

# PROGETTAZIONE DI STRUTTURE IN ACCIAIO

con le nuove Norme Tecniche e gli Eurocodici:  
basi concettuali ed esempi di calcolo

Stefania Arangio, Francesca Bucchi, Franco Bontempi

Stefania Arangio, Francesca Bucchi, Franco Bontempi

PROGETTAZIONE DI STRUTTURE IN ACCIAIO

ISBN 978-88-579-0032-2

©2010 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686 - fax 091525738

[www.darioflaccovio.it](http://www.darioflaccovio.it) [info@darioflaccovio.it](mailto:info@darioflaccovio.it)

Prima edizione: giugno 2010

Progettazione di strutture in acciaio : con le nuove norme tecniche e gli eurocodici : basi concettuali ed esempi di calcolo / a cura di Stefania Arangio, Francesca Bucchi, Franco Bontempi. - Palermo : D. Flaccovio, 2010.

ISBN 978-88-579-0032-2

1. Strutture in acciaio. I. Arangio, Stefania <1977->. II. Bucchi, Francesca III. Bontempi, Franco <1963->.

624.1821 CDD-22

SBN Pal0226574

*CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"*

In copertina: **Padova, complesso "Net Center"**

Committente: **Progetto Acciaio srl e NET srl**

Progetto architettonico: **Aurelio Galfetti con Carola Barchi e AU Studio Architetturaurbanistica**

Progetto strutturale: **SPC srl**

Costrutture metallico: **Stahlbau Pichler srl**

Carpenteria leggera e serramenti: **Somec spa**

Impresa: **Edilbasso spa**

Foto: **Oskar da Riz**

*Una pubblicazione redatta da:*



Fondazione Promozione Acciaio

Viale Abruzzi, 68

20131 Milano - Italia

Tel. 02.86313020

Fax. 02.86313031

[www.promozioneacciaio.it](http://www.promozioneacciaio.it)

*Autori:*

Stefania Arangio

Francesca Bucchi

Franco Bontempi

Un particolare ringraziamento va a tutti i Soci di Fondazione Promozione Acciaio



## Indice

Prefazione	XIII
Premessa	XV
<b>1. Sicurezza e prestazioni delle costruzioni in acciaio</b>	<b>1</b>
1.1. Il processo di progettazione di una struttura in acciaio	2
1.2. Sistema strutturale, componenti e collegamenti	4
1.3. Requisiti strutturali	5
1.4. Criteri di progettazione	7
1.5. Progettazione prestazionale e prescrittiva	8
1.6. Gestione della qualità	9
<b>2. Comportamento e modellazione delle strutture in acciaio</b>	<b>13</b>
2.1. Caratteristiche dell'acciaio	14
2.2. Classificazione e denominazione	15
2.3. Modello di calcolo dell'acciaio	16
2.4. Morfologia degli elementi strutturali	17
2.5. Introduzione al processo di modellazione strutturale	21
<b>3. Quadro normativo e criteri di verifica</b>	<b>25</b>
3.1. Quadro normativo europeo e nazionale	26
3.2. Gli Eurocodici strutturali	28
3.3. Struttura degli Eurocodici	30
3.4. Le Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni	31
3.5. Valutazione della sicurezza	32
3.5.1. Azioni sulle costruzioni: classificazione e descrizione in termini statistici	33
3.5.2. Valutazione della capacità portante	35
3.5.3. Verifiche di sicurezza: metodo semiprobabilistico ai coefficienti parziali	36
3.6. Stati limite e combinazione delle azioni	37
3.6.1. Azioni di calcolo agli stati limite ultimi	38
3.6.2. Resistenze di calcolo agli stati limite ultimi	40
3.6.3. Azioni di calcolo agli stati limite di esercizio	41
3.6.4. Verifiche agli stati limite di esercizio	42
<b>4. Azioni sulle costruzioni</b>	<b>43</b>
4.1. Premessa	44
4.2. Carichi permanenti	44
4.3. Azioni antropiche	46
4.3.1. Carichi antropici – Eurocodice 1	47
4.3.2. Carichi antropici – Nuove norme tecniche (NTC 2008)	49
4.4. Azioni naturali: carico della neve	50
4.4.1. Carico della neve – Eurocodice 1	51
4.4.2. Carico della neve – Nuove Norme Tecniche 2008	55
4.5. Azioni naturali: azioni dovute al vento	58

4.5.1. Azioni del vento – Eurocodice 1	59
4.5.2. Azioni del vento – Nuove Norme Tecniche 2008	75
<b>5. Risposta delle costruzioni in acciaio e verifica degli elementi strutturali</b>	<b>87</b>
5.1. Livelli di verifica delle membrature	88
5.2. Classificazione delle sezioni	91
5.3. Resistenze di progetto	95
5.4. Verifiche di resistenza agli stati limite ultimi	95
5.4.1. Verifica a flessione – EC3 e NTC 2008	96
5.4.2. Verifica a taglio – EC3 e NTC 2008	98
5.4.3. Verifica a trazione – EC3 e NTC 2008	101
5.4.4. Verifica a compressione – EC3 e NTC 2008	105
5.4.5. Verifica a presso o tensoflessione – EC3 e NTC 2008	108
5.4.6. Verifica di instabilità a compressione – EC3 e NTC 2008	118
5.4.7. Verifica di instabilità a presso-flessione – EC3 e CNR 10011	122
5.5. Verifiche agli stati limite di esercizio	128
5.5.1. Verifiche sugli spostamenti verticali – EC3 e NTC 2008	128
5.5.2. Verifiche sugli spostamenti laterali – EC3 e NTC 2008	131
5.5.3. Stato limite di vibrazioni – EC3 e NTC 2008	133
<b>6. ESEMPIO 1:</b>	
<b>Dimensionamento di una struttura a ritti pendolari utilizzando gli Eurocodici</b>	<b>135</b>
6.1. Premessa	136
6.2. Schemi statici	138
6.3. Analisi dei carichi	139
6.4. Progettazione del solaio	139
6.4.1. Dimensionamento e verifica del solaio di copertura	141
6.4.2. Dimensionamento e verifica del solaio di interpiano	144
6.5. Progettazione delle travi secondarie	146
6.5.1. Dimensionamento e verifica della trave secondaria interna	147
6.5.2. Dimensionamento e verifica della trave secondaria di bordo	151
6.6. Progettazione delle travi principali	154
6.6.1. Dimensionamento e verifica della trave principale interna	154
6.6.2. Dimensionamento e verifica della trave principale di bordo	159
6.7. Progettazione dei controventi verticali	165
6.7.1. Dimensionamento e verifica dei controventi per vento in direzione X	165
6.7.2. Dimensionamento e verifica dei controventi per vento in direzione Y	171
6.8. Dimensionamento e verifica delle colonne	176
6.9. Sintesi dei risultati ottenuti utilizzando gli Eurocodici	185
<b>7. Esempio 2:</b>	
<b>Dimensionamento di una struttura a ritti pendolari utilizzando le NTC 2008</b>	<b>187</b>
7.1. Premessa	188
7.2. Schemi statici	190
7.3. Analisi dei carichi	191

<b>7.4. Progettazione del solaio</b>	191
7.4.1. Dimensionamento e verifica del solaio di copertura	193
7.4.2. Dimensionamento e verifica del solaio di interpiano	196
<b>7.5. Progettazione delle travi secondarie</b>	198
7.5.1. Dimensionamento e verifica della trave secondaria interna	199
7.5.2. Dimensionamento e verifica della trave secondaria di bordo	203
<b>7.6. Progettazione delle travi principali</b>	207
7.6.1. Dimensionamento e verifica della trave principale interna	207
7.6.2. Dimensionamento e verifica della trave principale di bordo	212
<b>7.7. Progettazione dei controventi verticali</b>	217
7.7.1. Dimensionamento e verifica dei controventi per vento in direzione X	218
7.7.2. Dimensionamento e verifica dei controventi per vento in direzione Y	223
<b>7.8. Dimensionamento e verifica delle colonne</b>	228
<b>7.9. Sintesi dei risultati ottenuti utilizzando le NTC 2008</b>	237
<b>8. Confronti e conclusioni</b>	239
8.1. Premessa	240
8.2. Valutazione della domanda	240
8.3. Valutazione della capacità	242
8.4. Dimensionamento degli elementi strutturali	243
8.5. Sintesi dei risultati	244
<b>APPENDICI</b>	
<b>Prodotti in acciaio per le costruzioni</b>	245
<b>A1. Sistemi di designazione degli acciai</b>	246
<b>A2. Profili laminati</b>	250
A2.1. Prodotti lunghi – sagomario	250
A2.2. Prodotti cavi – sagomario	272
A2.3. Laminati mercantili	298
A2.4. Altri prodotti laminati	299
<b>A3. Lamiere e pannelli</b>	301
A3.1. Lamiera	301
A3.2. Lamiere grecate	302
A3.3. Lamiere per supporti e rivestimenti	303
A3.4. Pannelli metallici precoibentati	307
A3.5. Normativa di riferimento	309
<b>A4. La protezione mediante zincatura a caldo</b>	309
A4.1. Il processo di zincatura a caldo	309
<b>Bibliografia</b>	313

## Prefazione

Il presente volume è il primo di una serie di manuali, dedicati alla progettazione e costruzione in acciaio, che Fondazione Promozione Acciaio ha in programma di proporre come nuova iniziativa editoriale per l'anno 2010.

