

VERIFICA E PROGETTO DI ASTE IN ACCIAIO

**Sforzo normale, flessione semplice e composta,
taglio e torsione, instabilità locale e latero-torsionale
Aggiornato alle NTC 2018**

**Aurelio Ghersi, Edoardo M. Marino,
Pier Paolo Rossi, Francesca Barbagallo**

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



Indice

Premessa.....	17
Capitolo 1	
L'ACCIAIO	19
1. Norme di riferimento	19
2. Caratteristiche meccaniche dell'acciaio.....	21
3. Elementi strutturali in acciaio.....	23
4. Modellazione e criteri di verifica.....	24
5. Peculiarità delle strutture in acciaio	26
5.1. Elevata resistenza del materiale.....	26
5.2. Modalità di assemblaggio della struttura.....	27
5.3. Altre problematiche specifiche	27
Capitolo 2	
SFORZO NORMALE	29
1. Sforzo normale centrato	29
2. Trazione.....	30
2.1. Verifica della sezione lorda.....	31
2.2. Influenza delle imperfezioni.....	32
2.3. Verifica della sezione netta.....	33
2.4. Duttilità delle aste tese.....	35
3. Compressione	35
3.1. Resistenza plastica della sezione	36
3.2. Instabilità dell'asta ideale	37
3.3. Instabilità dell'asta: influenza delle imperfezioni.....	42
3.4. Instabilità dell'asta: influenza dello snervamento del materiale	44
3.5. Instabilità dell'asta reale.....	46
3.6. Verifica dell'asta compressa	48

Capitolo 3

FLESSIONE SEMPLICE	55
1. La flessione semplice	55
2. Comportamento e verifica in campo elastico.....	57
3. Comportamento e verifica allo stato limite ultimo	60
3.1. Comportamento qualitativo della sezione	60
3.2. Resistenza della sezione plasticizzata	62
4. Verifica a flessione deviata.....	69
5. Verifica allo stato limite di esercizio.....	71
6. Progetto di aste inflesse.....	74

Capitolo 4

FLESSIONE COMPOSTA.....	79
1. La flessione composta	79
2. Comportamento della sezione in campo elastico.....	80
3. Comportamento della sezione in campo plastico	82
3.1. Comportamento qualitativo della sezione	82
3.2. Procedimento generale di verifica	83
3.3. Costruzione dei domini di resistenza: procedimento generale	85
3.4. Dominio di resistenza per sezione rettangolare	86
3.5. Dominio di resistenza per sezione a doppio T, sollecitata nel	
piano di maggior resistenza.....	88
3.6. Dominio di resistenza per sezione a doppio T, sollecitata nel	
piano di minor resistenza	94
3.7. Considerazioni finali e criteri di progetto.....	97
4. Flessione composta deviata.....	100
5. Comportamento di un'asta pressoinflessa con momento flettente	
costante	102
5.1. Influenza della flessione sullo sforzo normale critico	102
5.2. Metodi di verifica secondo la normativa	103
6. Comportamento di un'asta pressoinflessa con momento flettente	
variabile.....	109
6.1. Influenza dell'andamento del momento flettente.....	109
6.2. Determinazione del momento equivalente	110
6.3. Verifica tenendo conto del momento equivalente.....	115

Capitolo 5

TAGLIO	123
1. Il taglio	123
2. Comportamento e verifica in campo elastico.....	124

3.	Comportamento e verifica allo stato limite ultimo	127
3.1.	Comportamento qualitativo della sezione	127
3.2.	Procedimento generale di verifica	129
4.	Verifica a taglio e flessione.....	132
4.1.	Interazione taglio-momento in campo elastico.....	132
4.2.	Interazione taglio-momento in campo plastico.....	135

Capitolo 6

TORSIONE.....	141
1. La torsione.....	141
2. Torsione primaria	143
3. Torsione secondaria	146
4. Torsione e taglio.....	148

