

Salvatore Sbacchis

# Travi reticolari in acciaio

## SOFTWARE PER L'ANALISI MATRICIALE DELLE TRAVI RETICOLARI

- Modellatore e solutore per le coperture reticolari piane
- Analisi matriciale delle travi reticolari
- Analisi calcolo e verifica dell'arcareccio di copertura
- Verifica delle sezioni allo Stato Limite Ultimo
- Profilario sezioni commerciali
- Relazione di calcolo automatica
- Esempi di calcolo di:  
trave Polonceau, trave Palladio, trave Fink, trave ad Arco,  
trave a Portale, trave a Scala, trave Inglese, trave Ponte
- Aggiornato alle NTC2008 e alla Circolare n. 617/2009
- Verifiche eseguite allo Stato Limite Ultimo  
e di Esercizio secondo l'Eurocodice 3

Salvatore Sbacchis

## TRAVI RETICOLARI IN ACCIAIO

ISBN 13 978-88-8207-518-7

EAN 9 788882 075187

Software, 65

Prima edizione, aprile 2013

Sbacchis, Salvatore <1953->

Travi reticolari in acciaio / Salvatore Sbacchis. – Palermo : Grafill, 2013.

(Software ; 65)

ISBN 978-88-8207-518-7

1. Travature reticolari metalliche.

624.18 CDD-22

SBN Pal0253827

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

Finito di stampare nel mese di aprile 2013

presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

ad Enza, mia moglie



# SOMMARIO

<b>PREMESSA</b> .....	p.	11
<b>1. SVILUPPO DELLE COSTRUZIONI IN ACCIAIO</b> .....	"	15
1.1. Acciaio materiale della modernità .....	"	15
1.2. Esostrutture ed endostrutture .....	"	16
1.3. Il Palazzo di Cristallo di Joseph Paxton.....	"	17
1.4. I grattacieli di New York.....	"	18
1.5. Verso il terzo millennio.....	"	19
<b>2. IL PERCORSO NORMATIVO ITALIANO</b> .....	"	20
2.1. Le norme sulle costruzioni civili .....	"	20
2.2. Gli Eurocodici e le NTC08 .....	"	21
2.3. Contenuti degli Eurocodici .....	"	22
2.4. L'Eurocodice 3 .....	"	24
2.5. Stati Limite. Classificazioni.....	"	26
2.6. Stato Limite Ultimo (SLU).....	"	26
2.6.1. Stato limite di salvaguardia della vita (SLV) .....	"	26
2.6.2. Stato limite di prevenzione del collasso (SLC).....	"	27
2.7. Stato Limite di Esercizio (SLE).....	"	27
2.7.1. Stato Limite di operatività (SLO) .....	"	27
2.7.2. Stato limite di danno (SLD) .....	"	27
3.1. L'acciaio e i suoi composti .....	"	28
3.2. Le leghe d'acciaio .....	"	28
<b>3. IL MATERIALE ACCIAIO</b> .....	"	28
3.3. La lega acciaio-carbonio.....	"	29
3.4. Acciai legati .....	"	30
3.5. Acciai non legati .....	"	30
3.6. Acciai basso legati .....	"	30
3.7. Acciai Ex-Ten .....	"	31
3.8. Acciai Cor-Ten.....	"	31
3.9. Acciai per carpenteria .....	"	31
3.10. Acciai inossidabili.....	"	31
3.11. Acciai inossidabili austenitici .....	"	32
3.12. Acciai inossidabili Martensitici .....	"	32

