di carico si possono identificare due tipologie e raggruppamenti: combinazioni agli stati limite ultimi (SLU) e combinazioni agli stati limite di servizio o, cioè che è lo stesso, esercizio (SLS oppure SLE). Si può tracciare lo schema di seguito riportato:



Quale criterio generale, si può dire che le azioni si devono cumulare in modo da risultare più sfavorevoli ai fini delle singole verifiche, tenendo anche conto della ridotta probabilità di accadimento simultaneo.

Si noti che le combinazioni di carico, sia allo stato limite ultimo che di esercizio, hanno carattere orientativo e sono da ritenersi valide per costruzioni civili e/o industriali di carattere corrente per le quali non sono definite leggi specifiche.

Stati Limite Ultimi

I principali Stati Limite Ultimi sono:

- perdita di equilibrio della struttura o di una sua parte;
- spostamenti o deformazioni eccessive;
- raggiungimento della massima capacità di resistenza di parti di strutture, collegamenti, fondazioni;
- raggiungimento della massima capacità di resistenza della struttura nel suo insieme;
- raggiungimento di meccanismi di collasso nei terreni;
- rottura di membrature e collegamenti per fatica;
- rottura di membrature e collegamenti per altri effetti dipendenti dal tempo;
- instabilità di parti della struttura o del suo insieme;

Stati Limite di Esercizio

I principali Stati Limite di Esercizio sono:

- danneggiamenti locali (ad es. eccessiva fessurazione del calcestruzzo) che possano ridurre la durabilità della struttura, la sua efficienza o il suo aspetto;
- spostamenti e deformazioni che possano limitare l'uso della costruzione, la sua efficienza e il suo aspetto;
- spostamenti e deformazioni che possano compromettere l'efficienza e l'aspetto di elementi non strutturali, impianti, macchinari;
- vibrazioni che possano compromettere l'uso della costruzione;
- danni per fatica che possano compromettere la durabilità;
- corrosione e/o eccessivo degrado dei materiali in funzione dell'ambiente di esposizione;

Verifiche

Le opere strutturali devono essere verificate:

- per gli stati limite ultimi che possono presentarsi, in conseguenza alle diverse combinazioni delle azioni;
- per gli stati limite di esercizio definiti in relazione alle prestazioni attese.

Le verifiche di sicurezza delle opere devono essere contenute nei documenti di progetto, con riferimento alle prescritte caratteristiche meccaniche dei materiali e alla caratterizzazione geotecnica del terreno, dedotta in base a specifiche indagini. La struttura deve essere verificata nelle fasi intermedie, tenuto conto del processo costruttivo; le verifiche per queste situazioni transitorie sono generalmente condotte nei confronti dei soli stati limite ultimi.

Per le opere per le quali nel corso dei lavori si manifestino situazioni significativamente difformi da quelle di progetto occorre effettuare le relative necessarie verifiche.

Sicurezza

Per la valutazione della sicurezza delle costruzioni si devono adottare criteri probabilistici scientificamente comprovati. Nel seguito sono normati i criteri del metodo semiprobabilistico agli stati limite basati sull'impiego dei coefficienti parziali di sicurezza, applicabili nella generalità dei casi; tale metodo è detto di primo livello. Per opere di

particolare importanza si possono adottare metodi di livello superiore, tratti da documentazione tecnica di comprovata validità.

Nel metodo semiprobabilistico agli stati limite, la sicurezza strutturale deve essere verificata tramite il confronto tra la *resistenza* e l'*effetto delle azioni*. Per la sicurezza strutturale, la resistenza dei materiali e le azioni sono rappresentate dai valori caratteristici, R_{ki} e F_{kj} definiti, rispettivamente, come il frattile inferiore delle resistenze e il frattile (superiore o inferiore) delle azioni che minimizzano la sicurezza.

In genere, i frattili sono assunti pari al 5%. Per le grandezze con piccoli coefficienti di variazione, ovvero per grandezze che non riguardino univocamente resistenze o azioni, si possono considerare frattili al 50% (valori mediani).

La verifica della sicurezza nei riguardi degli stati limite ultimi di resistenza si effettua con il "*metodo dei coefficienti parziali*" di sicurezza espresso dalla equazione formale:

$$R_d \geq E_d$$

dove R_d è la resistenza di progetto, valutata in base ai valori di progetto della resistenza dei materiali e ai valori nominali delle grandezze geometriche interessate ed E_d è il valore di progetto dell'effetto delle azioni, valutato in base ai valori di progetto $F_{dj} = F_{kj} \cdot \gamma_{Fj}$ delle azioni o direttamente tramite $E_{dj} = E_{kj} \cdot \gamma_{Ej}$.

I coefficienti parziali di sicurezza, γ_i e γ_j , associati rispettivamente al materiale i -esimo e all'azione j -esima, tengono in conto la variabilità delle rispettive grandezze e le incertezze relative alle tolleranze geometriche e alla affidabilità del modello di calcolo. La verifica della sicurezza nei riguardi degli stati limite di esercizio si esprime controllando aspetti di funzionalità e stato tensionale.

4.1.2 Classificazione delle azioni

Si definisce azione ogni causa o insieme di cause capace di indurre stati limite in una struttura.

Classificazione delle azioni in base al modo di esplicarsi

- *dirette*: forze concentrate, carichi distribuiti, fissi o mobili;
- *indirette*: spostamenti impressi, variazioni di temperatura e di umidità, ritiro, precompressione, cedimenti di vincolo, ecc.
- *degrado*: endogeno: alterazione naturale del materiale di cui è composta l'opera strutturale o esogeno: alterazione delle caratteristiche dei materiali costituenti l'opera strutturale, a seguito di agenti esterni.

Classificazione delle azioni secondo la risposta strutturale

- *statiche*: azioni applicate alla struttura che non provocano accelerazioni significative della stessa o di alcune sue parti;
- *pseudo statiche*: azioni dinamiche rappresentabili mediante un'azione statica equivalente;
- *dinamiche*: azioni che causano significative accelerazioni della struttura o dei suoi componenti.

Classificazione delle azioni secondo la variazione della loro intensità nel tempo

- *permanenti* (G): azioni che agiscono durante tutta la vita nominale della costruzione, la cui variazione di intensità nel tempo è così piccola e lenta da poterle considerare con sufficiente approssimazione costanti nel tempo, come: peso proprio di tutti gli elementi strutturali, peso proprio del terreno, quando pertinente, forze indotte dal terreno (esclusi gli effetti di carichi variabili applicati al terreno), forze risultanti dalla pressione dell'acqua (quando si configurino costanti nel tempo) (G1); peso proprio di tutti gli elementi non strutturali (G2); spostamenti e deformazioni imposti, previsti dal progetto e realizzati all'atto della costruzione; pretensione e precompressione (P); ritiro e viscosità; spostamenti differenziali;
- *variabili* (Q): azioni sulla struttura o sull'elemento strutturale con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel tempo; di lunga durata: agiscono con un'intensità significativa, anche non continuativamente, per un tempo non trascurabile rispetto alla vita nominale della struttura; di breve durata: azioni che agiscono per un periodo di tempo breve rispetto alla vita nominale della struttura;
- *eccezionali* (A): azioni che si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita nominale della struttura come incendi, esplosioni, urti ed impatti;
- *sismiche* (E): azioni derivanti dai terremoti.

Valore caratteristico

Si definisce valore caratteristico Q_k di un'azione variabile il valore corrispondente ad un frattile pari al 95 % della popolazione dei massimi, in relazione al periodo di riferimento dell'azione variabile stessa.