Capitolo 7

INSTABILITÀ LOCALE.....	149
1. Generalità	149
2. Carico critico elastico della lastra.....	150
2.1. Tensioni normali	150
2.2. Tensioni tangenziali.....	154
3. Metodi di normativa per la valutazione del carico critico elastico di membrature in acciaio.....	155
3.1. Pannelli (senza irrigidimenti longitudinali) soggetti a tensioni normali	155
3.2. Pannelli (senza irrigidimenti longitudinali) soggetti a tensioni tangenziali.....	158
3.3. Assemblaggi di pannelli.....	159
3.4. Pannelli irrigiditi	159
3.5. Pannelli con/senza irrigidimenti in presenza di tensioni combinate.....	162
4. Comportamento post-critico di pannelli in acciaio.....	163
5. Metodi di normativa per la valutazione della resistenza ultima di membrature in acciaio	163
6. Il metodo della larghezza efficace	165
6.1. Sezione efficace per tensioni normali.....	165
6.2. Verifica di elementi soggetti a sforzo normale e momento flettente.....	171
6.3. Verifica di elementi soggetti a taglio	172
6.4. Interazione tra sforzo normale, momento flettente e taglio ...	176
7. Il metodo delle tensioni ridotte	178

Capitolo 8

INSTABILITÀ LATERO-TORSIONALE.....	181
1. Generalità	181
2. Momento flettente critico della trave ideale.....	182
2.1. Modello di trave senza torsione secondaria.....	182
2.2. Modello di trave con torsione secondaria.....	187
3. Influenza del punto di applicazione del carico sul momento flettente critico dell'asta.....	191
4. Formula generale del momento flettente critico elastico delle travi	192
4.1. Sezioni trasversali simmetriche rispetto all'asse minore	192
4.2. Sezioni trasversali doppiamente simmetriche	194
5. Momento flettente critico della trave con imperfezioni	195
6. Metodi di verifica di normativa.....	199
6.1. Aste inflesse a sezione costante.....	199
6.2. Aste a sezione costante soggette a flessione e compressione assiale	208
6.3. Metodo generale per instabilità laterale e latero-torsionale di componenti strutturali.....	213
Bibliografia generale	215

*A Federico Mazzolani,
che mi ha trasmesso
la sua passione per l'acciaio*

Aurelio Gherzi

Premessa

Questo libro è frutto del lavoro del gruppo di ricerca (e didattica) che si è formato a Catania sotto la mia guida nel corso di vari anni. La mia passione per l'acciaio, come argomento di ricerca, è nata quando lavoravo all'Università di Napoli, grazie alla guida di Federico Mazzolani. Si è poi trasferita al campo della didattica con la mia breve esperienza di insegnamento al corso di laurea in Architettura di Siracusa, che è stata poi travasata a Catania nel corso di Tecnica delle costruzioni per Ingegneria edile-architettura e, in tempi molto più recenti, per l'omonimo corso per Ingegneria strutturale e geotecnica.

L'idea di scrivere un libro su questo argomento è cresciuta man mano, fino a sfociare nella prima versione di questo libro, realizzata con un rapido blitz a cavallo del Natale 2013 con la collaborazione di Edoardo Marino e Francesca Barbagallo. Il testo di allora era limitato solo a pochi argomenti che ci sembrano un po' tralasciati da altri libri, come in particolare la flessione composta. A distanza di quasi cinque anni abbiamo ripreso il lavoro, acquisendo ora anche l'importante collaborazione di Pier Paolo Rossi. È stato lui ad impostare gli ultimi due capitoli, così come è stato fondamentale il contributo di Francesca Barbagallo per la parte relativa a taglio e torsione, ma alla fine il testo è passato per le mani di tutti, diventando così un'opera collegiale. C'è certamente ancora tanto da scrivere sull'argomento e speriamo quindi di poter continuare a dare il nostro contributo in future edizioni.