Il progetto è finalizzato a completare il supporto tecnico già offerto agli operatori di mercato da altre monografie pubblicate dalla Fondazione (consultare il sito: [www.promozioneacciaio.it](http://www.promozioneacciaio.it)), realizzando una collana di manuali, curati da esperti di settore, che si contraddistinguono per snellezza e praticità, utili sia per la pratica professionale che per un primo approccio alle soluzioni costruttive in acciaio da parte di studenti delle facoltà di ingegneria e di architettura.

A fronte dei recenti sviluppi del quadro normativo nazionale, riteniamo utile presentare un primo volume che affronti l'impostazione della progettazione delle verifiche prestazionali e di sicurezza per le costruzioni in acciaio secondo le nuove norme tecniche e gli eurocodici strutturali, proponendosi come un utile compendio per comprendere il corretto utilizzo delle nuove normative.

Fondazione Promozione Acciaio è sostenuta dai maggiori produttori d'acciaio italiani ed europei e da altri importanti rappresentanti della filiera tra cui trasformatori, centri di servizio e costruttori metallici, uniti dallo scopo di promuovere l'impiego di acciaio nelle costruzioni ed infrastrutture.

Il progetto della Fondazione è quello di mettere al servizio degli operatori del settore delle costruzioni italiano gli investimenti dei propri soci, sviluppando un'azione costante di comunicazione, informazione e supporto verso professionisti, studenti universitari, committenti pubblici e privati sulle possibilità e i vantaggi delle soluzioni in acciaio.

Nascono così numerosi progetti di iniziative culturali e di insegnamento dedicati al mondo accademico e dei professionisti, che vanno dall'organizzazione di convegni e corsi formativi, alla realizzazione di diverse iniziative editoriali, di cui il presente volume è una significativa testimonianza.

In questa fase di aggiornamenti a livello normativo e di maggiore attenzione del mondo delle costruzioni verso la sicurezza e la qualità costruttiva, auspichiamo che questo volume e gli altri che seguiranno possano contribuire significativamente a una maggiore conoscenza delle opere in acciaio, capaci di distinguersi per gli elevati standard qualitativi offerti, oltre che per altri importanti pregi: la sostenibilità ambientale, la rispondenza a requisiti di antisismicità, la funzionalità, le potenzialità architettoniche, la rapidità costruttiva e la semplicità di messa in opera.

Un particolare ringraziamento va, da parte di Fondazione Promozione Acciaio e dei propri associati, agli autori del volume, ing. Stefania Arangio, ing. Francesca Bucchi, prof. ing. Franco Bontempi e all'Università La Sapienza di Roma.

Luca Mandirola  
Coordinatore  
Fondazione Promozione Acciaio

## Premessa

Il presente volume affronta l'impostazione della progettazione e delle verifiche prestazionali e di sicurezza per le costruzioni in acciaio secondo le nuove norme tecniche e gli eurocodici strutturali. A una prima lettura, le normative europee e ora la normativa nazionale potrebbero sembrare piuttosto complesse e a volte poco intuitive ma una volta fatti propri i concetti di base e chiarite le procedure di calcolo, ci si rende conto che il loro utilizzo è meno difficile di quello che può sembrare.

Il presente testo propone un approccio elementare ma innovativo adatto a superare le difficoltà legate a un primo utilizzo delle normative. Tale impostazione è stata concretizzata in una serie di diagrammi di flusso che sintetizzano in forma ordinata le procedure di calcolo delle azioni sulle costruzioni e le verifiche degli elementi strutturali in acciaio.

Per familiarizzare con le normative è inoltre importante svolgere dei calcoli a mano. A questo proposito, nella parte applicativa del volume sono riportati nel dettaglio i calcoli relativi al dimensionamento di un edificio multipiano in acciaio. Si fa comunque notare che in questa sede gli argomenti sono presentati in forma elementare e richiedono studi e approfondimenti successivi.

I contenuti del presente testo sono destinati sia a studenti delle facoltà di Ingegneria e Architettura sia ai tecnici professionisti che vogliono aggiornare le proprie competenze.

Il volume è articolato in otto capitoli e una appendice.

Nel primo capitolo si parla della sicurezza e delle prestazioni delle strutture in acciaio. Dopo aver presentato brevemente e in forma idealizzata il processo di progettazione di una struttura in acciaio, sono introdotti i principali requisiti strutturali e i criteri di progettazione volti al loro ottenimento.

Nel secondo capitolo vengono proposte considerazioni riguardo al comportamento delle strutture in acciaio e alle modalità di modellazione del materiale e dell'organismo strutturale. In questo capitolo è anche brevemente introdotta la struttura che viene poi calcolata nel dettaglio nei capitoli 6 e 7.

Nel terzo capitolo viene introdotto il quadro normativo tecnico europeo e nazionale. In particolare si illustrano brevemente i contenuti dei codici utilizzati per i calcoli successivi: gli eurocodici strutturali (UNI EN 1990 – 1991 – 1993) e le nuove norme tecniche nazionali (D.M. 14/01/2008). È richiamato l'approccio semiprobabilistico alle verifiche di sicurezza adottato in entrambi i codici.

Nel quarto capitolo sono presentate le procedure di calcolo proposte dagli eurocodici e dalle nuove norme tecniche per il calcolo delle azioni sulle strutture. Le procedure sono applicate per il calcolo delle azioni antropiche e ambientali agenti sull'edificio considerato.

Nel capitolo 5 sono introdotti i diversi livelli di verifica delle membrature e successivamente vengono presentate nel dettaglio le varie verifiche di sicurezza. Per rendere più chiaro ed operativo il processo di verifica, le varie procedure sono state schematizzate tramite diagrammi di flusso. Gli autori ritengono che questo modo di proporre i procedimenti di verifica sia quello più efficace ed efficiente, vista la relativa complessità del quadro normativo (si veda *Manuale di Progettazione strutturale*, 2008).

Nei capitoli 6 e 7 vengono presentate due applicazioni: lo stesso edificio viene calcolato utilizzando gli eurocodici strutturali e le nuove norme tecniche. Gli sviluppi logici e i vari passaggi numerici sono presentati nel dettaglio per permettere al lettore di seguire passo passo il dimensionamento e la verifica dei vari elementi strutturali.

Infine, nel capitolo 8, sono confrontati i risultati ottenuti con i due codici normativi in termini di valutazione della domanda (calcolo delle azioni e valutazione dei coefficienti di sicurezza) e della capacità (resistenze di progetto) e considerando le dimensioni dei vari elementi strutturali.

Si ringraziano tutti coloro che hanno contribuito alla realizzazione di questo testo: in particolare il dott. Luca Mandirola e l'ing. Monica Antinori della Fondazione Promozione Acciaio.

Gli autori  
Stefania Arangio, Francesca Bucchi, Franco Bontempi

1

# Sicurezza e prestazioni delle costruzioni in acciaio

## 1.1. Il processo di progettazione di una struttura in acciaio

Per definire quali sono i principi che governano il processo di progettazione di una struttura prima di tutto è necessario specificare cosa si intende con il termine "struttura". Una definizione semplice potrebbe essere "insieme di elementi in grado di sopportare le azioni applicate e di trasmetterle al suolo". Una definizione di questo tipo risulta però piuttosto vaga: infatti non spiega cosa effettivamente caratterizzi una struttura e conseguentemente non aiuta ad inquadrare quali siano i fattori da considerare nella progettazione strutturale.

Nella realtà il concetto di struttura è legato ad aspetti più complessi e articolati; per esempio è necessario considerare che:

- una struttura è un *oggetto fisico reale*;
- una struttura è un oggetto complesso che funziona come un *sistema*: non ha senso considerare solo i vari elementi separatamente;
- una struttura non è quindi un puro assemblaggio di elementi: è proprio l'*organizzazione delle relazioni funzionali* fra gli elementi che conferisce alla struttura il carattere di interezza.

Alla luce delle considerazioni sopra esposte la definizione di struttura data deve essere più completa; ad esempio una struttura è una "entità fisica composta da elementi strutturali diversi interrelati da una organizzazione che le conferisce un carattere di sistema".