Nella definizione delle combinazioni delle azioni che possono agire contemporaneamente, i termini Q_{kj} rappresentano le azioni variabili della combinazione, con Q_{k1} azione variabile dominante e Q_{k2}, Q_{k3}, \dots azioni variabili che possono agire contemporaneamente a quella dominante.

Le azioni variabili Q_{kj} vengono combinate con i coefficienti di combinazione

Ψ_{0j} , Ψ_{1j} e Ψ_{2j} , i cui valori sono forniti nelle tabelle per edifici civili e industriali correnti.

Con riferimento alla durata percentuale relativa ai livelli di intensità dell'azione variabile, si definiscono:

- valore quasi permanente $\Psi_{2j} \times Q_{kj}$: la media della distribuzione temporale dell'intensità;
- valore frequente $\Psi_{1j} \times Q_{kj}$: il valore corrispondente al frattile 95 % della distribuzione temporale dell'intensità e cioè che è superato per una limitata frazione del periodo di riferimento;
- valore raro (o di combinazione) $\Psi_{0j} \times Q_{kj}$: il valore di durata breve ma ancora significativa nei riguardi della possibile concomitanza con altre azioni variabili.

Nel caso in cui la caratterizzazione stocastica dell'azione considerata non sia disponibile, si può assumere il valore nominale. Nel seguito sono indicati con pedice k i valori caratteristici, senza pedice k i valori nominali.

4.1.3 Combinazioni delle azioni

Ai fini delle verifiche degli stati limite si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni.

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G1 + \gamma_{G2} \cdot G2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Qk_1 + \gamma_{Q2} \cdot \Psi_{02} \cdot Qk_2 + \gamma_{Q3} \cdot \Psi_{03} \cdot Qk_3 + \dots$$

- Combinazione caratteristica (rara), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili, da utilizzarsi nelle verifiche alle tensioni ammissibili:

$$G1 + G2 + P + Qk_1 + \Psi_{02} \cdot Qk_2 + \Psi_{03} \cdot Qk_3 + \dots$$

- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G1 + G2 + P + \Psi_{11} \cdot Qk_1 + \Psi_{22} \cdot Qk_2 + \Psi_{33} \cdot Qk_3 + \dots$$

- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G1 + G2 + P + \Psi_{21} \cdot Qk_1 + \Psi_{22} \cdot Qk_2 + \Psi_{23} \cdot Qk_3 + \dots$$

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E:

$$E + G1 + G2 + P + \Psi_{21} \cdot Qk_1 + \Psi_{22} \cdot Qk_2 + \dots$$

- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali di progetto Ad:

$$G1 + G2 + P + Ad + \Psi_{21} \cdot Qk_1 + \Psi_{22} \cdot Qk_2 + \dots$$

Nelle combinazioni per SLE, si intende che vengono omessi i carichi Q_{kj} che danno un contributo favorevole ai fini delle verifiche e, se del caso, i carichi G2.

Altre combinazioni sono da considerare in funzione di specifici aspetti (p. es. fatica, ecc.).

Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

Figura 98: Valori dei coefficienti di combinazione

4.1.4 Azioni nelle verifiche agli Stati Limite

Le verifiche agli stati limite devono essere eseguite per tutte le più gravose condizioni di carico che possono agire sulla struttura, valutando i vari effetti delle combinazioni. Nelle verifiche agli stati limite ultimi si distinguono:

- lo stato limite di equilibrio come corpo rigido: EQU;
- lo stato limite di resistenza della struttura compresi gli elementi di fondazione: STR;
- lo stato limite di resistenza del terreno: GEO;

		Coefficiente γ_F	EQU	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali ⁽¹⁾	favorevoli	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Carichi variabili	favorevoli	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare per essi gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Figura 99: Coefficienti parziali per le azioni nelle verifiche SLU.

Il significato dei simboli è il seguente:

γ_{G1} coefficiente parziale del peso proprio della struttura, nonché del peso proprio del terreno e dell'acqua, quando pertinenti;

γ_{G2} coefficiente parziale dei pesi propri degli elementi non strutturali;

γ_{Qi} coefficiente parziale delle azioni variabili.

Il coefficiente parziale della precompressione si assume pari a $\gamma_P = 1,0$.

Nelle verifiche nei confronti degli stati limite ultimi strutturali (STR) e geotecnici (GEO) si possono adottare, in alternativa, due diversi approcci progettuali.

Nell'*Approccio 1* si impiegano due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A), per la resistenza dei materiali (M) e, eventualmente, per la resistenza globale del sistema (R).

Nella *Combinazione 1* dell'*Approccio 1*, per le azioni si impiegano i coefficienti γ_F riportati nella colonna A1 delle Tabelle sopra citate.

Nella *Combinazione 2* dell'*Approccio 1*, si impiegano invece i coefficienti γ_F riportati nella colonna A2.

Nell'*Approccio 2* si impiega un'unica combinazione dei gruppi di coefficienti parziali definiti per le Azioni (A), per la resistenza dei materiali (M) e, eventualmente, per la resistenza globale (R). In tale approccio, per le azioni si impiegano i coefficienti γ_F riportati nella colonna A1.

I coefficienti parziali γ_M per i parametri geotecnici e i coefficienti γ_R che operano direttamente sulla resistenza globale di opere e sistemi geotecnici sono definiti nel Capitolo 6 del DM 14/01/2008.

Azione del vento

La velocità di riferimento del vento v_b è il valore caratteristico della velocità del vento a 10 m dal suolo su un terreno di categoria di esposizione II, mediate su 10 minuti e riferita ad un period di ritorno di 50 anni:

$$v_b = v_{b,0} \text{ per } a_s \leq a_0$$

$$v_b = v_{b,0} + k_a (a_s - a_0) \text{ per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m}$$

con

$v_{b,0}$, a_0 , k_a = parametri forniti in tabella e legati alla regione (zona) in cui sorge la costruzione in esame;

a_s = altitudine sul livello del mare in metri del sito dove sorge la costruzione.

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_a [1/s]
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,010
2	Emilia Romagna	25	750	0,015
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,020
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,020
5	Sardegna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,015
6	Sardegna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,020
7	Liguria	28	1000	0,015
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,010
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,020

Figura 100: Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 , k_a .

La pressione del vento p è un'azione statica agente normalmente alla superficie della costruzione:

$$p = q_b * c_e * c_p * c_d$$

dove

$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2$, ossia la pressione cinetica di riferimento, dove $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$, che è la densità dell'aria, e v_b^2 è la velocità del vento in m/s;

c_p = coefficiente di forma, in funzione del tipo e della geometria della costruzione e del suo orientamento rispetto alla direzione del vento; in condizioni standard è assunto pari ad 1;

c_d = coefficiente dinamico, che considera gli effetti riduttivi della non contemporaneità delle massime pressioni locali e gli effetti amplificativi dovuti alle vibrazioni strutturali; può essere assunto cautelativamente pari ad 1;

c_e = coefficiente di esposizione, che per edifici di forma regolare con $H < 80\text{m}$ e capannoni industriali dipende dall'altezza z sul suolo del punto considerato, dalla topografia e dalla categoria di esposizione del sito.

Se $z \leq 200\text{ m}$:

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln(z / z_0) * [7 + c_t \ln(z / z_0)] \quad z \geq z_{\min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \quad z < z_{\min}$$

k_r , z , z_{\min} : dipendono dalla categoria di esposizione del sito ove sorge la costruzione;
 c_t : coefficiente di topografia, generalmente assunto pari ad 1.