3.13.	Peculiarità degli acciai inossidabili.....	p.	32
3.14.	Influenza dei leganti nell'acciaio .....	"	32
3.15.	Lavorabilità dell'acciaio .....	"	34
3.16.	Trattamenti particolari .....	"	35
4.	<b>IL MATERIALE ACCIAIO</b> .....	"	36
4.1.	Acciai laminati .....	"	36
4.2.	Derivati e prodotti dell'acciaio .....	"	37
4.3.	Gli acciai per saldatura .....	"	37
4.4.	Acciai armonici.....	"	37
5.	<b>ASPETTI COSTITUTIVI</b>		
	<b>DI RESISTENZA DELL'ACCIAIO</b> .....	"	38
5.1.	Prove di qualità sugli acciai .....	"	38
5.2.	Prova a trazione .....	"	38
5.3.	Acciai duttili .....	"	39
5.4.	Acciai duri.....	"	39
5.5.	Prova di durezza.....	"	39
5.6.	Prova di resilienza.....	"	39
5.7.	Prova di fragilità .....	"	40
5.8.	Prova al piegamento.....	"	40
5.9.	Prove di resistenza a fatica.....	"	40
5.10.	Prova di resistenza al fuoco .....	"	40
5.11.	Accettabilità degli acciai.....	"	40
5.12.	Resistenza dichiarata degli acciai .....	"	40
5.13.	Acciai in zona sismica .....	"	41
5.14.	Riferimenti generici di calcolo .....	"	41
6.	<b>ELEMENTI STRUTTURALI IN ACCIAIO</b> .....	"	42
6.1.	Le lamiere .....	"	42
6.2.	Lamiere per manti di copertura.....	"	42
6.3.	Lamiera grecata per solaio.....	"	43
6.4.	Lamiere grecate per pareti esterne.....	"	43
6.5.	Pannelli coibentanti.....	"	43
6.6.	Travi.....	"	44
6.7.	Colonne.....	"	44
6.8.	Colonne semplici .....	"	44
6.9.	Colonne composte.....	"	44
6.10.	Profilati formati a freddo.....	"	45
6.11.	Centri di trasformazione .....	"	45
7.	<b>IL NODO STRUTTURALE</b> .....	"	46
7.1.	Cenni .....	"	46
7.2.	I giunti tesi .....	"	47

7.3.	I giunti compressi.....	p.	48
7.4.	Il nodo di colmo.....	"	49
7.5.	Il nodo colonna-trave.....	"	50
7.6.	Il nodo trave-trave.....	"	50
7.7.	Il nodo trave-arcareccio.....	"	50
7.8.	Unione trave principale.....	"	51
7.9.	Il nodo di fondazione.....	"	51
7.9.	Il nodo d'appoggio.....	"	52
8.	<b>I CONTROVENTI</b> .....	"	53
8.1.	Il sistema di controvento.....	"	53
8.2.	I controventi longitudinali.....	"	54
8.3.	I collegamenti sismo-resistenti.....	"	54
9.	<b>LE UNIONI</b>		
	<b>E I COLLEGAMENTI</b> .....	"	56
9.1.	Le unioni e i collegamenti.....	"	56
9.1.1.	Comportamento dei collegamenti.....	"	56
9.2.	I collegamenti nodali.....	"	58
9.3.	La chiodatura.....	"	59
9.3.1.	Parti e funzioni dei chiodi.....	"	59
9.3.2.	Designazione UNI dei chiodi.....	"	60
9.4.	Le unioni saldate.....	"	60
9.4.1.	La verifica delle saldature.....	"	61
9.5.	Le unioni bullonate.....	"	63
9.5.1.	Tipologia bulloni.....	"	64
9.6.	I connettori a piolo.....	"	65
10.	<b>IL CAPANNONE IN ACCIAIO</b> .....	"	66
10.1.	Cenni.....	"	66
10.2.	Diffusione dei capannoni in acciaio.....	"	67
10.3.	Le coperture metalliche.....	"	67
10.3.1.	Coperture discontinue.....	"	67
10.3.2.	Coperture continue.....	"	67
11.	<b>LA TRAVE RETICOLARE</b> .....	"	69
11.1.	Cinematica della trave reticolare.....	"	69
11.2.	Il principio del triangolo indeformabile.....	"	69
11.3.	La forma a "capriata".....	"	71
11.4.	Le aste.....	"	74
11.5.	I collegamenti.....	"	74
11.6.	Tipologie di travi reticolari in acciaio.....	"	76
11.7.	I nodi canonici.....	"	79
11.8.	Casi speciali.....	"	80

**12. LA TRAVE RETICOLARE PALLADIO**

<b>IN LEGNO E IN ACCIAIO .....</b>	<b>p.</b>	<b>83</b>
12.1. La trave Palladio .....	"	83
12.2. Tipi di capriata in legno .....	"	84
12.3. Gli elementi della Capriata IN LEGNO .....	"	86
12.4. I collegamenti .....	"	87
12.5. La biella .....	"	87
12.6. La catena .....	"	87
12.7. Il monaco .....	"	87
12.8. I controventi .....	"	88
12.9. Il sistema nodo .....	"	88
12.10. La trave Palladio in acciaio .....	"	89

**13. I CODICI DI CALCOLO .....**

13.1. Solutori della trave reticolare .....	"	90
13.2. I metodi grafici .....	"	91
13.3. Il metodo di Cremona .....	"	92
13.4. Il metodo di Ritter .....	"	92
13.5. Esempio di calcolo grafico del Cremona .....	"	99
13.6. I metodi matriciali .....	"	100
13.7. Il metodo matriciale rigido .....	"	101
13.8. Soluzione matriciale della capriata "Palladio" .....	"	102
13.9. Algoritmo per una trave reticolare .....	"	104
13.10. Il metodo matriciale elastico .....	"	109