In questa definizione sono messi in evidenza diversi fattori che caratterizzano i problemi strutturali ma manca ancora un aspetto caratteristico legato alle situazioni reali: è necessario infatti considerare che una struttura è sempre inserita in un *ambiente di progetto* che necessariamente ha un ruolo fondamentale nella determinazione delle sue caratteristiche.

In definitiva, a partire dalla definizione più generale di *sistema* che è quella di "complesso di elementi che interagiscono tra loro e con l'ambiente" ci si rende conto che l'approccio progettuale moderno deve passare dall'analisi della *struttura* (intesa come costituita da elementi che interagiscono tra di loro) a quella del *sistema strutturale* (elementi che interagiscono tra di loro e con l'ambiente).

Nel caso di sistemi strutturali a scheletro portante in acciaio il processo di progettazione strutturale può essere schematizzato attraverso il diagramma di flusso in figura 1.1.

Dopo aver definito la tipologia di materiale e la geometria dell'opera il processo di progettazione si snoda attraverso le seguenti fasi.

- inizialmente vengono scelti *modelli* adeguati del materiale, della struttura e delle azioni;
- successivamente viene effettuato un primo *dimensionamento* degli elementi strutturali; per questa fase vengono generalmente utilizzate regole pratiche e conoscenze acquisite e si ottiene dunque il cosiddetto predimensionamento;
- la fase successiva è quella dell'*analisi strutturale*: in questa fase sono definite le possibili combinazioni delle azioni di progetto e vengono valutati gli effetti sulla struttura; nel caso di edifici questi vengono generalmente valutati in termini di

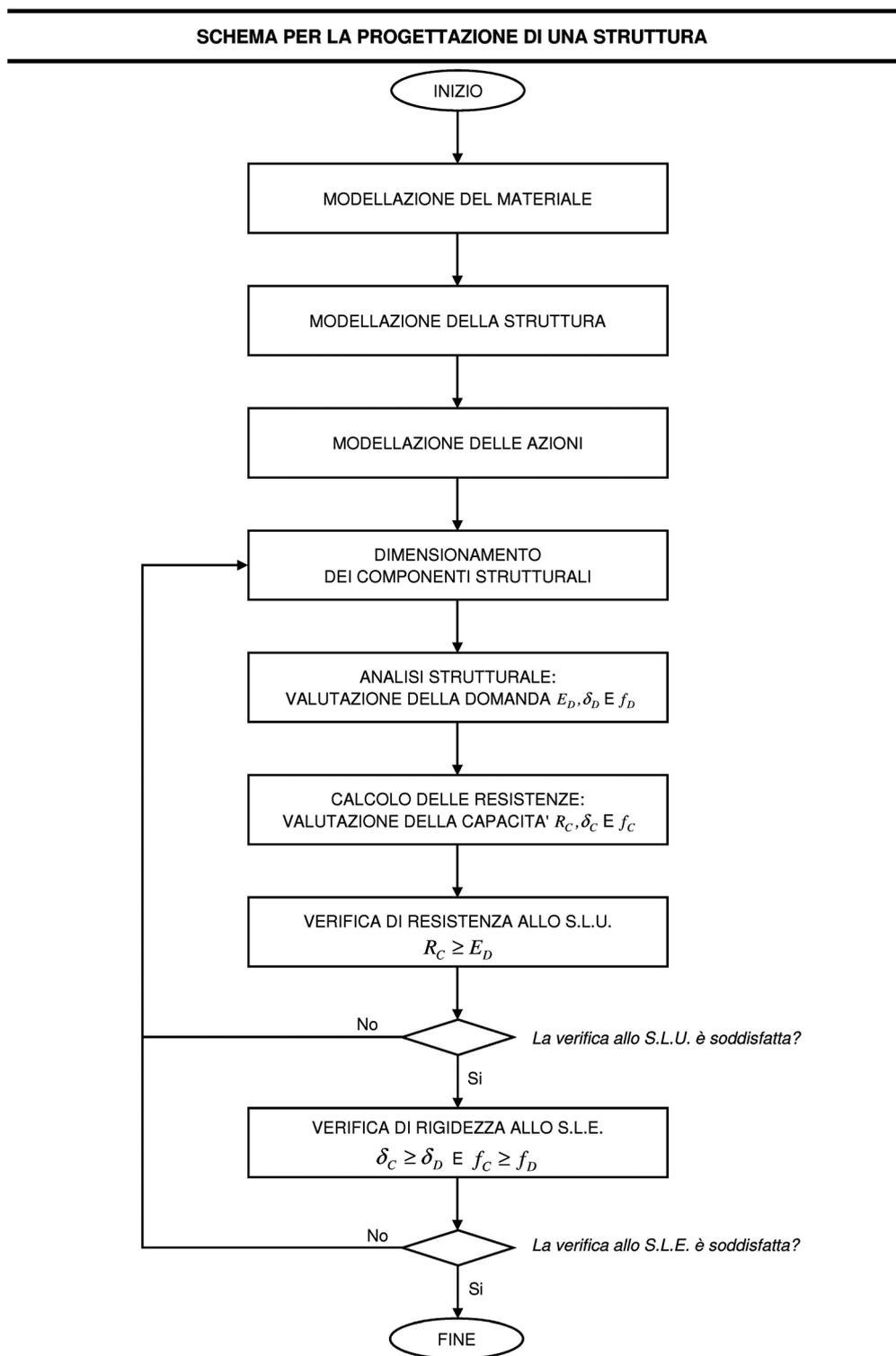


Figura 1.1 - Processo di progettazione di una struttura in acciaio

4

sollecitazioni sugli elementi strutturali  $E_D$ , di spostamenti  $\delta_D$  e di frequenze di vibrazione dei solai  $f_D$ ; in definitiva, l'analisi strutturale permette di valutare la *domanda*  $D$  di una struttura, ossia  $E_D$ ,  $\delta_D$ ,  $f_D$  sulla base del materiale da costruzione, della geometria e delle azioni applicate;

- una volta definita la domanda è necessario valutare la *capacità*  $C$  della struttura: questa viene valutata in termini di resistenza  $R_C$ , di spostamento limite  $\delta_C$  e di frequenza di vibrazione minima  $f_C$ ;
- i due passi successivi riportati in figura 1.1 riguardano il processo di verifica: per ognuna delle prestazioni considerate la capacità della struttura deve essere maggiore o al più uguale alla domanda:

$$C \geq D$$

La prima verifica in termini di *resistenza* della struttura è allo stato limite ultimo: consiste nel verificare che le sollecitazioni resistenti  $R_C$  siano maggiori delle sollecitazioni agenti  $E_D$ . Il concetto di stato limite e i relativi formati di verifica sono approfonditi nel capitolo 3:

$$R_C \geq E_D$$

La seconda parte delle verifiche è legata alla *deformabilità* della struttura in condizioni di esercizio (stato limite di esercizio): gli spostamenti degli elementi strutturali  $\delta_D$  dovuti alle azioni di progetto e le frequenze proprie dei solai  $f_D$  devono essere inferiori a dei limiti prestabiliti  $\delta_C$  e  $f_C$ :

$$\delta_C \geq \delta_D$$

$$f_C \geq f_D$$

Se le verifiche sono soddisfatte il processo di progettazione è terminato; se anche una sola delle relazioni risulta non verificata è necessario ripetere le varie fasi del processo partendo da un nuovo dimensionamento. Per ulteriori approfondimenti si veda Bontempi et al. (2008).

Le varie fasi del processo di progettazione saranno discusse e approfondite all'interno del volume.

## 1.2. Sistema strutturale, componenti e collegamenti

Come introdotto precedentemente, una costruzione è un organismo composto da diverse parti strutturali atte a raccogliere e trasferire al suolo i carichi verticali e orizzontali. All'interno di una struttura, per quanto complessa, è possibile identificare delle sottostrutture che hanno uno specifico comportamento strutturale. Queste, a loro volta, sono costituite da componenti strutturali che possono ulteriormente essere suddivisi in singoli elementi (figura 1.2).

Il corretto funzionamento di una costruzione è quindi legato a un corretto assemblaggio dei vari elementi e, a livello superiore, dei vari componenti. Questo aspetto riveste un ruolo fondamentale nelle costruzioni in acciaio: i singoli elementi sono generalmente prodotti standardizzati realizzati in serie e solo una attenta progetta-

zione dei collegamenti e una corretta disposizione dei componenti strutturali può assicurare un comportamento strutturale coerente e ottimale.