Categoria di esposizione	k_r	z_0 [m]	z_{\min} [m]
I	0.17	0.01	2
II	0.19	0.05	4
III	0.20	0.10	5
IV	0.22	0.30	8
V	0.23	0.70	12

Figura 101: Categoria di esposizione del sito

A	Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15m
B	Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive
C	Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni,...); aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
D	Aree prive di ostacoli (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mare, laghi,...)

L'assegnazione della classe di rugosità non dipende dalla conformazione orografica e topografica del terreno. Affinché una costruzione possa dirsi ubicata in classe A o B è necessario che la situazione che contraddistingue la classe permanga intorno alla costruzione per non meno di 1 km e comunque non meno di 20 volte l'altezza della costruzione. Laddove sussistano dubbi sulla scelta della classe di rugosità, a meno di analisi dettagliate, verrà assegnata la classe più sfavorevole.

Figura 102: Determinazione dei parametri per il calcolo di c_e .

4.2 Descrizione del progetto.

L'edificio progettato è situato nel sedime del vecchio scalo ferroviario di Porta Romana, in un lotto di 20.000 m² e affaccia direttamente su Piazzale Lodi, a Milano.

La morfologia del territorio circostante è condizionata dalla linea ferroviaria presente a Sud del lotto.

Dal basamento, costituito da un doppio edificio in linea contenente funzioni commerciali e servizi, si stagliano le due torri residenziali di 24 piani, esclusi i 2 piani interrati che racchiudono posti auto e cantine di competenza.

L'altezza massima, compresa la copertura, è di 90,5 m.

La posizione dell'edificio è stata controllata affinché il cono d'ombra non oscuri i fabbricati circostanti, quasi esclusivamente ad uso residenziale, che sorgono in maniera casuale all'interno di questo sistema di tipo infrastrutturale.

Il lotto di progetto ha una forma trapezoidale che si sviluppa maggiormente nel senso ovest-est, con il lato obliquo verso est.

Oggi giorno tutta la superficie è occupata da erbacce sorte per la mancanza di manutenzione e lasciate all'incuria. In ultima analisi il lotto non gode di visuali o condizioni privilegiate, sorgendo in un'area molto prossima allo snodo ferroviario, priva di verde e povera di esercizi commerciali.

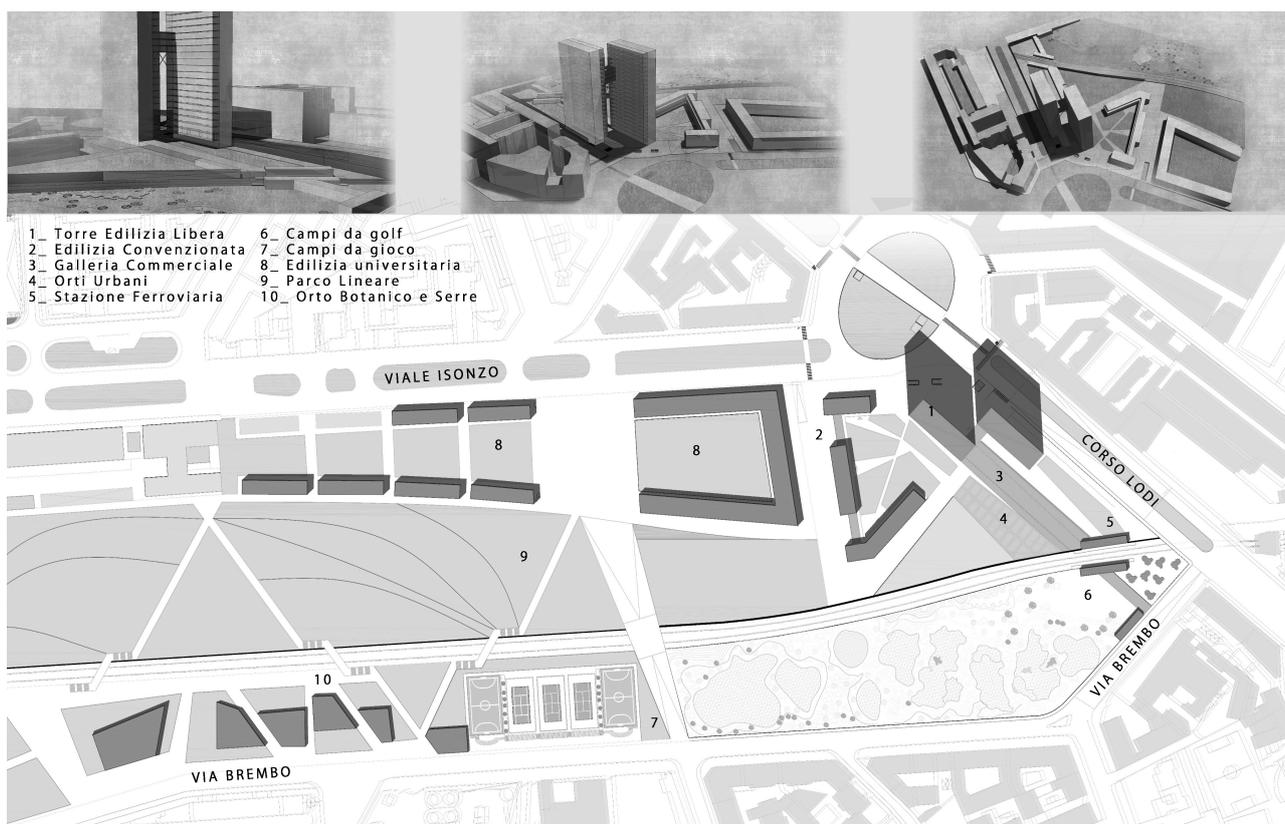


Figura 103: Masterplan.

4.2.1 Normative di riferimento

Decreto Ministeriale del 14 Gennaio 2008;
Circolare Ministeriale n. 617 del 2 febbraio 2009;
Eurocodici:

- EUROCODICE 0, Azioni sulle costruzioni;
- EUROCODICE 2, Costruzioni in Calcestruzzo Armato;
- EUROCODICE 3, Costruzioni in Acciaio.

Vita nominale dell'edificio: numero di anni nel quale la struttura deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata, funzione del tipo di costruzione.

TIPI DI COSTRUZIONE		Vita Nominale V_N (in anni)
1	Opere provvisorie – Opere provvisionali - Strutture in fase costruttiva ¹	≤ 10
2	Opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale	≥ 50
3	Grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o di importanza strategica	≥ 100

Classi d'uso: suddivisione delle costruzioni in quattro classi, di importanza crescente, in funzione delle conseguenze di interruzione di operatività o di eventuale collasso in presenza di azioni sismiche

Periodo di riferimento per l'azione sismica: periodo mediante il quale si valutano le azioni sismiche su ciascuna costruzione, ricavato dal prodotto tra la vita nominale ed il coefficiente d'uso.

$$R = V_N * C_U$$

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C_U	0,7	1,0	1,5	2,0

Classe d'uso I: Costruzioni con presenza occasionale di persone, edifici agricoli.

Classe d'uso II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali.

Classe d'uso III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe IV.

Classe d'uso IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità.

4.2.2 Analisi delle azioni

Combinazioni delle azioni: nelle combinazioni per S.L.E. si omettono i carichi Q_{kj} e G_2 che danno un contributo favorevole ai fini delle verifiche.

Categoria/Azione variabile	ψ_{0j}	ψ_{1j}	ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

Nelle verifiche agli S.L.U. si distinguono lo SL di equilibrio come corpo rigido EQU, lo SL di resistenza della struttura compresi gli elementi di fondazione STR e lo SL di resistenza del terreno GEO.