**14. IL METODO DELL'EQUILIBRIO .....**

14.1. Generalità .....	"	112
14.1.1. Controllo della isostaticità .....	"	113
14.2. Discretizzazione del sistema .....	"	113
14.3. Vettori delle incognite .....	"	114
14.4. Vettori e matrici dei termini noti .....	"	114
14.5. Vettore delle incognite .....	"	116

**15. LE AZIONI AGLI STATI LIMITE .....**

15.1. Generalità .....	"	117
15.2. Azioni sulle strutture .....	"	117
15.3. Azioni agli stati limite .....	"	118
15.3.1. Stato Limite Ultimo SLU .....	"	119
15.3.2. Stato Limite di Esercizio SLE .....	"	119
15.4. Azioni normali del vento .....	"	121
15.4.1. La pressione del vento (p) .....	"	121
15.4.2. La pressione cinetica di riferimento $q_{ref}$ .....	"	122
15.4.3. Il coefficiente di esposizione ( $c_e$ ) .....	"	123
15.4.4. Il coefficiente di esposizione ( $c_e$ ) .....	"	124



15.4.5.	Il coefficiente di topografia ( $c_t$ ) .....	p.	125
15.4.6.	Coefficiente di forma o aerodinamico ( $c_p$ ) .....	"	125
15.4.7.	Il coefficiente di forma per corpi cilindrici .....	"	126
15.4.8.	Azioni tangenziali del vento .....	"	126
15.4.9.	Costruzioni ubicate presso sommità di colline o pendii isolati .....	"	126
15.5.	Azioni della neve .....	"	127
15.5.1.	Carico della neve al suolo .....	"	128
15.5.2.	Coefficienti di forma per il carico neve .....	"	128
15.6.	Azioni trasmesse dagli apparecchi di sollevamento .....	"	129
<b>16.</b>	<b>LE SEZIONI D'ACCIAIO</b> .....	"	130
16.1.	Classificazione delle sezioni agli Stati Limite .....	"	130
16.2.	Classi delle sezioni trasversali .....	"	131
16.3.	Classi e Stati Limite .....	"	131
16.4.	Casi particolari .....	"	133
16.5.	I profili sagomati in acciaio .....	"	133
16.5.1.	Sezioni a doppio T .....	"	133
16.5.2.	Sezione IPE .....	"	134
16.5.3.	Sezione HE .....	"	134
16.5.4.	Sezione INP .....	"	135
16.5.5.	Sezioni a doppio T saldate .....	"	135
16.5.6.	Sezioni a U o a C di tipo UPN .....	"	136
16.5.7.	Sezioni angolari a L .....	"	136
16.5.8.	Sezioni a T .....	"	137
16.5.9.	Sezioni a Z .....	"	138
16.5.10.	Altri profili .....	"	138
16.7.	Area lorda e area netta .....	"	139
16.7.1.	Area lorda .....	"	139
16.7.2.	Area netta .....	"	139
16.8.	I sagomari .....	"	139
16.9.	I coefficienti per le verifiche .....	"	140
<b>17.</b>	<b>IL CALCOLO AGLI STATI LIMITE</b> .....	"	141
17.1.	Le direttive Eurocodice 3 .....	"	141
17.2.	Trazione semplice .....	"	141
17.3.	Flessione semplice .....	"	142
17.4.	Flessione composta .....	"	143
17.5.	Taglio .....	"	144
17.6.	Carico di punta .....	"	144
17.6.1.	Snellezza ( $\lambda$ ) .....	"	145
17.6.2.	Fattore di lunghezza efficace $\beta$ .....	"	146
17.6.3.	Carico critico euleriano .....	"	146
17.6.4.	Verifica di stabilità .....	"	149

17.6.5. Coefficiente riduttivo $\chi$ .....	p.	149
17.7. Esempio n. 1 – Carico limite sezione HEA .....	"	151
17.8. Esempio n. 2 – Carico limite sezione IPE .....	"	153
<b>18. INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE ALLEGATO .....</b>	<b>"</b>	<b>155</b>
18.1. Introduzione.....	"	155
18.2. Requisiti minimi hardware e software .....	"	156
18.3. Download del software e richiesta della password di attivazione.....	"	156
18.4. installazione e attivazione del software .....	"	156
<b>19. IL PROGRAMMA RETICOLARE .....</b>	<b>"</b>	<b>158</b>
19.1. note programma “reticolare” .....	"	158
19.3. manuale d’uso del programma “RETICOLARE” .....	"	161
19.3.1. La barra menu programma RETICOLARE .....	"	161
19.4. Gli Esempi di calcolo.....	"	176
19.4.1. Esempio di calcolo Trave-Ponte.....	"	176

## Premessa

Il presente manuale tratta il calcolo di verifica delle travi reticolari delle capriate metalliche a maglie triangolari di qualunque forma. I calcoli di verifica sono eseguiti in osservanza delle Norme Tecniche per le Costruzioni approvate con il D.M. del 14 gennaio 2008 (NTC08) e dell'Eurocodice 3.