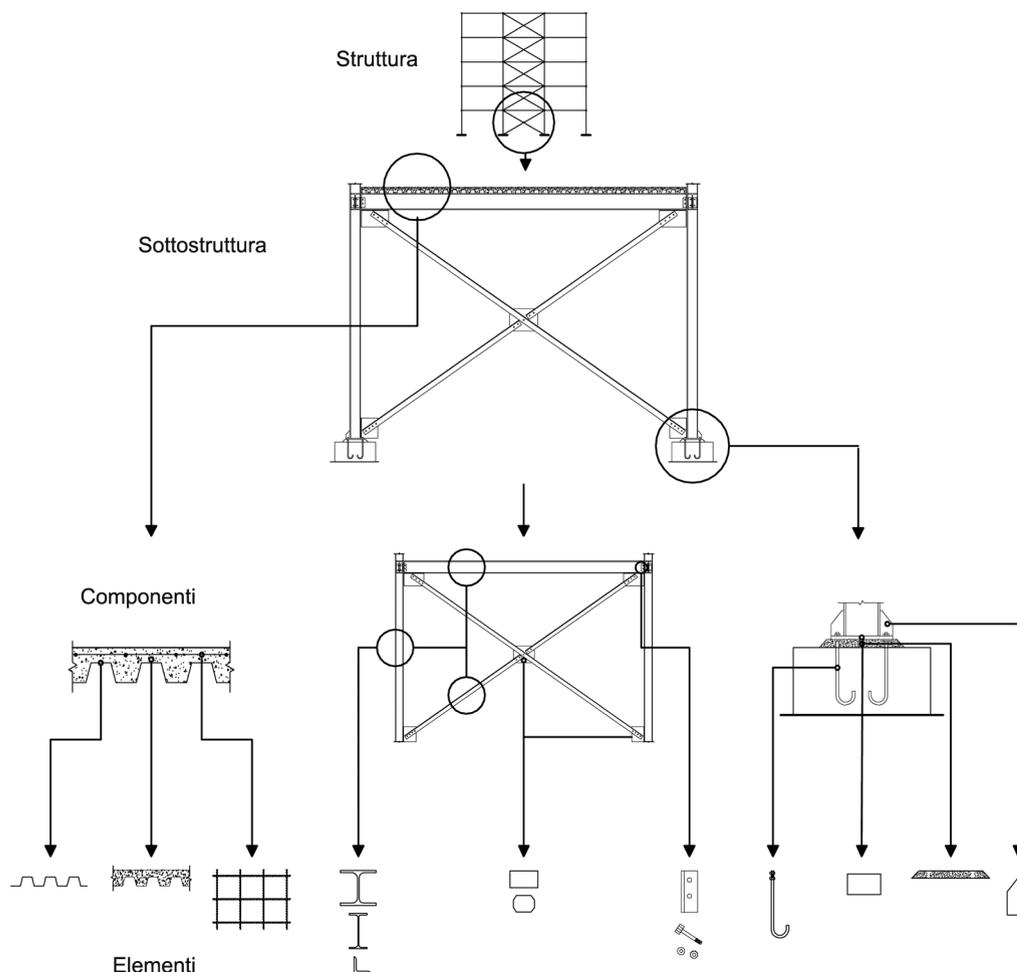


Figura 1.2 - Scomposizione di una struttura in acciaio

### 1.3. Requisiti strutturali

Le costruzioni devono soddisfare molteplici requisiti che garantiscono la possibilità di poter essere utilizzate in modo corretto durante tutta la loro vita utile. Tali requisiti devono essere stabiliti in modo chiaro e univoco a tutti i livelli, a partire dalle caratteristiche dei materiali da costruzione. Questo vale, ovviamente, sia per la comunità italiana sia a livello internazionale.

A tal fine, la Direttiva 89/106/ce "Prodotti da costruzione" del Consiglio Europeo, del 21 dicembre 1988, recepita in Italia con il D.P.R. n. 246 del 21 aprile 1993, è stata formulata con l'obiettivo di garantire la libera circolazione di tutti i materiali da

6

costruzione nell'Unione Europea mediante l'armonizzazione delle legislazioni nazionali nel campo dei requisiti essenziali per tali prodotti.

La Direttiva si applica "a qualsiasi prodotto fabbricato al fine di essere permanentemente incorporato in opere di costruzione, le quali comprendono gli edifici e le opere di ingegneria".

I *prodotti da costruzione* possono essere immessi sul mercato soltanto se idonei all'uso previsto. A tale riguardo, essi devono consentire la costruzione di opere che soddisfano, per una durata di vita economicamente accettabile, la conformità a una serie di requisiti riportati nell'allegato I della citata Direttiva.

Oltre ai requisiti legati ai materiali, anche i *requisiti strutturali di base* sono definiti all'interno delle norme nazionali ed europee. Questi vengono indicati nella sezione 2.1 dell'Eurocodice 0 (UNI EN 1990).

Requisito essenziale è che un'opera debba essere in grado di sopportare le azioni per le quali è stata progettata rimanendo adeguata allo scopo per il quale è stata concepita. Il soddisfacimento di tale requisito, essenziale sia dal punto di vista della sicurezza (*safety*) che della funzionalità (*serviceability*), si ottiene se le strutture, sia a livello di singolo elemento, sia di intero sistema, soddisfano i requisiti riportati di seguito (UNI EN 1990, 2.1 – (2)P).

- RESISTENZA MECCANICA E STABILITÀ

L'opera deve essere concepita e costruita in modo che le azioni a cui può essere sottoposta durante la costruzione e l'utilizzazione non provochino il crollo dell'intera opera o di una sua parte. Devono inoltre essere evitate deformazioni di importanza inammissibile, danni ad altre parti dell'opera o alle attrezzature principali o accessorie in seguito a una deformazione di primaria importanza degli elementi portanti.

- FUNZIONALITÀ

La struttura deve poter essere utilizzata con un adeguato livello di affidabilità per lo scopo per il quale è stata costruita durante tutta la vita utile di progetto.

- ROBUSTEZZA

La robustezza strutturale consiste nella capacità di evitare, nel caso di eventi eccezionali, quali incendi, esplosioni, urti o conseguenze di azioni antropiche, danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescanti.

- DURABILITÀ

La struttura deve mantenere invariate, al trascorrere del tempo, le caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture, purché venga effettuata la prevista manutenzione ordinaria. La durabilità è funzione dell'ambiente in cui la struttura è inserita e del numero di cicli di carico a cui potrà essere sottoposta. Una buona durabilità può essere ottenuta utilizzando materiali a ridotto degrado o assegnando dimensioni strutturali maggiorate in grado di compensare il deterioramento prevedibile dei materiali durante la vita utile di progetto, oppure mediante procedure di manutenzione programmata.

- RESISTENZA AL FUOCO

L'opera deve essere concepita e costruita in modo che, in caso di incendio, la capacità portante dell'edificio possa essere garantita per un periodo di tempo predeterminato. La produzione e la propagazione del fuoco e del fumo all'interno delle opere devono essere limitate in maniera tale che gli occupanti possano lasciare l'opera o essere soccorsi.

#### 1.4. Criteri di progettazione

Il processo di progettazione è complesso e generalmente iterativo come illustrato dallo schema di figura 1.1. È importante considerare una serie di criteri che possono aiutare nel raggiungimento delle prestazioni richieste. Questi criteri sono riportati di seguito.

- SEMPLICITÀ

Il criterio più generale di progetto riguarda la semplicità: per l'ingegneria questo è un valore fondamentale perché pone le basi per la certezza di comportamento. Questo principio diventa quindi una strategia globale per non introdurre ulteriori complessità in un ambiente già di per sé altamente incerto.

- REGOLARITÀ GEOMETRICA E SIMMETRIA

La regolarità geometrica riguarda la disposizione in pianta e in elevazione della struttura. È consigliata l'adozione di una configurazione geometrica lineare, con eccentricità limitate e possibili simmetrie, senza variazioni brusche di masse e rigidità. Tale regolarità dovrebbe essere considerata a diverse scale, dalla forma della pianta fino alle connessioni tra i singoli elementi strutturali.

- IPERSTATICITÀ E RIDONDANZA

La sicurezza globale in caso di crisi di una parte del sistema strutturale deve essere assicurata dalla presenza di percorsi di carico alternativi che permettano la creazione di diversi meccanismi resistenti e dalla presenza di vincoli e connessioni sovrabbondanti rispetto alla quantità strettamente necessaria.

- PREVEDIBILITÀ NEL TEMPO

È necessario utilizzare materiali e componenti strutturali il cui comportamento nel tempo sia il più possibile prevedibile al fine di evitare alterazioni brusche del comportamento meccanico.