		Coefficiente γ_F	EQU	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali ⁽¹⁾	favorevoli	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Carichi variabili	favorevoli	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare per essi gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

4.2.3 Analisi strutturale tramite modello ad elementi finiti

L'**analisi a elementi finiti** consiste nella modellazione di prodotti e sistemi in un ambiente virtuale allo scopo di individuare e risolvere potenziali o effettivi problemi strutturali di prestazioni. E' l'applicazione pratica del metodo a elementi finiti (FEM), utilizzato da ingegneri e scienziati per modellare matematicamente e risolvere numericamente problemi complessi di natura strutturali, fluida e multifisica.

Un modello a elementi finiti (FE) è costituito da un sistema di punti, detti "nodi", che definiscono la forma del modello. A questi nodi sono collegati gli elementi finiti veri e propri che formano la mesh (maglia) a elementi finiti e contengono le proprietà materiali e strutturali del modello, che ne definiscono il comportamento e la reazione in determinate condizioni. La densità della mesh a elementi finiti può variare a seconda della variazione attesa nei livelli di carico/sollecitazioni in un'area specifica. Le aree soggette a forti variazioni del carico solitamente richiedono una mesh più densa rispetto a quelle con variazioni di carico ridotte o assenti. I punti di interesse possono essere punti di frattura di materiali precedentemente testati, raccordi, spigoli, dettagli complessi e zone soggette a forti sollecitazioni.

I modelli FE possono essere creati usando elementi monodimensionali (travi 1D), bidimensionali (shell 2D) o tridimensionali (solidi 3D). Utilizzando travi e shell invece di elementi solidi, è possibile creare un modello rappresentativo con un numero minore di nodi senza compromettere la precisione.

Ogni schema di modellazione richiede una gamma di proprietà differenti, come ad esempio sezioni, momenti d'inerzia, costanti torsionali, spessore piastra, rigidità alla flessione, tagli trasversali

Per simulare gli effetti di ambienti di lavoro reali, è possibile applicare diversi tipi di carico al modello, fra cui forze, momenti, spostamenti, velocità, accelerazioni, temperature e flussi termici.

Le tipologie di analisi sono:

- Statica lineare: analisi lineare con carichi applicati e vincoli statici;
- Statica non-lineare e dinamica: effetti da contatto (nel caso in cui una parte del modello entra in contatto con un'altra), definizioni non-lineari del materiale (plasticità, elasticità ecc.) grandi spostamenti (tensioni superiori alla teoria dei piccoli spostamenti che delimita l'approccio con analisi lineare);
- Modalità normali: frequenze naturali di vibrazione;
- Risposta dinamica: carichi o movimenti che variano con il tempo e la frequenza;
- Deformazione da compressione: carichi critici in presenza dei quali una struttura diventa instabile;

I risultati tipici calcolati da un solutore sono: spostamenti, velocità, accelerazioni nodali, forze, tensioni e sollecitazioni elementari.

L'analisi a elementi finiti può essere utilizzata nella progettazione di nuovi prodotti o per perfezionare un progetto esistente, assicurando che sia in grado di rispettare le specifiche prestazionali prima di andare in produzione.

L'analisi consente di:

- prevedere e migliorare le prestazioni e l'affidabilità di un progetto;
- ridurre il ricorso a prototipi e collaudi fisici;
- valutare diversi progetti e materiali;
- ottimizzare i progetti e ridurre il consumo di materiali;

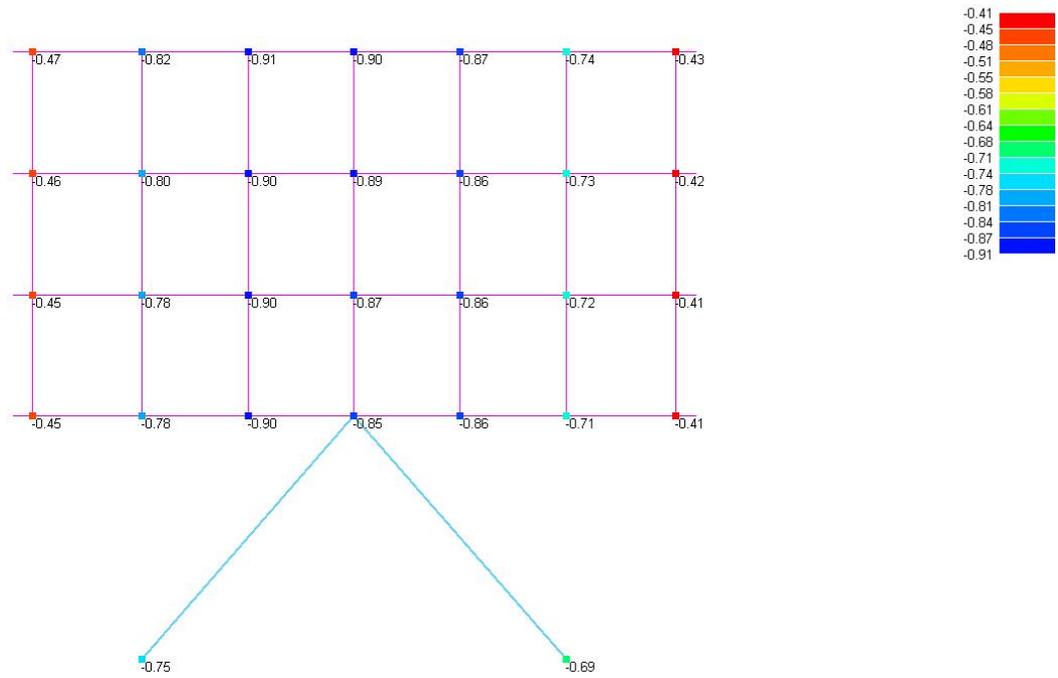


Figura 104: Spostamenti verticali per le azioni agenti sulla passerella allo S.L.E. _ Traslazione Z in cm.

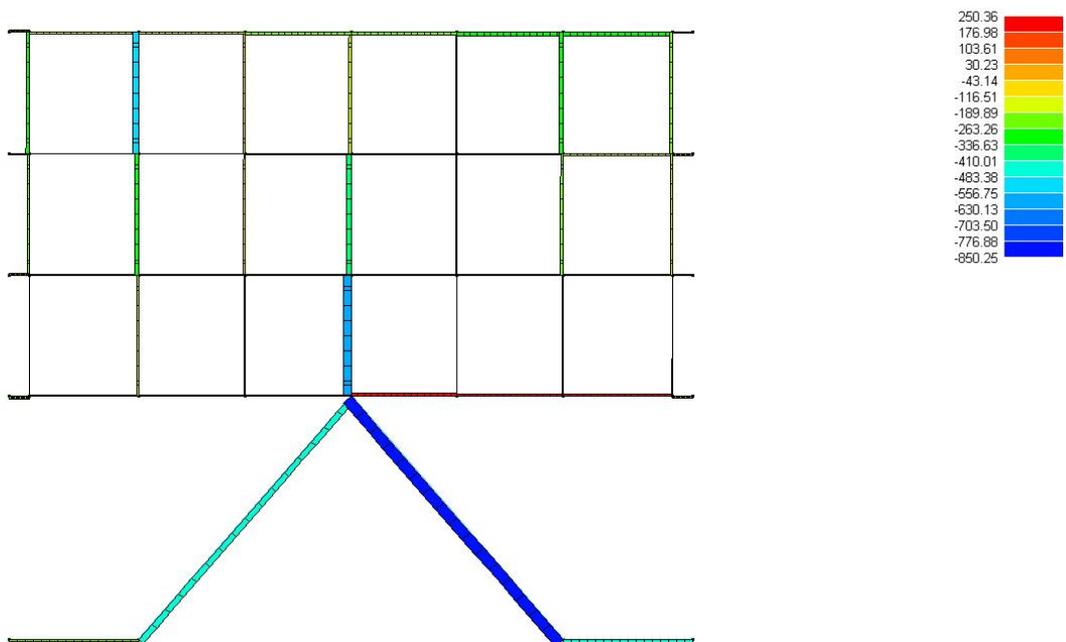


Figura 105: Sforzo assiale delle azioni agenti sulla passerella allo S.L.U. _ Sforzo normale in kN.