È ovviamente doveroso un ringraziamento a tutti i giovani che negli anni ci hanno dato una mano, sia nell'attività di ricerca che nella didattica. Sono ormai troppi per elencarli ad uno ad uno, ma sono e resteranno sempre nei nostri cuori. Un ringraziamento finale a mia moglie Lia ed alla sua consueta amorevole pazienza nei miei confronti, così come anche da parte di Edoardo per Carmela, di Pier Paolo per Giuliana, di Francesca per Luca.

Aurelio Ghersi

Capitolo 1

L'ACCIAIO

1. Norme di riferimento

Nell'affrontare la progettazione di elementi strutturali in acciaio è sicuramente prioritario comprendere il comportamento fisico delle sezioni, delle aste, dei collegamenti tra elementi e più in generale dell'intera struttura. Nel passare, però, da un comportamento fisico ad un calcolo occorre effettuare una serie di scelte, dalla modellazione ai valori dei coefficienti di sicurezza, che richiedono interpretazioni e devono essere quindi normate. Per questo motivo si ritiene importante iniziare proprio con un sintetico riferimento alla normativa tecnica. Un discorso più approfondito può essere trovato in un libro del primo autore di questo testo¹.

Il riferimento principale deve essere sempre la normativa tecnica europea, i cosiddetti Eurocodici. Da lungo tempo si è stabilito che i singoli stati dell'Unione Europea devono adeguare le loro norme agli Eurocodici, o meglio ancora adottare integralmente questi ultimi. Questo processo non è ancora terminato e l'Italia continua a proporre aggiornamenti delle sue norme, ma in sostanza questi spingono ad avvicinarsi sempre più al testo europeo.

¹ A. Ghersi, Il cemento armato, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2010.

La norma europea di riferimento per l'acciaio è l'Eurocodice 3 (EC3), Progettazione delle strutture in acciaio². Esso è diviso in più parti, tra le quali si segnalano in particolare le seguenti.

- Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici.
- Parte 1-3: Regole supplementari per l'impiego dei profilati e delle lamiere sottili piegati a freddo.
- Parte 1-5: Elementi strutturali a lastra.
- Parte 1-8: Progettazione dei collegamenti.

Una delle caratteristiche essenziali di questo, come degli altri Eurocodici, è la distinzione tra principi e regole applicative. I *principi* comprendono le definizioni ed i criteri generali cogenti, cioè che devono essere necessariamente applicati. Le *regole applicative* sono invece indicazioni che consentono di rispettare i principi, ma possono essere sostituite da criteri alternativi, purché questi siano coerenti con i principi e garantiscano la sicurezza e durabilità che si prevede di ottenere usando gli Eurocodici. Per quanto riguarda le norme europee sui materiali si segnalano le EN 10025, Prodotti laminati a caldo di acciai per impieghi strutturali, e le EN 10027, Sistemi di designazione degli acciai, entrambe recepite dall'UNI.

La normativa italiana attuale è costituita dalle Norme Tecniche per le Costruzioni emanate con D.M. 17/1/2018, pubblicato sulla G.U. del 20/2/2018, indicate nel testo con l'acronimo NTC. In particolare, riguarda specificamente l'acciaio il paragrafo 2, Costruzioni di acciaio, del capitolo 4, Costruzioni civili e industriali. Tale capitolo è molto sintetico rispetto all'EC3 e quindi importanti indicazioni aggiuntive sono state inserite nella Circolare "Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni"³. Ulteriori indicazioni, relative all'acciaio in quanto materiale, si trovano nel paragrafo 3.4, Acciaio per strutture metalliche e per strutture composte, del capitolo 11, Materiali e prodotti ad uso industriale.

² L'Eurocodice 3 è anche indicato con EN 1993, dal numero della norma europea che lo individua.

³ Al momento in cui si scrive non è stata ancora pubblicata la nuova versione della Circolare e si può quindi fare riferimento a quella del 2009, ma è sempre preferibile un controllo delle prescrizioni dell'Eurocodice.