Parte integrante del manuale è il programma **RETICOLARE**, comprendente un modellatore di trave reticolare e una parte dedicata al calcolo dell'arcareccio di copertura, un solutore matriciale sviluppato in Microsoft Excel; un post-calcolo automatizzato per le capriate metalliche di copertura a maglia triangolare tipo Warren, Pratt, Howe, Fink, Polonceau, eccetera. Attraverso il modellatore interattivo è possibile inserire capriate di qualunque forma composte da 50 aste e/o 50 nodi.

Il contenuto del manuale si sviluppa attraverso due premesse:

- La prima, riguarda l'entrata in vigore delle NTC08 che impone al progettista la verifica delle sezioni in acciaio secondo il criterio di sicurezza detto "agli stati limite".
- La seconda premessa è l'evoluzione esponenziale che in questi ultimi decenni ha avuto l'uso del calcolatore elettronico in ambito strutturale. In base a ciò l'ampio materiale letterario scientifico riguardante l'acciaio è stato rivisitato dall'autore secondo la recente normativa e reindirizzato allo sviluppo di un algoritmo di calcolo automatizzato atto a calcolare più schemi di travi reticolari.

L'entrata in vigore delle NTC08 ha rappresentato un momento di svolta nel campo del calcolo strutturale. Con gli Eurocodici è stato mandato definitivamente in pensione il vecchio modello di verifica basato sul criterio di sicurezza detto delle "Tensioni Ammissibili" (in seguito, T.A.). Metodo che per interi decenni ha assunto una notevole importanza dal punto di vista didattico nella preparazione di generazioni di architetti e ingegneri strutturisti. Il metodo di verifica delle sezioni allo Stato Limite, però, non è nuovo. Esso, infatti, è una variante al metodo delle T.A., tant'è vero che i due metodi hanno camminato di pari passo specialmente nelle verifiche delle sezioni in cemento armato.

Nulla invece cambia riguardo i metodi di analisi di equilibrio statico delle capriate. Nella ricerca dell'equilibrio propedeutico per qualunque operazione di verifica, progetto o collaudo delle sezioni, rimangono validi i metodi analitici e grafici della Statica e della Scienza delle Costruzioni. Semmai è cambiato qualcosa con l'avvento dell'informatica, che ai tradizionali metodi analitici e grafici tradizionali "analogici" ha aggiunto moderni metodi di calcolo "digitali". Programmi di calcolo che anche se appaiono fantascientifici rimangono ancorati a vecchi metodi di calcolo basati sull'analisi vettoriale delle forze. La parte riguardante le verifiche in acciaio nelle NTC08 è contenuta nel citato Eurocodice 3 riguardante le strutture in acciaio.

Tale codice basa il suo metodo trattando in modo indipendente i carichi e le resistenze. Tale divisione tra carico e resistenza si esplica attraverso due coefficienti di sicurezza, uno per il carico e uno per il materiale. I carichi, quindi, anche se discendenti ancora dalle masse soggette ad accelerazione di gravità, vengono amplificati o ridotti tramite correttivi che tengono conto di vari aspetti progettuali, rendendoli più compatibili con i vari Stati Limiti raggiungibili dalle strutture.

Stessa sorte tocca al materiale di cui è formata la trave che assume una resistenza variabile che viene fatta dipendere oltre che dal materiale, anche dalla forma e dalle condizioni ambientali. Rispetto alle tensioni ammissibili il calcolo agli Stati Limite risulta per certi versi più laborioso per le numerose e complesse formule che per essere usate richiedono spesso l'uso di un computer.

In pochi decenni i computer hanno rivoluzionato il modo di trattare l'analisi delle strutture per la loro notevole capacità di trattare operazioni di calcolo assieme alla possibilità di rappresentare graficamente il risultato dei calcoli.