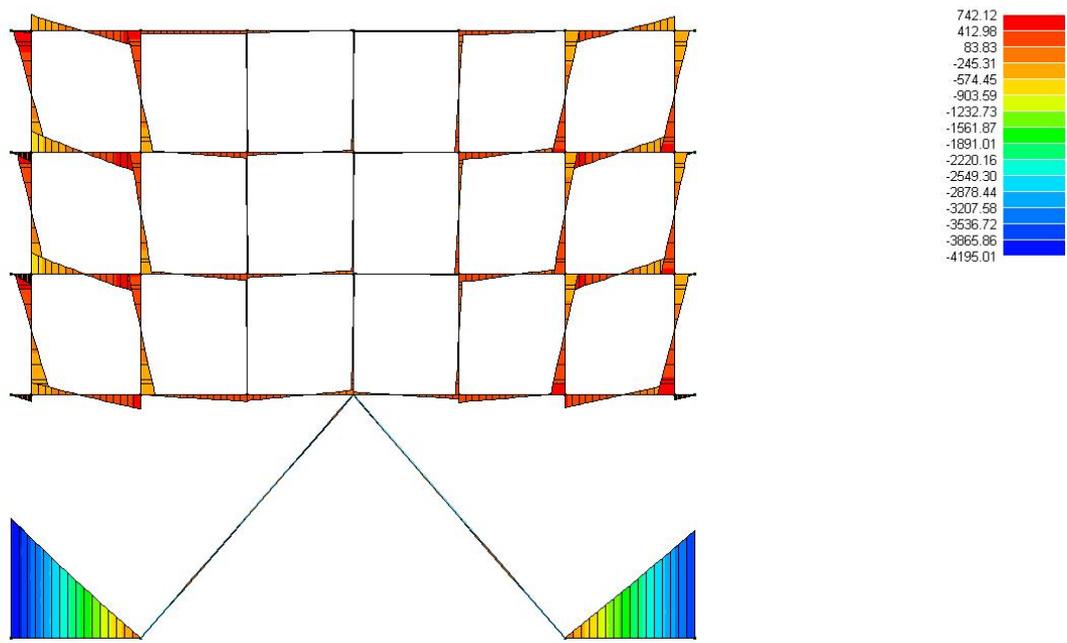


Figura 106: Momento flettente degli elementi strutturali in acciaio della passerella (Travi Vierendeel) e delle mensole in c.a. uscenti dal nucleo di irrigidimento _ Momento in kN*m.

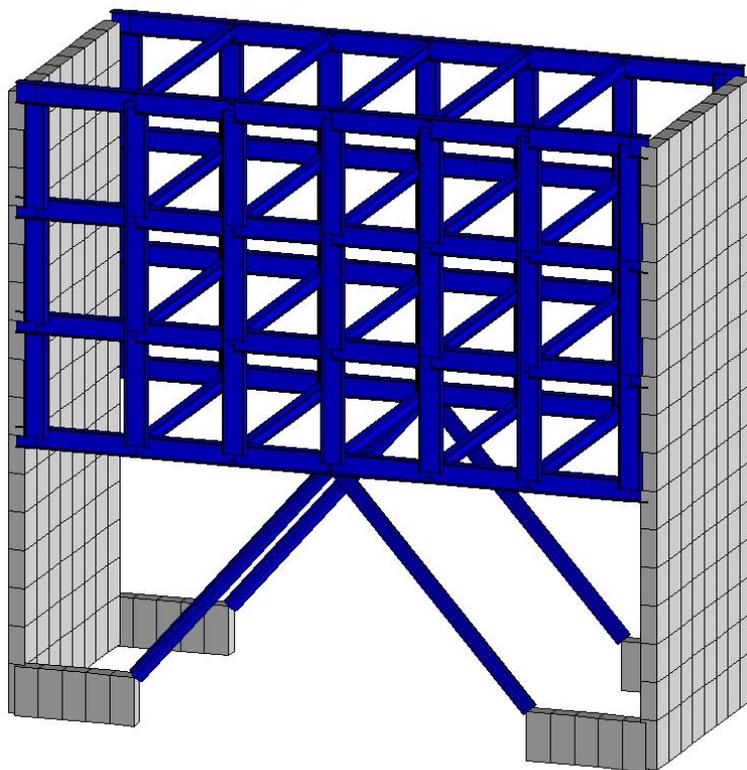


Figura 107: Vista assonometrica del modello.

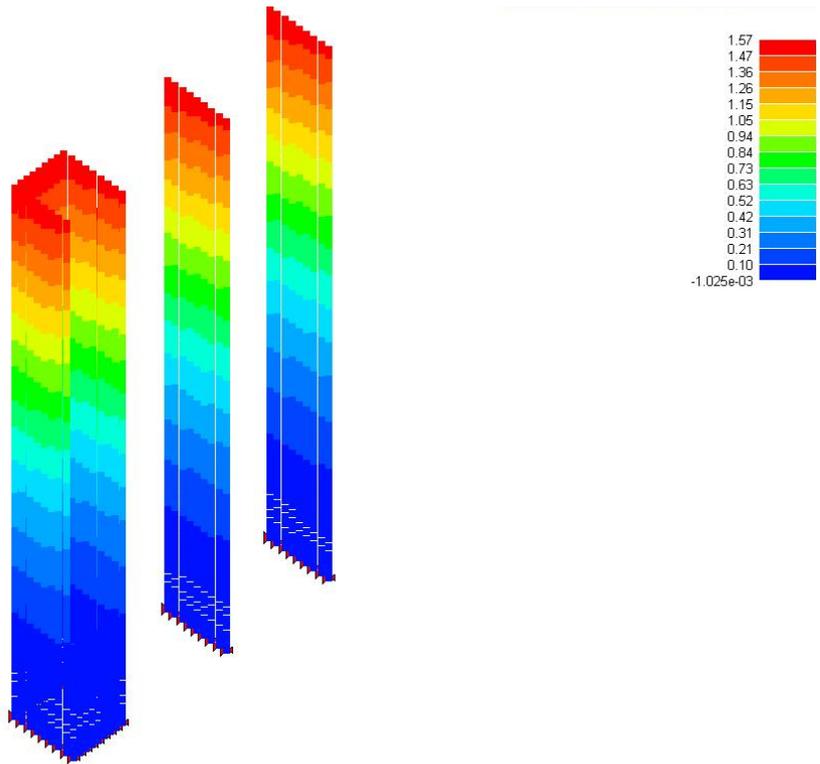


Figura 108: Traslazione in Y dei nuclei e delle pareti in c.a. allo S.L.E. _ Traslazione Y in cm.