2. Caratteristiche meccaniche dell'acciaio

La prova a trazione consente di descrivere praticamente tutti gli aspetti del comportamento meccanico dell'acciaio. Essa consiste nell'applicare ad un provino una forza (e quindi una tensione σ) via via crescente e misurare l'allungamento (e quindi la deformazione ϵ). Si può così determinare il legame costitutivo σ - ϵ del materiale (Fig. 1a). Esso presenta un primo tratto elastico lineare, lungo il quale tensioni e deformazioni crescono in modo proporzionale

$$\sigma = E \epsilon$$

con una pendenza che rappresenta il modulo elastico del materiale. Per l'acciaio si assume il valore $E = 210000$ MPa, indipendente dalla resistenza dell'acciaio.

Il tratto lineare termina in corrispondenza dello snervamento (in inglese *yielding*) per $\epsilon = \epsilon_y$ e $\sigma = f_y$. Dopo lo snervamento la deformazione cresce a tensione costante fino all'inizio della fase dell'incrudimento (in inglese *hardening*) del materiale, a partire dal quale la tensione ricomincia a crescere. Il valore massimo della tensione si raggiunge nella fase di incrudimento ed è denominato tensione di rottura. La normativa italiana usa per tale tensione il simbolo f_t (con il pedice t che indica trazione) mentre quella europea preferisce il simbolo f_u (nel quale il pedice u significa valore ultimo, *ultimate*); nel presente testo si è preferito usare il simbolo europeo.

Il tratto finale del diagramma, decrescente, corrisponde al fenomeno di strizione, ovvero di riduzione della sezione trasversale del

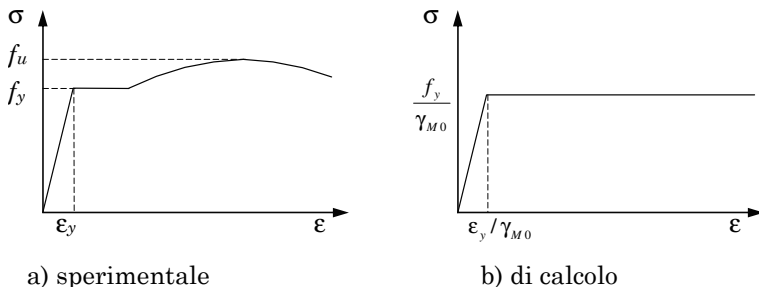


Fig. 1. Legami costitutivi dell'acciaio

Tab. 1. Tipi di acciaio più comunemente usati

sigla	$t \leq 40$ mm		40 mm $< t \leq 80$ mm	
	f_y [MPa]	f_u [MPa]	f_y [MPa]	f_u [MPa]
S235	235	360	215	340
S275	275	430	255	410
S355	355	510	335	490

provino, e termina con la rottura del materiale, che si verifica per una deformazione ϵ_u maggiore di quella corrispondente al raggiungimento della tensione f_u .

Tra le ulteriori, possibili prove si segnala la prova di resilienza, che utilizza il pendolo di Charpy per misurare l'energia d'urto necessaria per rompere un provino. Motivazione principale di tale prova è il fatto che l'acciaio a basse temperature tende ad avere un comportamento fragile, col rischio di rotture improvvise ed è quindi necessario imporre un adeguato valore della resilienza in funzione della temperatura d'uso.

Gli acciai per carpenteria metallica vengono individuati mediante una sigla che individua principalmente la resistenza, intesa come tensione di snervamento. La sigla è costituita dalla lettera S seguita da un numero, che rappresenta il valore nominale di f_y . Gli acciai più comunemente utilizzati in Italia sono elencati in Tab. 1. Si noti che per spessori forti (maggiori di 40 mm, per molte norme) si accettano tensioni di snervamento e tensioni ultime minori rispetto al valore indicato dalla sigla. La sigla può essere seguita da altre lettere che individuano

- la metodologia di produzione (N, M che indicano rispettivamente laminazione normalizzata e termo meccanica);
- la resistenza alla corrosione (W);
- il fatto di essere un profilo chiuso (H);
- la resilienza (JR, JO, J2, K2).