- PRINCIPIO DI PRECAUZIONE

Per garantire il rispetto dei requisiti sopra indicati è necessario operare una scelta accurata dei materiali. Per poter essere utilizzati ai fini strutturali, materiali e componenti devono avere caratteristiche geometriche e meccaniche certe. Se vengono utilizzati materiali non esplicitamente citati nelle norme il produttore ne deve garantire prestazioni in linea con quanto richiesto dalla norma stessa.

## 1.5. Progettazione prestazionale e prescrittiva

L'approccio tradizionale alla progettazione delle strutture è stato per anni di tipo prescrittivo: le norme tecniche per le costruzioni prevedevano che il dimensionamento e la verifica degli elementi strutturali fossero effettuati seguendo procedure assegnate e utilizzando valori prestabiliti. Questo tipo di approccio lascia poca libertà al progettista, che si trova a dover seguire delle regole in maniera quasi automatica, senza compiere delle scelte personali che potrebbero migliorare il comportamento della costruzione e quindi le sue prestazioni (figura 1.3a), portando nel tempo a considerare inviolabili specifiche regole tecniche e implicando il considerare fissi vari parametri di progetto. L'effetto più deleterio è quello di minimizzare la capacità critica del progettista.

Negli ultimi anni è stato invece registrato un numero consistente di cambiamenti e di innovazioni che hanno mutato l'impostazione delle attività di progettazione da prescrittiva a prestazionale, prima con la redazione a livello europeo degli Eurocodici strutturali, poi con l'introduzione di una norma nazionale a carattere prestazionale (prima il D.M. 1409/2005: Testo Unitario e successivamente il D.M. 14/01/2008: Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni).

Tra i vari fattori che hanno portato a questo cambiamento nell'approccio progettuale meritano di essere menzionati da una parte l'utilizzo sempre più intensivo nell'ingegneria strutturale di strumenti avanzati di calcolo e dall'altra l'introduzione di materiali innovativi ad alte prestazioni. Vanno inoltre segnalati i nuovi sistemi di monitoraggio delle opere, significativamente meno onerosi che nel passato. Allo stesso tempo alcune opere progettate con i metodi tradizionali sono state oggetto di critiche da parte dell'opinione pubblica e degli esperti del settore perché hanno spesso evidenziato livelli prestazionali inadeguati alle necessità.

L'obiettivo primario dell'impostazione progettuale basata sulle prestazioni consiste nel creare un sistema nel quale le prestazioni della struttura in esame siano chiaramente indicate e gli utenti (committenti, proprietari, utilizzatori) siano chiaramente informati sulle modalità di realizzazione e sui costi di progettazione, supervisione e costruzione da sostenere per ottenerle.

Nella progettazione prescrittiva i livelli di sicurezza e le prestazioni attese non sono richiesti esplicitamente al progettista, sono sottintesi dalle norme. Il progettista segue regole di calcolo e sceglie i componenti e i materiali come specificato dalle norme. Non esiste una verifica diretta della sicurezza e delle caratteristiche prestazionali dell'opera, ma solo una garanzia indiretta per aver fatto le cose come prescritto.

L'approccio prestazionale propone invece di definire accuratamente i requisiti di progetto, dichiarando i livelli di sicurezza necessari. Lascia il progettista libero di scegliere, in modo consapevole e coerente, fra diversi strumenti e materiali per il raggiungimento delle prestazioni prefissate; prevede inoltre che l'effettivo raggiungimento delle prestazioni prefissate venga verificato direttamente attraverso modellazione numerica o sperimentale, fornendo quindi una conferma diretta della qualità della costruzione (figura 1.3b).

Si noti che nella pratica, i codici normativi moderni, pur orientandosi verso una

visione prestazionale, mantengono comunque alcuni aspetti prescrittivi che permettono di agevolare il trattamento di situazioni ordinarie.

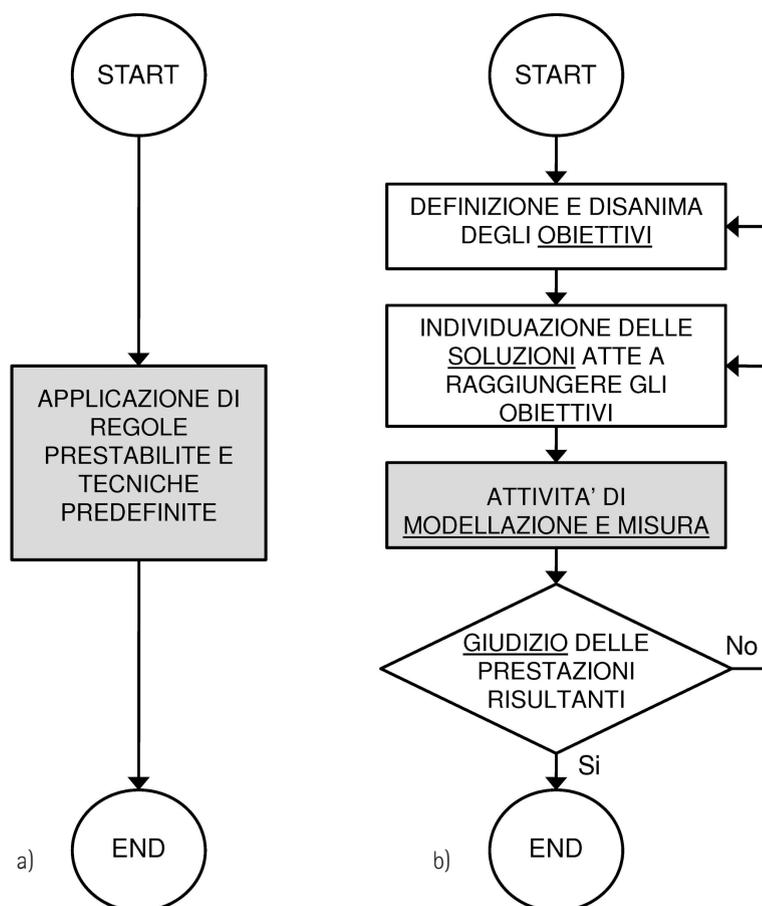


Figura 1.3 - Diagramma di flusso ideale di una progettazione secondo l'approccio prescrittivo (a) e secondo l'approccio prestazionale (b)

## 1.6. Gestione della qualità

L'Eurocodice 0 (UNI EN 1990) mette in evidenza un aspetto molto importante: la gestione della qualità. L'esperienza pratica mostra infatti che un sistema di qualità è uno strumento chiave per il raggiungimento di un appropriato livello di affidabilità strutturale. Le misure di gestione della qualità sottolineate nella UNI EN 1990 riguardano:

- la definizione puntuale dei requisiti di affidabilità;
- le misure organizzative;

10

- il controllo delle attività durante tutte le fasi, dalla progettazione fino a realizzazione, uso e manutenzione.

I sistemi di qualità dipendono da diversi fattori e sono quindi differenti tra loro. La serie CEN EN 29000 e i vari standard internazionali (iso dalla 9000 alla 9004) concretizzano e razionalizzano vari approcci. La norma EN ISO 9001, per esempio, è stata sviluppata intorno a un modello dell'organizzazione a processi basato sull'utilizzo di alcuni principi di gestione della qualità volti al raggiungimento di prestazioni di "eccellenza".

Tra i principi specifici legati alla qualità nel campo delle costruzioni si segnalano:

- soddisfacimento di bisogni, usi o scopi specifici;
- soddisfazione del cliente;
- conformità con i codici normativi e le linee guida esistenti;
- conformità con le esigenze della società.

La gestione della qualità è fondamentale durante tutte le fasi della vita utile della struttura: in figura 1.4 e in tabella 1.1 sono mostrate le varie fasi e le relative attività di gestione della qualità.