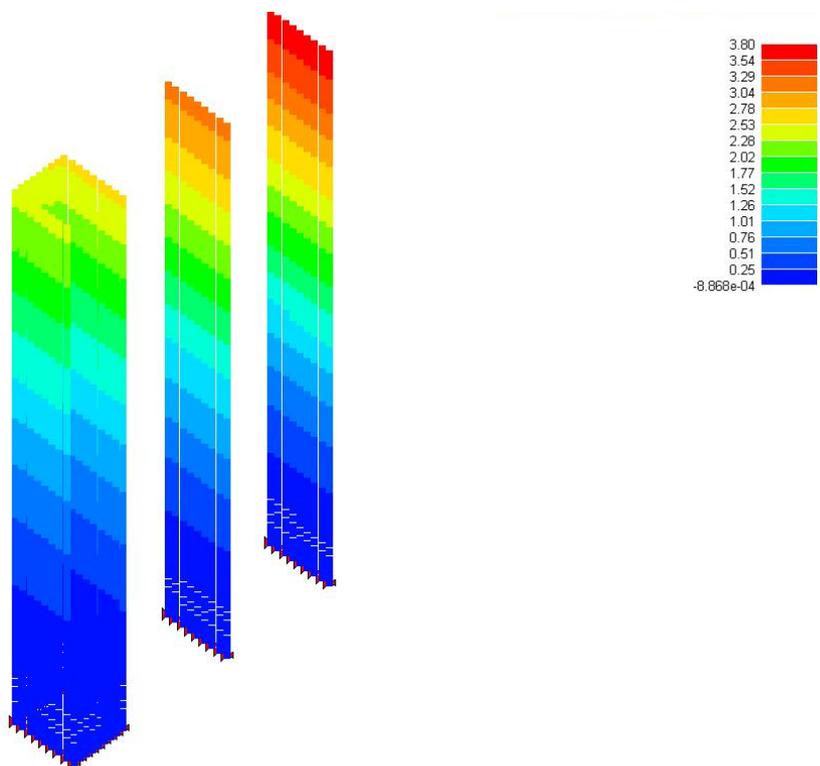


Figura 109: Traslazione in X dei nuclei e delle pareti in c.a. allo S.L.E. _ Traslazione X in cm.

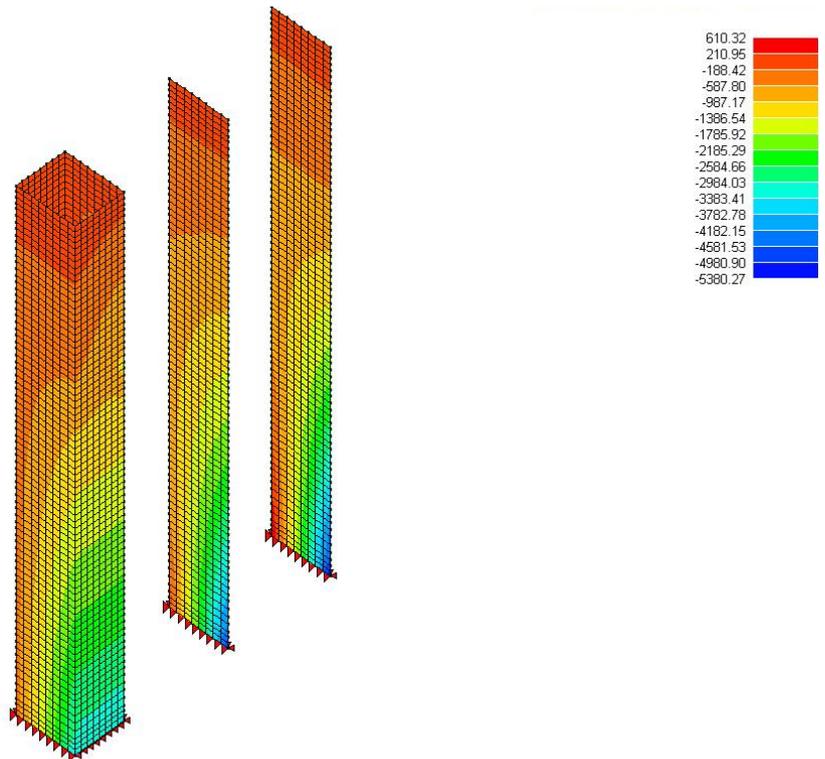


Figura 110: Sforzo assiale del nucleo e delle pareti in c.a. allo S.L.U. _ azione N in kN*m.

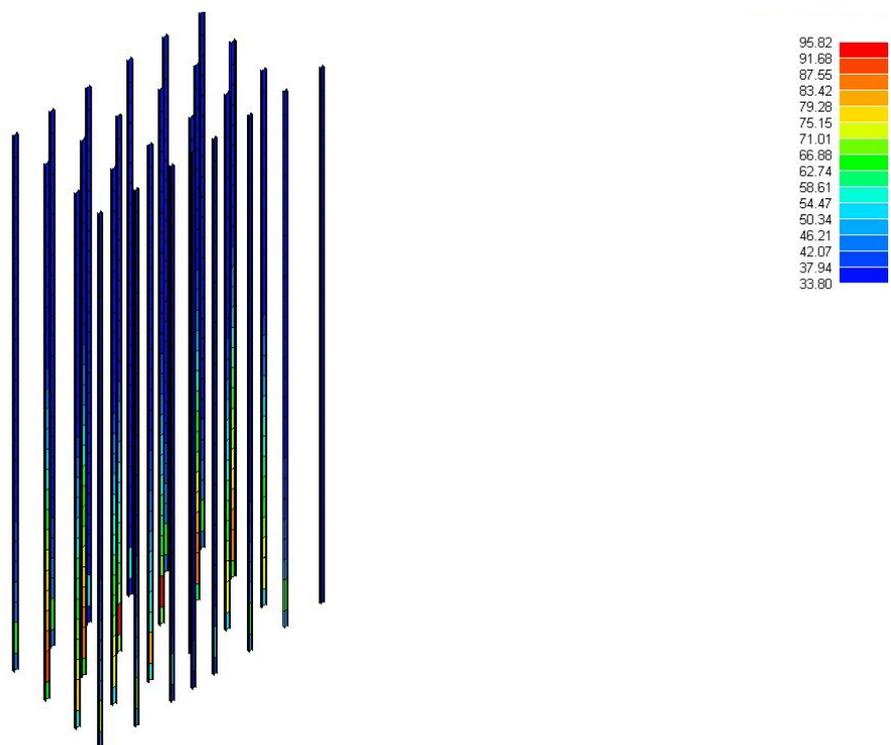


Figura 111: Sfruttamento in percentuale dei pilastri.

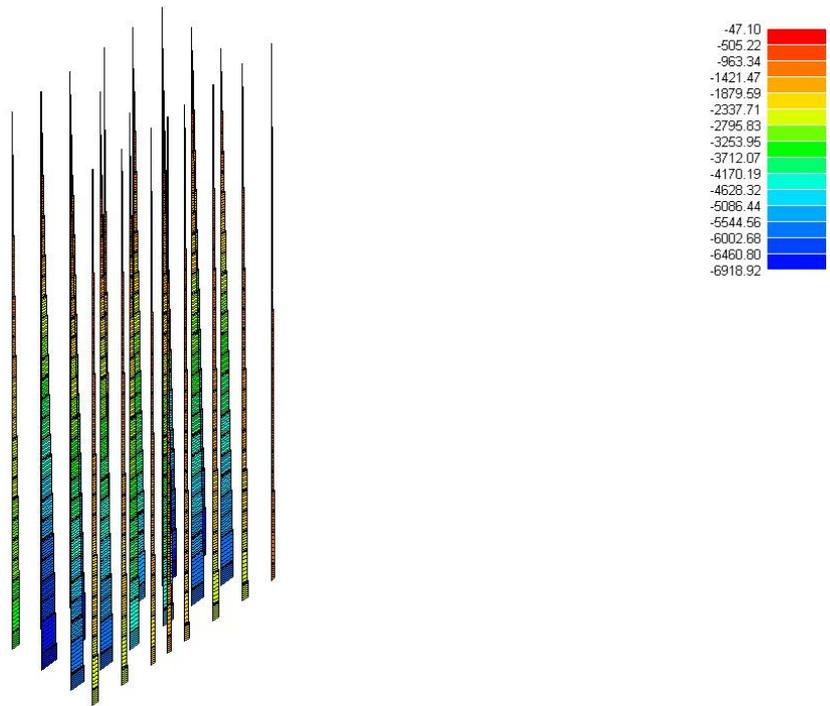


Figura 112: Azione assiale dei pilastri allo S.L.U. _ Sforzo Normale in kN.