Sono già infinite le possibili applicazioni del calcolo "digitale" sulle strutture. Si va dalla soluzione di complicati sistemi di equazioni matriciali con un numero di incognite prima impossibili da calcolare; e grazie alla potenza grafica è possibile captare le tensioni in modo visivo e sonoro. È possibile per così dire "visionare" o "ascoltare" in modo del tutto nuovo lo sforzo fisico compiuto dalle strutture. Un nuovo orizzonte scientifico che richiede una nuova campagna di alfabetizzazione tra i nuovi studenti e i nuovi tecnici. Si pensi, ad esempio nel restauro, all'applicazione laser per il rilievo degli edifici; alla digitalizzazione delle immagini all'infrarosso e all'ultravioletto per lo studio della fatica degli edifici; si considerino i rilevatori termografici per lo studio degli stati di tensione delle travi e delle colonne greche, bizantine e barocche. Oggi è possibile "ascoltare" e "vedere" il comportamento delle strutture. Ma tutto questo progresso scientifico senza un abc, senza una *ratio* che proviene dalla esperienza del progettista non serve a nulla.

In tutto questo progresso ci consola sapere che col passaggio dalle Tensioni Ammissibili agli Stati Limite, l'acciaio è rimasto il materiale isotropo che lavorare in ugual maniera a trazione e a compressione; che il legno è rimasto un materiale anisotropo, con il suo differente comportamento secondo la direzione delle fibre; che la zona tesa del cemento armato è affidata ai ferri; che il segreto per fare stare in piedi la muratura è sempre quello di farlo lavorare a compressione. Eurocodici o informatica che sia, la legge di Hooke è e rimane il punto saldo dello strutturista.

La novità che gli Stati Limite portano rispetto alle T.A. è l'introduzione di due coefficienti di sicurezza, uno per le cause e uno per gli effetti. Uno per le forze e uno per la resistenza del materiale. Il carico che con le T.A. era fisso, adesso con gli S.L. diventa di tipo raro, frequente, istantaneo, fisso, eccetera. Mentre il coefficiente di sicurezza del materiale, anch'esso una volta costante, adesso dipende dalle condizioni ambientali e d'uso. Si pensi al legno i cui coefficienti cambiano a seconda della stagionatura, umidità e frequenza d'uso.

In questo modo, le NTC08, risultano più puntuali rispetto alle T.A., offrendo un mezzo di calcolo più realistico rispetto alle strutture in zona sismica.

La difficoltà principale dell'uso dei nuovi codici agli Stati Limite, semmai, è dovuta alla forma di non immediata comprensione con il quale il legislatore le consegna allo strutturista. Infatti il nuovo metodo passa al principio effetto-causa rispetto a quello che era regolato sul

principio come causa-effetto. Con gli Stati Limite, tra l'altro si passa dal valore unico delle T.A. a quello probabilistico degli S.L..

In termini matematici il problema si chiarisce riflettendo sui legami che intercorrono tra un integrale e una derivata di una funzione. Il problema risiede nelle costanti di integrazione che scompaiono nella derivata e compaiono nell'integrale. Con le T.A. si partiva dal carico e per integrazione si otteneva una e una sola deformata; mentre con gli S.L. si parte dalla deformata per arrivare al carico probabile. Se con le tensioni ammissibili, quindi, il problema si risolveva in "dato un carico trovare l'unica deformazione possibile", adesso, con gli S.L., il problema si trasforma in "assegnata una deformata, determinare per quale probabile dominio di carico è resa possibile quella deformazione".

Un altro problema dell'acciaio è quello rappresentato dalla grande quantità di norme UNI per regolare le vaste applicazioni in ingegneria civile, aereo spaziale, militare e meccanica.

Per tali motivi, il professionista, anche di fronte a una semplice trave reticolare di copertura, si trova di fronte a una enorme quantità di norme, studi e ricerche in merito.

Ad esempio, per l'acciaio esistono norme per i nodi che altri materiali come il cemento armato e la muratura non contemplano. Nell'acciaio, come pure nel legno, il problema del nodo invece è importantissimo e complesso più dell'asta stessa. Cosa che si complica se si pensa che i nodi possono essere di tipo saldati, bullonati o ribattuti.

Da queste premesse, si capisce bene come anche il semplice studio di una capriata in acciaio comporti un faticoso e impegnativo lavoro di scremazione di tutto il materiale scientifico disponibile.