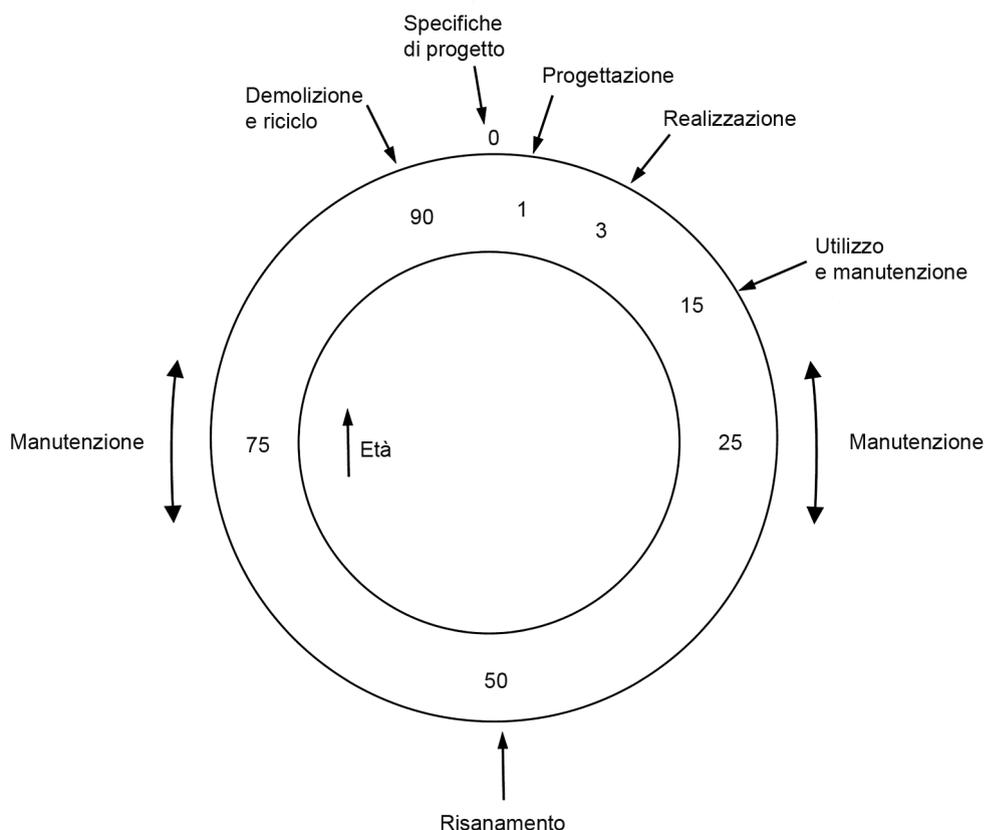


Figura 1.4 - Ciclo della qualità per le costruzioni (adattata da Gulvanessian et al., 2002)

Tabella 1.1 - Processo di costruzione e gestione della qualità (adattata da Gulvanessian et al., 2002)

Fasi del ciclo della qualità	Attività
Concezione ( <i>Conception</i> )	Definizione dei livelli di prestazione per i lavori di costruzione e i componenti strutturali
	Specifiche di progetto
	Specifiche per l'impresa
	Indicazioni preliminari per la realizzazione e la manutenzione
	Scelta dei soggetti intermedi con appropriate qualifiche
Progetto ( <i>Design</i> )	Definizione dei criteri per la definizione della qualità di materiali, componenti e sotto-strutture
	Conferma della accettabilità e della raggiungibilità delle prestazioni
	Definizione delle eventuali prove (prototipi, in situ, ecc.)
	Specifiche dei materiali
Appalto - Contratti ( <i>Tendering</i> )	Analisi dei documenti di progetto e dei requisiti prestazionali
	Accettazione dei requisiti da parte dell'impresa
	Accettazione del contratto da parte del cliente
Esecuzione	Controllo del processo e del prodotto
	Campionamento e prove
	Correzione di eventuali errori in corso d'opera
	Certificazione del lavoro nel rispetto delle prove indicate nella documentazione di progetto
Completamento dei lavori e consegna al cliente	Verifica delle prestazioni della costruzione realizzata (collaudo statico, ecc.)
Uso e manutenzione	Monitoraggio delle prestazioni
	Ispezioni per l'identificazione di eventuale deterioramento
	Studio dei problemi
	Certificazione del lavoro
Risanamento (o demolizione)	Come sopra

2

## Comportamento e modellazione delle strutture in acciaio

## 2.1. Caratteristiche dell'acciaio

L'acciaio da costruzione è una lega composta per il 98% da ferro e da piccole percentuali di carbonio, manganese, silicio, rame e cromo; il manganese e il silicio migliorano la saldabilità, mentre il rame e il cromo migliorano la resistenza agli agenti atmosferici. L'acciaio è un materiale utilizzato per formare profili, a caldo o a freddo, di solito standardizzati, con i quali si può assemblare una struttura tridimensionale attraverso dei collegamenti.

Le proprietà meccaniche del materiale vengono generalmente ricavate tramite la prova di trazione monoassiale (secondo le norme UNI EN ISO 377:1999, UNI 552:1986, UNI EN 10002-1:2004) su provini standardizzati per forma e dimensioni, in modo da rendere confrontabili le prove eseguite in tempi e luoghi diversi. La prova viene effettuata applicando al provino una forza assiale, prima crescente e poi decrescente, fino alla rottura del provino stesso. Considerando una fase di carico e una di scarico è possibile determinare le deformazioni elastiche e plastiche del materiale.

Nel diagramma carico  $N$  – allungamento  $\Delta L$  che si ottiene dalla prova di trazione è possibile distinguere quattro zone (figura 2.1):

1. nella prima zona si evidenzia un comportamento lineare: la legge di Hooke è valida, gli allungamenti sono piccolissimi e la riduzione delle dimensioni trasversali del provino per l'effetto Poisson è trascurabile;

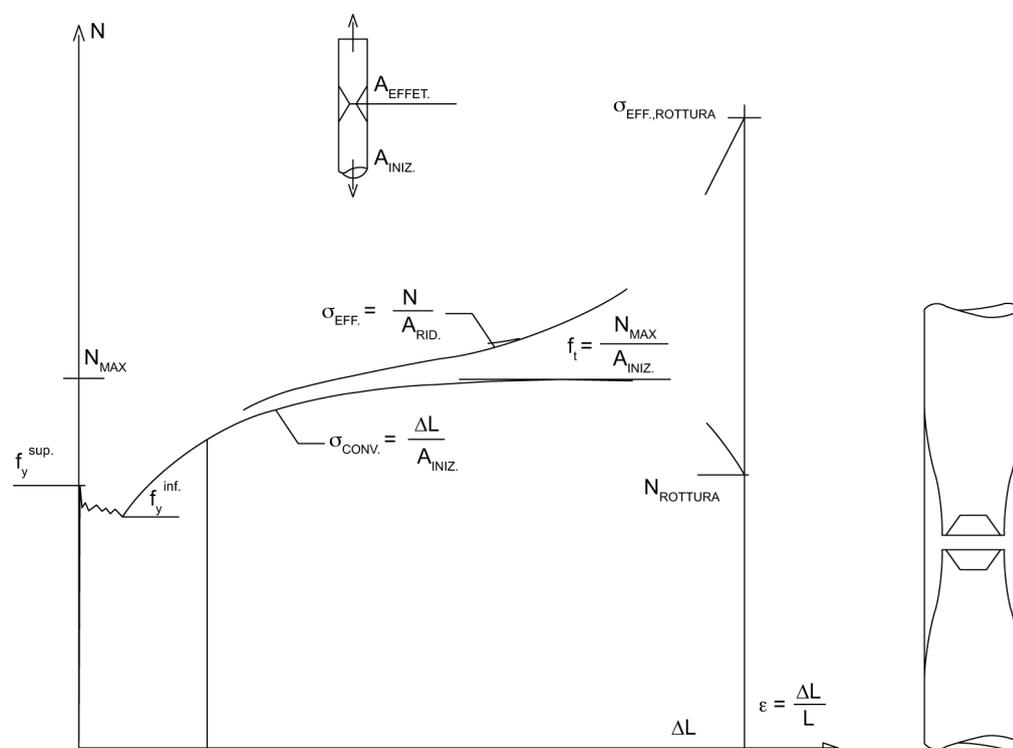


Figura 2.1 - Diagramma carico-deformazione della prova di trazione monoassiale

2. la seconda zona è caratterizzata da un tratto ondulato con andamento medio pressoché orizzontale dovuto all'insorgere delle deformazioni plastiche (*snervamento*);
3. la terza zona è caratterizzata da un ramo ascendente in cui l'aumento dell'allungamento si ottiene solo aumentando il carico (*incrudimento*); durante questa fase la contrazione trasversale del provino non è più trascurabile, cosicché si comincia a notare una differenza tra la tensione calcolata dividendo il carico per l'area effettiva ridotta e quella calcolata utilizzando l'area iniziale (ossia tra la misura di sforzo vero e quella ingegneristica o nominale). Il tratto crescente termina quando la contrazione trasversale cessa di essere uniforme e si localizza in una zona ristretta del provino (*strizione*);
4. la quarta zona, ad andamento discendente, descrive la riduzione del carico di prova effettuata per seguire l'evoluzione delle deformazioni plastiche nel provino. A causa della strizione, la sezione del provino non è più costante, ma si restringe sempre di più fino a quando si verifica la rottura. In tutta la quarta zona la tensione effettiva aumenta, anche se il carico viene gradualmente ridotto, perché prevale l'influenza della strizione che diminuisce, come si è detto, l'area della sezione trasversale.

Dalla prova di trazione appena descritta si ricavano i parametri riportati in tabella 2.1.