Capitolo 2

SFORZO NORMALE

1. Sforzo normale centrato

Una sezione si dice sollecitata a sforzo normale centrato quando risulta soggetta all'azione del solo sforzo normale N applicato nel baricentro della sezione (Fig. 1). Il diagramma delle tensioni che ne deriva è costante nell'intera sezione. In campo elastico lineare la tensione σ si può valutare con l'equazione di Navier, che nel caso di sforzo normale centrato ($M_y=0$ ed $M_z=0$) diventa

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (1)$$

e fornisce valore positivo se lo sforzo normale è di trazione, negativo se N è di compressione.

Poiché il diagramma delle tensioni è costante, la distinzione fatta dalla normativa italiana, tra verifica in campo elastico e in

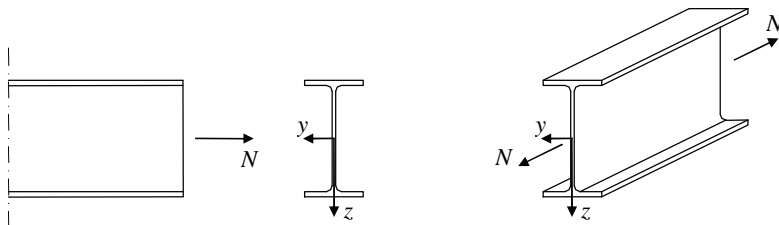


Fig. 1. Sezione soggetta a sforzo normale centrato

campo plastico perde di significato. La verifica allo stato limite ultimo, SLU, viene condotta controllando che la tensione σ non superi un valore di calcolo, che viene assunto pari al rapporto tra la tensione di snervamento f_y ed il coefficiente parziale di sicurezza γ_{M0} . Tale modo di procedere coincide con quello del metodo delle tensioni ammissibili, che ammette come valore limite la *tensione ammissibile* $\bar{\sigma}$. La verifica della sezione può essere condotta verificando il rispetto della anzidetta condizione sia per sforzo normale di trazione che di compressione. Tuttavia, nel caso della compressione è necessario eseguire un'ulteriore verifica, generalmente più gravosa della precedente, che riguarda l'intera asta (di cui la sezione fa parte) affinché questa non si instabilizzi per effetto dello sforzo normale.

Nel seguito si esamina, separatamente nei casi della trazione e della compressione, il comportamento della sezione soggetta a sforzo normale e si illustrano in dettaglio le formule per la verifica di resistenza plastica allo stato limite ultimo. Successivamente si esamina il comportamento dell'asta compressa e si illustra la verifica di stabilità allo stato limite ultimo.

2. Trazione

La verifica a trazione allo stato limite ultimo di un'asta si esegue confrontando lo sforzo normale di progetto N_{Ed} con la resistenza a trazione dell'asta $N_{t,Rd}$, ovvero controllando il rispetto delle seguente disequaglianza

$$N_{Ed} \leq N_{t,Rd} \quad (2)$$

Lo sforzo normale N_{Ed} si ottiene dalla risoluzione del modello numerico della struttura soggetta all'azione dei carichi di progetto. La resistenza a trazione dell'asta $N_{t,Rd}$ è pari allo sforzo normale che l'asta è in grado di trasmettere in corrispondenza di uno stato limite assunto convenzionalmente come collasso.

Se l'asta non presenta sezioni indebolite (per la presenza di fori e/o intagli), bisogna verificare semplicemente la sezione tipo di area A (area lorda). In tal caso la resistenza a trazione dell'asta coincide con quella della sezione geometrica. Se invece l'asta presenta anche

sezioni indebolite, bisogna eseguire oltre alla verifica della sezione lorda anche quella della sezione indebolita di area A_{net} (area netta). In questo caso, la resistenza a trazione dell'asta sarà pari alla più piccola tra quella della sezione lorda e quella della sezione netta.