Col presente manuale sulle capriate e col programma **RETICOLARE**, l'autore raggiunge due fondamentali obiettivi. Il primo è quello di scremare il tanto materiale esistente attorno al materiale acciaio, proponendo delle linee guida ragionate sul calcolo delle capriate e le sezioni in acciaio secondo le norme italiane sull'acciaio: le NTC08 e l'Eurocodice 3. Il secondo obiettivo raggiunto è quello di rendere praticabile attraverso un algoritmo di calcolo interattivo al computer, quanto c'è di teorico sull'acciaio. Dalle due premesse nasce il programma **RETICOLARE**. Un programma ma anche uno strumento di studio che affronta il problema a "domino" delle capriate, un programma interattivo che attraverso i dati forniti dell'utente esegue il calcolo in modo automatico fino al raggiungimento della soluzione desiderata.

*L'Autore*



## Capitolo 1

# Sviluppo delle costruzioni in acciaio

### 1.1. ACCIAIO MATERIALE DELLA MODERNITÀ

In principio il ferro è stato ricavato e lavorato in modo isolato, direttamente dai giacimenti ferrosi ricorrendo al calore dei forni. Con l'introduzione degli altoforni si cominciò a fondere la ghisa che aveva un basso punto di fusione. Successivamente coi forni moderni a riverbero introdotti da Cort nel 1784 si riuscì ad ottenere ferro ma non di elevata qualità. La grande produzione industriale siderurgica, soprattutto ferroviaria, si consolidò con il sistema Cort. Il progresso maggiore si ebbe con l'invenzione del convertitore di forma speciale a rivestimento siliceo di Bessemer e soprattutto con il processo Thomas.

Grazie all'intuizione di alcuni architetti e ingegneri, le massime espressioni di prodotti in acciaio si ebbero e si sviluppano in un periodo piuttosto recente che si fa risalire alle prime ferrovie, ponti e navi in ferro. Nel XIX secolo si cominciarono a costruire magazzini e padiglioni per le Esposizioni Universali in ferro e vetro. A Parigi A.G. Eiffel e L.A. Boileau costruiscono nel 1876 il primo grande magazzino composto da ferro e vetro, l'"Au Bon Marché". Sempre a Parigi, Paul Sedille (1836-1900) realizza nel 1882 l'edificio dei magazzini Printemps composto da armatura in ferro.

Per la prima Esposizione Universale di Londra del 1851, viene costruito il Palazzo di Cristallo (Crystal Palace) di Joseph Paxton (1801-65) considerata una pietra miliare nella storia della tecnologia degli edifici modulari in ferro.

La prima ardita costruzione in metallo e vetro fu una manifatturiera per il cotone di sette piani con elementi di ghisa prefabbricati, lunga 420 metri, larga 115 e alta 48, progettata dall'architetto Duter (1845-1906) con la collaborazione degli ingegneri Contamin costruisce nel 1801 a Birmingham.

Verso la meta del XIX secolo gli imprenditori delle ferriere realizzano case prefabbricate in metallo da destinare smontate e poi da montare in luogo agli emigranti d'America e d'Australia. La torre Eiffel fu il primo edificio con scheletro in acciaio e riempimento in pannelli di cotto colorato; la torre poggia su piloni di pietra che furono un ponte sulla Marna. Altro esempio, la fabbrica di cioccolato Meunier a Noisiel-sur-Marne, realizzata nel 1873 da Jules Saulnier (1828-1900). Henri Labrouste (1801-75) nella biblioteca Sainte-Genevieve a Parigi (1843-50) utilizzò armature in ghisa e ferro battuto per la prima volta in un edificio pubblico. L'architetto statunitense Bogardus (1808-74), sviluppo in America una tecnica edilizia innovativa utilizzando, al posto dei muri portanti esterni, scheletri in acciaio, ghisa, ferro fuso che svolgevano funzione strutturale e decorativa. La sede da lui costruita nel 1848 per la sua fabbrica di New York fu il primo edificio in cui le pareti esterne in muratura furono sostituite da pilastri metallici a sostegno dei vari piani. Nel 1853, per la prima Esposizione Universale di New York, Bogardus progettò una straordinaria arena fabbricata in ghisa, del diametro di