Tabella 2.1 - Parametri ricavabili dalla prova di trazione monoassiale

$f_t$	Tensione di rottura
$f_y$	Tensione di snervamento
$E$	Modulo di elasticità tangenziale (o di Young)
$e_t$	Allungamento percentuale a rottura

## 2.2. Classificazione e denominazione

Nelle normative nazionali ed europee si considerano le seguenti classi di acciaio da carpenteria per la realizzazione di profilati laminati a caldo a sezione aperta. (NTC 2008, tabella 11.3.IX; UNI EN 1993, prospetto 3.1):

- S 235 (Fe 360)
- S 275 (Fe 430)
- S 355 (Fe 510)
- S 460.

Il valore dopo la S (*steel*) indica la tensione caratteristica di snervamento. Tra parentesi è indicata la denominazione che gli stessi acciai avevano nelle normative precedenti nelle quali però il numero utilizzato nella sigla indicava il valore della tensione di rottura.

Si noti che nelle nuove norme è stata inclusa nella gamma degli acciai normalmente impiegabili anche la classe S 460 che prima non era considerata.

16

Secondo le norme europee l'acciaio è denominato attraverso una sigla che ne riassume le caratteristiche principali, ad esempio:

EN 10025-2 S 235 J2 + Z25 + M

dove

EN 10025-2 = normativa europea di riferimento

S = simbolo dell'acciaio strutturale

235 = tensione di snervamento espressa in N/mm<sup>2</sup>

J2 = sigla per la resilienza per intaglio

Z25 = simbolo che indica richieste particolari (in questo caso la riduzione dell'area del 25%)

M = simbolo che indica le condizioni di trattamento (laminazione termomeccanica).

In figura 2.2 sono schematizzate le sigle più utilizzate per gli acciai strutturali, mentre negli allegati riportati alla fine del testo è fornita la legenda completa dei simboli utilizzati dai vari sistemi di designazione.

Gruppo acciaio da costruzione	Caratteristiche meccaniche	Resilienza (J)			Caratteristiche fisiche		
		Carico unitario di snervamento R <sub>e</sub> minimo in N/mm <sup>2</sup>	min. 27 J	min. 40 J	Temp. °C	Gruppo 1	Gruppo 2
			JR	KR	20	M laminazione termomeccanica	C formatura speciale a freddo
		J2	K2	- 20	N laminazione di normalizzazione	D zincatura	
		J3	K3	- 30	G1 effervescente	E smaltatura	
		J4	K4	- 40	G2 calmato	H profilo cavo	
					G3 stato di fornitura opzionale	L bassa temperatura	
					G4 stato di fornitura a discrezione del produttore	M laminazione termomeccanica	
						O offshore	
						S costruzione navale	
						T tubi	
						W resistente alla corrosione atmosferica	
S	355	J2			G3	H	

Figura 2.2 - Schema per la denominazione degli acciai per uso strutturale (Fondazione Promozione Acciaio)

### 2.3. Modello di calcolo dell'acciaio

Per la progettazione di strutture in acciaio si considera un comportamento del materiale semplificato (figura 2.3): il secondo tratto della curva mostrata in figura 2.1 viene

semplificato con un tratto rettilineo a partire dalla tensione di snervamento, trascurando quindi l'incremento di tensione che si ha successivamente fino alla rottura.

17

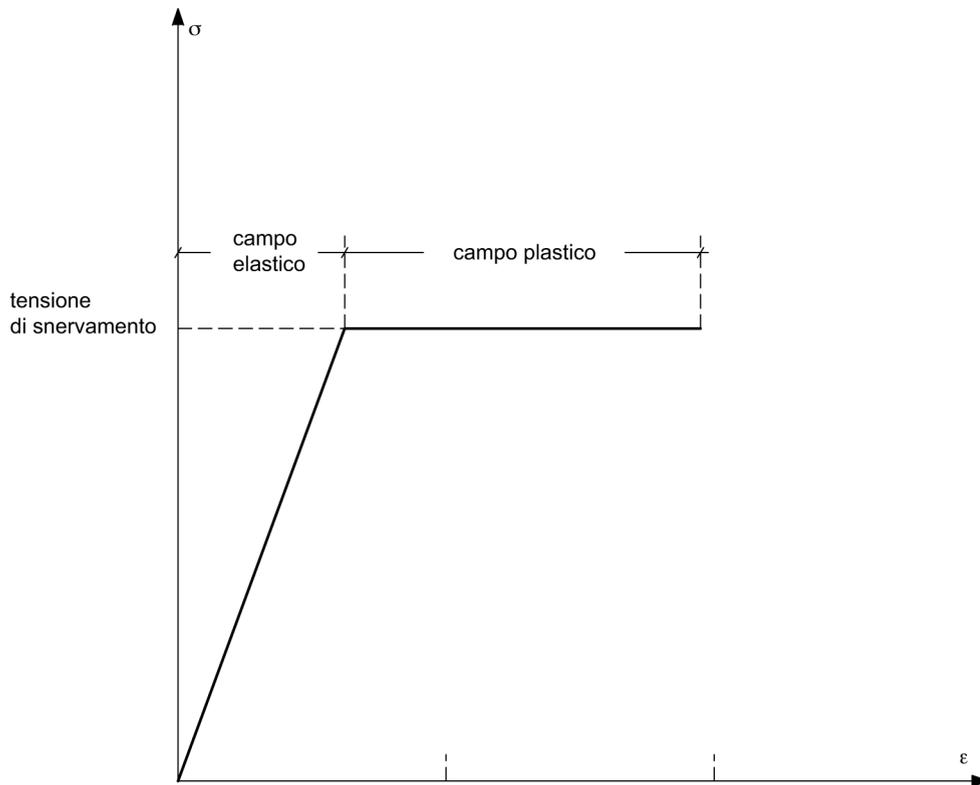


Figura 2.3 - Diagramma tensioni-deformazioni semplificato

## 2.4. Morfologia degli elementi strutturali

Una struttura è costituita da un insieme di elementi soggetti a carichi verticali e orizzontali che, opportunamente organizzati, sono in grado di resistere alle azioni esterne trasferendole a terra.

Un edificio in acciaio è generalmente costituito dai seguenti componenti strutturali (figura 2.4):

- solai;
- travi;
- colonne;
- controventi.

Esistono poi elementi strutturali secondari ed elementi non strutturali come le tamponature che servono a delimitare la superficie tridimensionale.

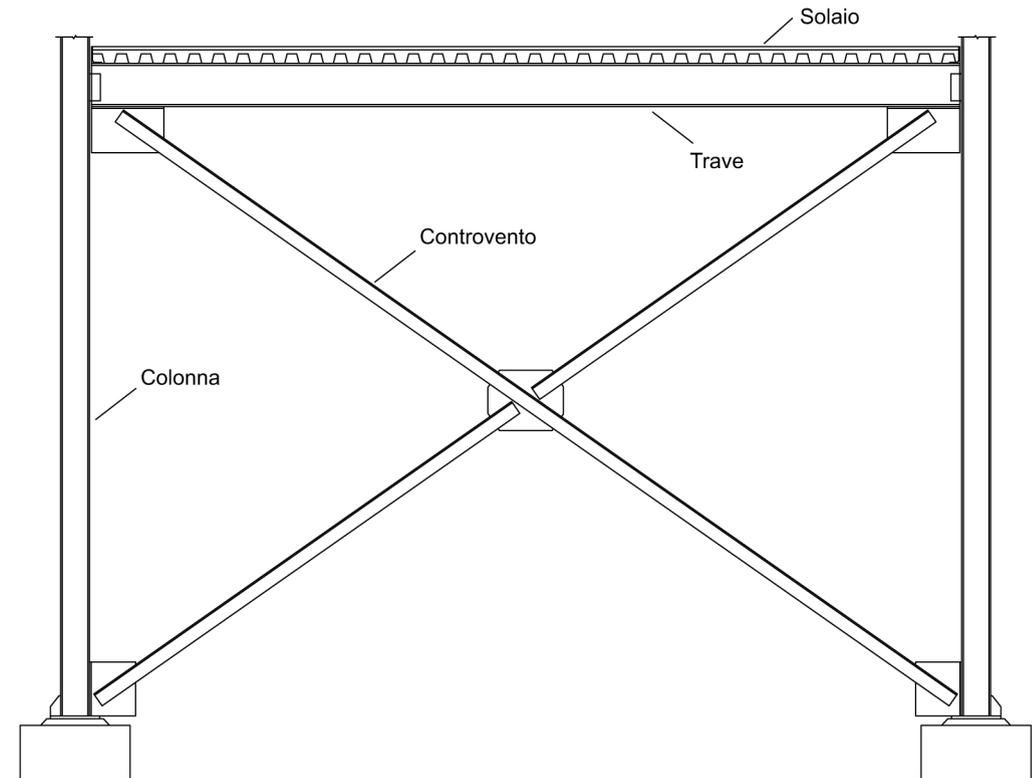


Figura 2.4 - Elementi resistenti di una struttura in acciaio

I solai sono strutture bidimensionali orizzontali in grado di trasferire i carichi agenti sugli altri componenti strutturali. La tipologia di solaio tipicamente utilizzata per le costruzioni in acciaio è costituita da una lamiera grecata, fissata alle travi tramite appositi bottoni di saldatura, all'interno della quale viene disposta una rete elettrosaldata e viene gettata una soletta di calcestruzzo alleggerito (figura 2.5). Le lamiere sono ottenute mediante sagomatura a freddo di nastri di lamiera di spessore variabile tra 5 e 20 decimi di millimetro e vengono generalmente fornite in elementi di lunghezza circa pari a 6 m; tale limitazione è legata ad esigenze di trasporto e montaggio.