2.1. Verifica della sezione lorda

Lo stato limite convenzionalmente assunto per la valutazione della resistenza può essere determinato applicando sulla sezione uno sforzo normale, inizialmente molto piccolo, e facendolo crescere fino a quando le risorse di resistenza della sezione non siano esaurite. Assumendo convenzionalmente il legame elastico perfettamente plastico mostrato nel capitolo 1, la tensione cresce proporzionalmente con lo sforzo normale N agente sulla sezione fino a raggiungere il valore di plasticizzazione f_y/γ_{M0} . Da questo momento in poi, in accordo con il legame σ - ε assunto, la tensione σ si mantiene costante mentre la deformazione ε continua a crescere in maniera indefinita. La completa plasticizzazione della sezione prefigura dunque uno stato di incipiente collasso. Lo sforzo normale che corrisponde a tale stato viene denominato resistenza plastica della sezione lorda $N_{pl,Rd}$. Esso si calcola invertendo l'equazione (1) e considerando $\sigma = f_y/\gamma_{M0}$

$$N_{pl,Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3)$$

Esempio 1. Verificare una sezione di un'asta realizzata mediante una copia di profili UPN80 in acciaio S275. La sezione è soggetta ad uno sforzo normale di trazione $N_{Ed} = 450$ kN.

Il sagomario fornisce per la sezione UPN80 un'area pari a 11.0×10^2 mm². Dunque, l'area della sezione da verificare è pari a

$$A = 2 \times 11.0 \times 10^2 = 22.0 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

e la sua resistenza plastica in kN vale

$$N_{pl,Rd} = 22 \times 10^2 \times \frac{275}{1.05} \times 10^{-3} = 576.2 \text{ kN}$$

Poiché $N_{Ed} < N_{pl,Rd}$ la verifica della sezione è soddisfatta.

Esempio 2. Progettare una sezione capace di portare uno sforzo normale di trazione $N_{Ed} = 450 \text{ kN}$.

Si decide di utilizzare un acciaio S275 e si valuta l'area necessaria della A uguagliando la resistenza plastica della sezione $N_{pl,Rd}$ allo sforzo normale di progetto N_{Ed}

$$A = \frac{\gamma_{M0} N_{Ed}}{f_y} = \frac{1.05 \times 450}{275} \times 10^3 = 17.2 \times 10^2 \text{ mm}^2$$

Il sagomario fornisce un'area pari a $9.0 \times 10^2 \text{ mm}^2$ per una sezione ad U di dimensioni 65x42. Pertanto è sufficiente utilizzare una coppia di profilati ad U 65x42 che forniscono un'area complessiva A pari $18.0 \times 10^2 \text{ mm}^2$.

2.2. Influenza delle imperfezioni

Pur essendo un prodotto industriale accuratamente controllato, le aste in acciaio possono comunque presentare imperfezioni, legate al procedimento realizzativo. Si distingue tra imperfezioni geometriche e imperfezioni meccaniche. Tra le prime rientrano le possibili variazioni degli spessori rispetto ai valori nominali, la non perfetta ortogonalità tra ali ed anima, la non perfetta rettilinearità dell'asse dell'asta. Tra le seconde si cita la dispersione dei valori delle tensioni di snervamento e rottura tra i diversi punti della sezione e soprattutto le tensioni residue che si ingenerano nel raffreddamento dell'asta.

Un'asta reale soggetta a trazione si presenta quindi abbastanza diversa rispetto ad un'asta ideale. Ad esempio, per effetto della non perfetta rettilinearità dell'asse una forza assiale induce anche flessione e quindi il diagramma reale delle tensioni è diverso da quello costante ipotizzato dalla (1). Anche la presenza di tensioni residue, che hanno risultante nulla ma nel singolo punto possono avere valori percentualmente rilevanti rispetto alla tensione di snervamento (fino al 50%), rende il diagramma di tensioni non costante. Occorre allora riflettere su cosa avviene in un'asta reale soggetta ad una forza di trazione.

Per valori modesti della forza di trazione le tensioni rimangono al di sotto del valore di snervamento e l'allungamento dell'asta è proporzionale al valore dell'azione applicata. Aumentando la forza, lo snervamento nei punti più sollecitati (per effetto del momento dovuto all'eccentricità e/o la presenza delle tensioni residue) viene