360 metri, con copertura in lamiera ancorata a una torre centrale di 90 metri. Hittorf (1793-1867) progettò la Gare du Nord realizzata nel 1861-65. Fra i primi ponti metallici quello in ghisa Koalbrookdale sul Severn. Agli inizi lo sfruttamento di questo materiale era indirizzato verso la realizzazione di singoli elementi strutturali soggetti a sforzi di trazione (tiranti); il sistematico uso di elementi in ghisa per la totalità della costruzione prese corpo solo recentemente alla prima metà del Novecento. L'ascesa dell'acciaio sulla ghisa ebbe inizio solo dopo che l'acciaio si rivelò in grado di sostenere, con maggiore sicurezza rispetto alla ghisa gli sforzi di flessione. Dal 1860 comincia a diffondersi l'uso dell'acciaio. Esempio rilevante delle possibilità di questo nuovo materiale è rappresentato dal ponte Britannia progettato da Stephenson, realizzato con trave continua su 5 appoggi, con campate centrali di 144 m e laterali di 74 m. Altro ponte con schema a trave continua fu il Conway progettato da Fairbairn, con 4 appoggi. Per superare i vincoli imposti dai tracciati ferroviari, furono progettati alcuni ponti che adottavano l'ardito schema statico dell'arco reticolare. Esempi di tale schema costruttivo sono il ponte di Eiffel e quelli ferroviari sul Douro (Portogallo, 1875) e di Garabit sulla Truyere (1880) con una campata di 165 metri. Ancor più innovativi risulteranno essere i ponti sospesi. Il primo ponte sospeso in ferro fu costruito in Pennsylvania da James Finley (1808); nel 1819-26 fu realizzato il ponte sospeso a catene sullo stretto di Menai nel Galles (177 m di luce). Completano l'era dei ponti in acciaio il ponte di Brooklyn a New York e il Golden Gate di San Francisco. Il Garante Building realizzato nel 1895 da L. Sullivan, esponente della *Scuola di Chicago*, sancisce l'uso dell'acciaio su scala industriale. W. Gropius nella Fabbrica Fagus, Alfred an der Leine (1911) rinnova il concetto di facciata realizzando prospetti in acciaio e vetro e nei rapporti tra facciata e struttura avviando il percorso estetico della cosiddetta estetica industriale del Werkbund.

Il primo ponte costruito interamente in acciaio fu il Forth Bridge in Gran Bretagna tra il 1883 e il 1890. La grande quantità di acciaio necessario fu disponibile grazie al processo Martin-Siemens sviluppato nel 1875 che produceva acciaio di uniforme qualità. Per la realizzazione del ponte che lega le sponde tra Inchgarvie e Fife nella città di Edimburgo in Scozia furono necessarie 64.800 tonnellate di acciaio fornite da due acciaierie in Scozia e in Galles.



**Figura 1.1.** Veduta del ponte Forth Bridge

## 1.2. ESOSTRUTTURE ED ENDOSTRUTTURE

L'acciaio si dimostra un materiale molto versatile, che si adatta alla realizzazione di telai a supporto di infrastrutture, ponti ferroviari, scheletri di edifici, tralicci di sostegno, opere di



architettura e ingegneria. Sul finire del XIX tra gli esempi principali di ingegneria applicata alle costruzioni in acciaio, spiccano le due opere dell'ingegnere Eiffel: la torre Eiffel di Parigi e la Statua della Libertà di New York. Entrambi mostrarono al mondo intero le vaste possibilità costruttive dell'acciaio attraverso la realizzazione di opere con strutture portanti esterne e interne.

La torre Eiffel rappresenta l'esempio più conosciuto di struttura metallica portante esterna a reggere le infrastrutture interne. Tale concetto fa appartenere tale costruzione alla categoria delle endo-strutture, cioè a quel genere di strutture con supporto scheletrico esterno lasciato "a vista"; figurativamente paragonabile in natura all'azione portante della corazza scheletrica esterna dei coleotteri.

Oltre l'oceano, nel 1879, l'ingegnere Eiffel, che all'epoca dirigeva uno studio di ingegneria civile specializzata nella costruzione di architetture in acciaio, rivoluzionò il progetto dell'armatura interna per la Statua della Libertà di New York. L'opera dell'ingegnere Eiffel rappresenta per il Nuovo Mondo, l'esempio più conosciuto di costruzione artistica con struttura portante metallica interna. Tale opera appartiene al genere delle eso-strutture, Ovvero, a quelle opere realizzate con sistema portante metallico interno. Figurativamente paragonabile alla struttura scheletrica interna del corpo umano.



**Figura 1.2.** Particolare della struttura di base della Torre di G. Eiffel

### 1.3. IL PALAZZO DI CRISTALLO DI JOSEPH PAXTON

Un altro importante esempio di applicazione dell'acciaio nelle costruzioni civili che verrà poi imitato in tutta Europa è il Crystal Palace di Joseph Paxton, punto di riferimento importante per l'avvio della produzione di edifici in acciaio e vetro in serie di tutto il mondo. Tale costruzione diede inizio alle moderne strutture del Nuovo XX Secolo. Vasto campionario di applicazioni di questo modello furono le Fiere Internazionali che si svolsero nel secolo scorso in tutta Europa, tra le quali anche quella di Palermo del 1891 dove gli stand in ferro, ghisa, acciaio e vetro fecero la loro comparsa caratterizzando l'architettura Liberty. Il Crystal Palace (Palazzo di Cristallo), prototipo di questo nuovo tipo di costruire, fu realizzato a Londra in stile vittoriano per ospitare nel 1851 la I Esposizione Universale, il Palazzo, installato a Hyde Park, doveva poi essere smontato e ricostruito in un'altra zona della città, a Sydenham Hill,