Le travi sono elementi in cui una dimensione è prevalente rispetto alle altre due. Sono elementi prevalentemente inflessi, soggetti quindi a sforzo di taglio e momento flettente. Negli impalcati degli edifici in acciaio solitamente si dispone una orditura costituita da travi secondarie, su cui è appoggiato il solaio, e da travi principali che sopportano i carichi trasmessi dalle travi secondarie e li trasferiscono alle colonne.

Le colonne sono elementi strutturali prevalentemente compressi o presso-inflessi. Sopportano il carico proveniente dagli orizzontamenti e lo trasferiscono alle strutture di fondazione.

I profili commerciali più diffusi per la realizzazione di travi e colonne, le cui caratte-

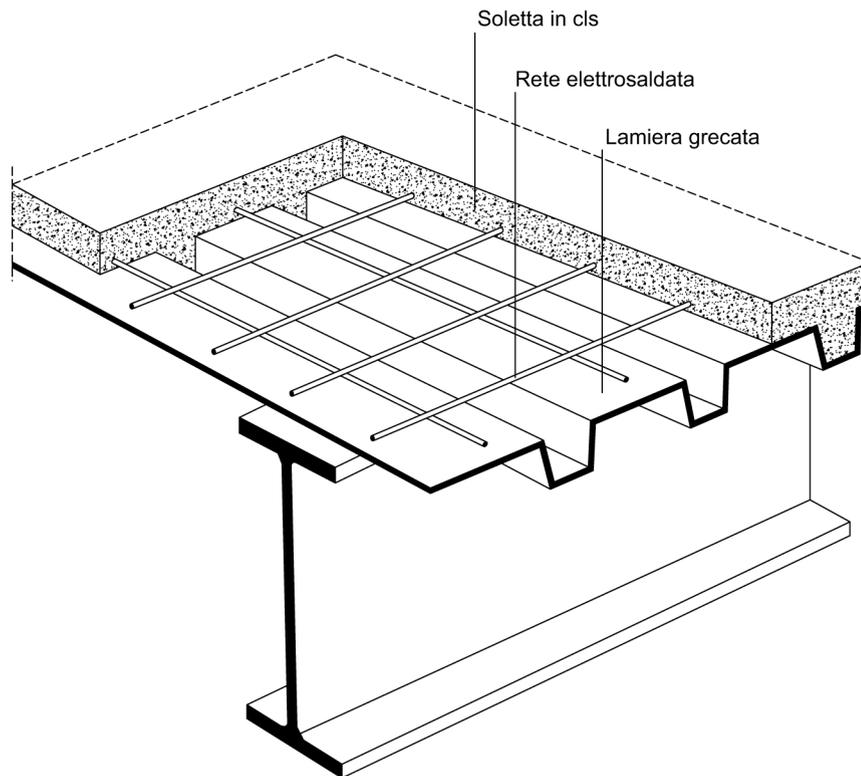


Figura 2.5 - Solaio in lamiera grecata

ristiche geometriche e meccaniche sono riportate nel dettaglio negli allegati, sono i seguenti:

- profili IPE: sono profili a doppia T ad ali parallele in cui l'altezza  $h$  della sezione è circa il doppio della base  $b$  ( $h \cong 2b$ ). Dato che il momento di inerzia in una direzione è notevolmente maggiore di quello nell'altra direzione, questo profilo è efficiente per sopportare sollecitazioni di tipo flessionale agenti marcatamente in una direzione, come quelle a cui sono soggette le travi. I profili IPE vengono prodotti con lunghezze fino a 12 m; per coprire luci maggiori è necessario realizzare profili composti le cui dimensioni e caratteristiche inerziali sono definite caso per caso;
- profili HE: sono profili a doppia T in cui le misure dell'altezza  $h$  e della base  $b$  sono molto simili ( $h \cong b$ ). Queste sezioni presentano un buon comportamento nei confronti dei fenomeni di instabilità poiché posseggono caratteristiche inerziali simili nelle due direzioni; per questo motivo sono spesso utilizzate per realizzare le colonne. Esistono, in ordine decrescente di resistenza, tre differenti classi di profili HE (figura 2.6): tipo pesante M, normale B, leggero A.

I controventi sono elementi inseriti sia nel piano verticale che orizzontale per eliminare le labilità di una struttura a ritti pendolari nei confronti delle azioni orizzontali.

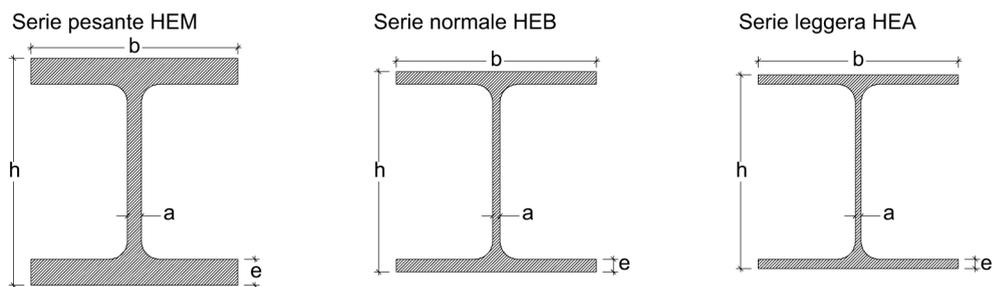


Figura 2.6 - Profili di tipo HE

Infatti, nel tipico schema a ritri pendolari, si ipotizza che i vari elementi siano collegati tra di loro tramite vincoli assimilabili a cerniere; l'organismo strutturale risultante è in grado di sopportare i carichi verticali ma risulta labile per azioni orizzontali. Inserendo elementi di controventamento questa labilità viene eliminata (figura 2.7).

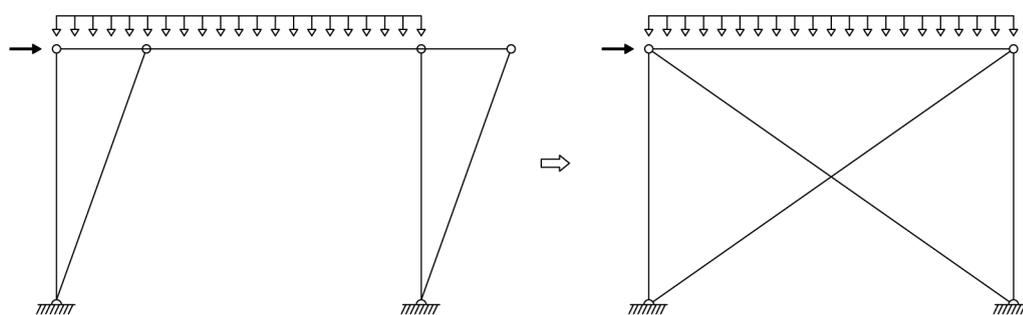


Figura 2.7 - Schema di una struttura a ritri pendolari

Un'altra soluzione per eliminare la labilità nei confronti delle azioni orizzontali è quella di progettare nodi rigidi tra gli elementi strutturali in grado di trasmettere sforzo assiale, taglio e momento, realizzando così una tipologia strutturale denominata *a telaio* (figura 2.8).

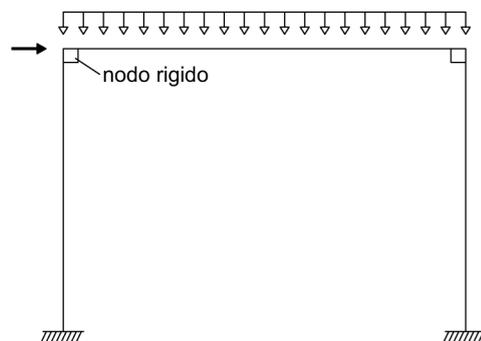


Figura 2.8 - Schema a telaio