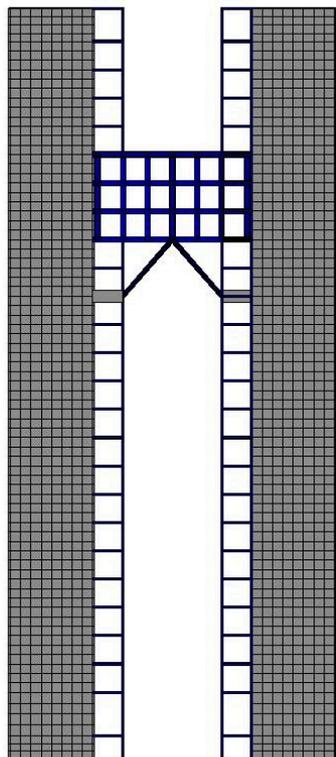


Figura 113: Vista in prospettiva del modello (Y).

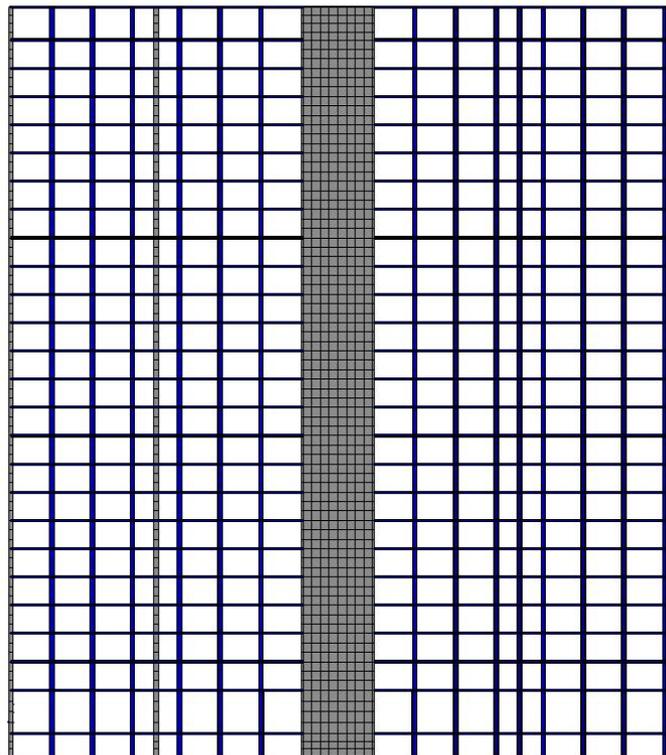


Figura 114: Vista in prospettiva del modello (X).

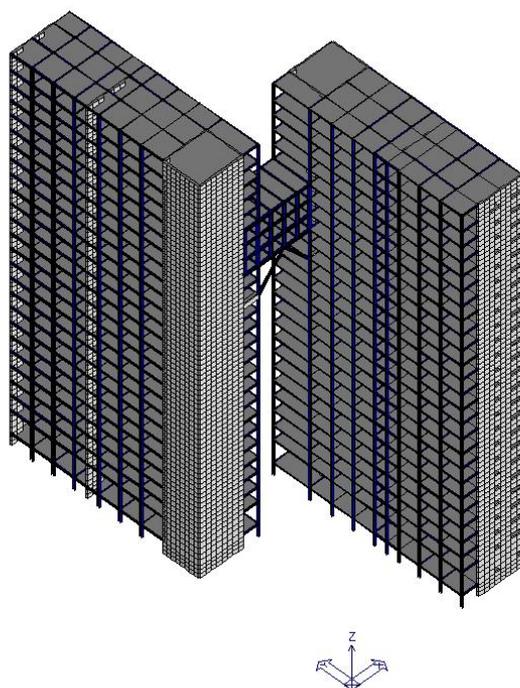


Figura 115: Vista Assonometrica del modello.

Bibliografia

- L. Benevolo, *Storia dell'architettura moderna*, Laterza, Bari 1960 e succ.
M. Salvadori, *Perché gli edifici stanno in piedi*, Bompiani, Milano 2000
M. Salvadori, R. Heller, *Le strutture in Architettura*, Etas, Milano 1991
A. Rossi, *L'architettura della città*, Quodlibet, Macerata 1966
C. Venuti, *Città senza cultura*, Laterza, Bari 2010
J. H. Kunstler, *Manhattan Gothic*, Water Street Press, 2012
R. Vinoly, Hilary Lewis, *A Ground Zero Diary*, 2006
F. Buncuga, *Conversazioni con Giancarlo De Carlo. Architettura e libertà*, Eleuthera Editore, 2000
P. Portoghesi, *Geoarchitettura. Verso un'architettura della responsabilità*, Skira Editore 2005
AA.VV., *Architettura acciaio*, Italsider, Genova 1978
AA. VV., *Manuale di progettazione edilizia, volume IV*, Hoepli, Milano 1995
E. Allen, *I fondamenti del costruire*, McGraw Hill Italia, Milano 1997
G. Brunetti, *Architettura pratica, volume I*, Sistemi editoriali, Napoli 2004
D.K.F. Ching, *Costruire per illustrazioni*, Calderoni, Bologna 1998
A. Petrucci, *Tecnologie dell'architettura*, De Agostini, Novara 1994
H. C. Schultiz, W. Sobek, K. J. Habermann, *Atlante dell'acciaio*, Utet, Torino 1999
M. C. Torricelli, R. Del Nord, P. Felli, *Materiali e tecnologie dell'architettura*, Laterza, Bari 2001
Torroja E., *La concezione strutturale*, Utet, Torino 1966.
G. Ballio, F.M. Mazzolani, *Strutture in acciaio*, Hoepli, Milano, 1987
G. Buccino, *Il grattacielo strutturalmente considerato*, Prospettive Edizioni, Roma, 2003
C. Majorana, *Fondamenti di dinamica e ingegneria sismica*, McGraw-Hill, Milano, 2007
A. Gottfried, *Le strutture*, Hoepli, Milano, 2004
C. Bernuzzi, *Proporzionamento di strutture in acciaio*, Polipress, Milano, 2006

Sitografia

- <http://www.ctbuh.org/>
<http://www.constructalia.com/>
<http://skyscraperpage.com/>
<http://www.storiadimilano.it/repertori/torri/parte3/torri0007.html>
<http://www.old.worldsteel.org>
<http://www.amonnfire.it>
<http://www.federacciai.it>
<http://www.federbeton.it>