l'anno seguente, nel 1852. Si trattò di uno degli esempi più celebri di architettura del ferro fonte ispiratrice della serie di costruzione in acciaio. Sorto su un terreno di diversi ettari, fu il cuore della mostra. A proporre i progetti di maggiore successo furono il francese Hector Ho-reau e l'irlandese Richard Turner. Entrambi pianificarono un edificio costruito interamente in ferro e vetro. Tutti gli altri progetti proposti per questa prima edizione del concorso erano stati considerati irrealizzabili. Il maggior problema consisteva appunto nell'impossibilità di riutilizzare gli elementi prefabbricati dopo lo smontaggio e il rimontaggio dell'edificio. Il comitato responsabile decise allora di realizzare un semplice progetto base da fare sviluppare ulteriormente da altri architetti. Fu Joseph Paxton, allora famoso costruttore di serre, a fornire la variante vincente del progetto consistente in un metodo che prometteva la costruzione più rapida in soli quattro mesi.

#### » 1.4. I GRATTACIELI DI NEW YORK

L'acciaio conquista subito il modo di costruire gli edifici d'America per le sue straordinarie possibilità di svilupparsi in altezza. Nel 1958 a New York City, l'architetto tedesco Ludwig Mies van der Rohe in collaborazione con l'americano Philip Johnson realizza il Seagram Building. Si tratta di un grattacielo ubicato al n. 375 di Park Avenue, tra la cinquantaduesima Strada e la cinquantatreesima Strada, nella Midtown Manhattan.



**Figura 1.3.** *Mies Van de Rohe. Seagram Building – New York, 1958*

L'edificio, fu la prima alta costruzione con pareti esterne perfettamente verticali. È alto 156,9 metri e composto da 38 piani. Il parallelepipedo d'acciaio rappresenta uno dei più

splendidi esempi di estetica del Funzionalismo e uno dei capolavori del Movimento Moderno. Fu progettato come quartier generale delle distillerie Canadesi Joseph E. Seagram's & Sons, l'edificio fu realizzato grazie all'intuito di Phyllis Lambert, figlia di Samuel Bronfman, direttore generale del Seagram. La costruzione ebbe un enorme impatto sull'architettura Americana e sul gusto del Movimento Moderno. Nel suo complesso questo edificio poté considerarsi un'apoteosi dell'acciaio e del vetro. Una delle caratteristiche principali dello stile di Mies fu l'espressività esterna della struttura attraverso gli elementi strutturali che secondo il pensiero di Ludwig Mies van der Rohe furono lasciati "a vista" e dovevano riflettere il paesaggio circostante. Una opera dove la pesantezza della pietra mista alla foratura del Gotico trovarono perfetta simbiosi e spirito di realizzazione nel New Deal americano dell'Era moderna contemporanea.

### 1.5. VERSO IL TERZO MILLENNIO

All'inizio e per tutto il Novecento per l'acciaio è un periodo di studi che daranno vita a opere d'ingegneria "mature". Vengono studiate le prime applicazioni di strutture tridimensionali e si assiste alla realizzazione delle travi reticolari spaziali in acciaio di B. Fuller e K. Wachsmann. Strutture caratterizzate da versatilità e modularità, che consentiranno la realizzazione di opere effimere, smontabili o semoventi. Differenti risultati si hanno secondo le varie scuole degli anni '80, dove l'acciaio è trattato per creare singoli pezzi prefabbricati con ogni elemento che vive di vita propria all'interno di un insieme strutturale complesso. Negli anni '90 nascono i primi personal computer che rivoluzioneranno il modo di controllare i processi "statici" attraverso la prototipazione virtuale capace di animare in 3D interi organismi strutturali.

Le applicazioni più ardite ed esasperate in materia di strutture in acciaio si hanno oggi nelle applicazioni navale e aerospaziale. Grazie alla ricerca industriale verso nuove leghe, alle innovazioni tecnologiche, alla ricerca scientifica, e al riciclo al 100% del ferro, fanno dell'acciaio uno dei materiali più futuribili.



**Figura 1.4.** Pallone a struttura geodetica e piattaforma di lancio del Columbia