Indice delle immagini

Foto 1: Home Insurance Building, Chicago, 1883.....	18
Foto 2: Leiter Building, Chicago, 1889	18
Foto 3: Reliance Building, Chicago, 1890	18
Foto 4: Chicago Tribune, Chicago, 1922	18
Foto 5: Singer Building, New York, 1908	19
Foto 6: Chrysler Building, New York, 1930	19
Foto 7: Empire State Building, New York, 1930.....	20
Foto 8: Master Building, New York, 1930.....	20
Foto 9: Rockefeller Center, New York, 1939.....	20
Foto 10: Promontory Apartments, Chicago, 1946.....	20
Foto 11: Lake Shore Drive Apartments, Chicago, 1951.....	21
Foto 12: Commonwealth Ap., Chicago, 1956	21
Foto 13: Seagram Building, New York, 1958	21
Foto 14: Città per 3 mln di abitanti, progetto del 1922	21
Foto 15: Quartier de la Marine, Algeri, 1938	22
Foto 16: Unité d'Habitation, Marsiglia, 1946	22
Foto 17: Nehne Var, Brema, 1958	22
Foto 18: National Life Insurance, Chicago, 1924	22
Foto 19: St. Mark's Tower, New York, 1929	23
Foto 20: Johnson's Tower, Racine, 1944.....	23
Foto 21: Price Tower, Bartlesville, 1956	23
Foto 22: Broadacre city, progetto del 1935	23
Foto 23: The Mile High Illinois, Chicago 1956.....	24
Foto 24: Centro delle comunicazioni, Kofu, 1966	24
Foto 25: Piano di ricostruzione, Skopje, 1966.....	24
Foto 26: Progetto per l'Expo, Osaka, 1970	25
Foto 27: Torre Shizuoka, Tokio, 1967	25
Foto 28: Hotel 1000 Camere, Tokio, 1972	25
Foto 29: Torre Piacentini, Genova, 1940	25
Foto 30: Torre Breda, Milano, 1954	26
Foto 31: Torrione, Brescia, 1932.....	26
Foto 32: Torre Dante 2, Genova, 1939	26
Foto 33: Torre Snia Viscosa, Milano, 1937	27
Foto 34: Torre Littoria, Torino, 1934	27
Foto 35: Grattacielo Pirelli, Milano, 1960	27
Foto 36: Torre Velasca, Milano, 1958	27
Foto 37: Matitone, Genova, 1992.....	28
Foto 38: Torre Telecom Italia, Genova, 2000	28
Foto 39: Centro Direzionale, Napoli, 1995	28
Foto 40: Torre Unicredit, Milano, 2011.....	29
Foto 41: Palazzo Lombardia, Milano, 2010.....	30
Foto 42: South Tower, Bruxelles, 1966.....	31
Foto 43: Fiera Milano, Milano, 2005.....	39
Foto 44: Citylife, Milano, 2007.....	39
Foto 45: Ing House, Amsterdam, 2002	39
Foto 46: Living Tomorrow, Amsterdam, 2008	39
Foto 47: City Hall, Londra, 2002	40
Foto 48: Nuovo Centro Congressi EUR, Roma, 2008	40
Foto 49: DG Bank, Berlino, 2001	40

Foto 50: Mediateca, Tokyo, 2003.....	41
Foto 51: BMW Welt, Monaco 2007	41
Foto 52: MAXXI, Roma, 1998	41
Foto 53: Uffici VPro, Hilversum, 1997	41
Foto 54: Petronas Towers, Kuala Lumpur, 1998	42
Foto 55: Taipei Financial Center, Taiwan, 2004	42
Foto 55b: Sfera nel Taipei Financial Center, Taiwan, 2004	42
Foto 56: Burj Khalifa, Dubai, 2009	43
Foto 57: Shanghai Tower, Shanghai.....	43
Foto 58: Abraj Al Bait, La Mecca, 2012.....	43
Foto 59: One World Trade Center, NY, 2013.....	43
Foto 60: Willis Tower, Chicago, 1973	43
Foto 61: X-Seed 4000, Tokyo	44
Foto 62: Schema degli edifici più alti al mondo, aggiornato al 2013	44
Figura 63-64: Diagrammi di comportamento al fuoco dell'acciaio e del legno.....	66
Figura 65: Relazione tra deformazione e tensione per acciai ad elevate temperature	67
Figura 66: Variazione delle caratteristiche meccaniche per acciai esposti ad incendio.....	67
Figura 67: Nomogramma sull'incremento di temperatura in sezioni d'acciaio.....	68
Figura 68: Calore specifico del calcestruzzo.....	70
Figura 69: Diagrammi tensione-deformazione del cls.....	71
Figura 70: Modello della relazione tensioni-deformazioni per cls	71
Figura 71: Ciclo di vita dell'acciaio	71
Figura 72: Emissioni di CO2 della siderurgia italiana.....	71
Figura 73: Schema strutturale "a gabbia"	84
Figura 74: Schema di un edificio in acciaio con telai pendolari.....	85
Figura 75: Schema di un edificio in acciaio con telai rigidi.....	86
Figura 76: Schema di controventi ad X.....	87
Figura 77: Schema di controventi diagonali	87
Figura 78: Schema di controventi a V	87
Figura 79: Schema di controventi a K.....	87
Figura 80: Schema di telai "outrigger".....	87
Figura 81: Schema di struttura "a nucleo".....	89
Figura 82: Schema di struttura a tubo intelaiato	90
Figura 83: Schema di struttura a tubo controventato.....	91
Figura 84: Schema di struttura a doppio tubo.....	91
Figura 85: Schema strutturale "a fascio di tubi"	93
Figura 86: Classificazione dei sistemi strutturali degli edifici alti in cemento	94
Figura 87 Classificazione dei sistemi strutturali degli edifici alti in acciaio.....	95
Figura 88: Classificazione dei sistemi strutturali degli edifici alti in acciaio-cemento.....	96
Figura 89: Schema di fondazioni in muratura.	99
Figura 90: Schema di fondazioni su plinti isolati.	100
Figura 91: Schema di fondazioni con travi rovesce.	101
Figura 92: Schema di fondazioni con incrocio di travi rovesce.	101
Figura 93: Schema di fondazioni a platea.....	102
Figura 94: Schema di fondazioni discontinue su pali.....	103
Figura 95: Schema di fondazioni continue su pali.....	103
Figura 96: Schema di fondazioni per strutture in acciaio.....	104
Figura 97: Tipologie di impalcati piani.....	108
Figura 98: Valori dei coefficienti di combinazione	117
Figura 99: Coefficienti parziali per le azioni nelle verifiche SLU.	118
Figura 100: Valori parametri v , a , k	118

Figura 101: Categoria di esposizione del sito	118
Figura 102: Determinazione dei parametri per il calcolo di cp	120
Figura 103: Masterplan generale dell'area di progetto.....	121
Figura 104: Spostamenti verticali per le azioni agenti sulla passerella allo S.L.E.	125
Figura 105: Sforzo assiale delle azioni agenti sulla passerella allo S.L.U.	125
Figura 106: Momento flettente degli elementi strutturali.	126
Figura 107: Vista assonometrica del modello.	126
Figura 108: Traslazione in Y dei nuclei e delle pareti in c.a. allo S.L.E..	127
Figura 109: Traslazione in X dei nuclei e delle pareti in c.a. allo S.L.E..	127
Figura 110: Sforzo assiale del nucleo e delle pareti in c.a. allo S.L.U.	128
Figura 111: Sfruttamento in percentuale dei pilastri.....	128
Figura 112: Azione assiale dei pilastri allo S.L.U.	129
Figura 113: Vista in prospettiva del modello (Y).	129
Figura 114: Vista in prospettiva del modello (X).	130
Figura 115: Vista Assonometrica del modello.....	130