

VERIFICA E PROGETTO DI ASTE IN ACCIAIO

Sforzo normale, flessione semplice e composta,
taglio e torsione, instabilità locale e latero-torsionale

Aurelio Gherzi, Edoardo M. Marino, Pier Paolo Rossi, Francesca Barbagallo

II EDIZIONE - AGGIORNATO ALLE NTC 2018

Fondazione
Promozione Acciaio




Dario Flaccovio Editore

La normativa italiana continua ad aggiornarsi, ma in sostanza diventa sempre più vicina agli Eurocodici, che devono costituire il principale riferimento dell'ingegnere. Le novità fornite dal metodo degli stati limite sono ormai state acquisite per gli argomenti base, ma c'è ancora tanto da studiare per approfondire gli aspetti meno comuni. Questo libro, se da un lato vuole rassicurare mostrando la continuità e progressività dal passato (tensioni ammissibili) al presente (stati limite), dall'altro vuole aiutare ad affrontare argomenti un po' più specialistici, come la verifica a pressoflessione di un'asta, quindi in presenza di instabilità flessionale, la modellazione e l'influenza dell'instabilità locale delle parti di una sezione e dell'instabilità latero-torsionale di un'asta. La presenza di numerosi esempi numerici svolti consente di affrontare più concretamente questi argomenti e di cogliere più chiaramente il modo di procedere secondo la normativa attuale, italiana ed europea. Il testo può quindi essere un utile supporto sia per gli studenti che per i professionisti che operano nel campo della progettazione strutturale.

Fondazione Promozione Acciaio è Ente esperto e riconosciuto quale punto di riferimento per le costruzioni e le infrastrutture in acciaio in Italia. La Fondazione rappresenta tutta la filiera delle costruzioni in acciaio, dalla produzione alla messa in opera: un mirato approccio di sistema ci permette di mettere a comun denominatore le singole eccellenze a servizio di opere innovative, sicure e di qualità. L'intensa attività educativa e culturale, la consulenza tecnico-normativa e l'aggiornamento specialistico, contribuiscono alla formazione di ingegneri, architetti, uffici tecnici, studenti e operatori del settore, rendendo accessibili conoscenze e competenze, accrescendo la qualità della progettazione e allargando la base dei professionisti che oggi creano in acciaio. L'acciaio strutturale in Italia ha raddoppiato il suo utilizzo in edilizia in 10 anni: dal 18% nel 2005 al 33% nel 2015, dati che evidenziano come i committenti pubblici e privati si stiano orientando sempre di più verso prodotti di qualità e più competitivi al servizio di soluzioni di rapida realizzazione, economiche e ad alta redditività. La carpenteria metallica, con livelli e standard qualitativi elevati e tecnologie all'avanguardia, è un'opportunità per il mercato delle costruzioni in evoluzione poiché soddisfa le richieste di sicurezza, flessibilità, durabilità, prefabbricazione, riduzione dei tempi e dei costi, qualità estetica e prestazionale e riciclo dei materiali a sostegno di un'economia circolare. Per ulteriori informazioni: www.promozioneacciaio.it

Aurelio Gherzi (1951). Professore ordinario di Tecnica delle costruzioni presso l'Università di Catania.

Edoardo M. Marino (1971). Professore associato di Tecnica delle costruzioni presso l'Università di Catania.

Pier Paolo Rossi (1967). Professore associato di Tecnica delle costruzioni presso l'Università di Catania.

Francesca Barbaglio (1989). Assegnista di ricerca presso l'Università di Catania.

In copertina

Foto principale:

Ristrutturazione complesso industriale Brin69, Napoli - © Vulcanica Studio Associato di Architettura

Foto secondarie - dall'alto in basso:

Herma Parking, Corea del Sud - © JOHO Architecture

Ex Istituto Sieroterapico, Milano - © Dante Q. Benini & Partners

Skylink Aeroporto Internazionale di Francoforte, Germania - © Stahlbau Pichler srl



9 788857 908793
DF 0879 € 19,00

Collana Acciaio

serie Monografie

9

**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**

Aurelio Gheresi - Edoardo M. Marino - Pier Paolo Rossi - Francesca Barbagallo

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

ISBN 9788857908793

© 2018 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686
www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Seconda Edizione: ottobre 2018

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, ottobre 2018

Una pubblicazione di:



Fondazione Promozione Acciaio
Via Vivaio, 11
20122 Milano – Italia
Tel. 02.86313020
info@fpacciaio.it
www.promozioneacciaio.it

Fondazione Promozione Acciaio ringrazia sentitamente il prof. Gheresi per averle dato occasione di accogliere il presente testo nella collana “Acciaio”, promuovendo un tema di notevole interesse.

In copertina

Foto principale:

Ristrutturazione complesso industriale Brin69, Napoli

© Vulcanica Studio Associato di Architettura

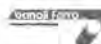
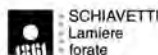
Foto secondarie – dall’alto in basso:

Herma Parking, Corea del Sud - © JOHO Architecture

Ex Istituto Sieroterapico, Milano - © Dante O. Benini & Partners

Skylink Aeroporto Internazionale di Francoforte, Germania - © Stahlbau Pichler srl

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





Fondazione

Promozione Acciaio

Fondazione Promozione Acciaio (FPA) è l'Ente culturale che promuove lo sviluppo delle costruzioni e delle infrastrutture in acciaio in Italia.

È stata fondata nel gennaio 2005 per contribuire attivamente all'innovazione e alla competitività del comparto delle costruzioni diffondendo e valorizzando gli aspetti progettuali e tecnologico-costruttivi che differenziano la carpenteria metallica dagli altri sistemi costruttivi, ponendosi come obiettivo il progressivo innalzamento della qualità del prodotto edilizio con evidenti benefici sulla sicurezza e nella razionalizzazione dei costi.

L'attività di Fondazione Promozione Acciaio si fonda su un accrescimento a 360° della cultura delle costruzioni in acciaio, strumento per un'edilizia nuova, più razionale, più sicura e consolidata a livello mondiale.

La Fondazione realizza numerose attività formative in collaborazione con gli Ordini Professionali, con le Università e con le Istituzioni, per far crescere la qualità nella progettazione e per allargare la base dei professionisti capaci di progettare in acciaio. **L'intensa attività educativa e culturale e l'aggiornamento specialistico contribuiscono alla formazione di ingegneri, architetti e studenti, rendendo accessibili conoscenze e competenze sulla progettazione e sulla realizzazione di opere in acciaio.**

L'Ufficio Tecnico della Fondazione fornisce assistenza tecnica, scientifica e normativa a chi già sviluppa e progetta costruzioni in carpenteria metallica o anche solo a chi desidera ampliare le proprie conoscenze professionali.

La Fondazione sviluppa una serie di strumenti volti a fornire informazioni altamente specializzate a tutti gli operatori del settore delle costruzioni:

- 120 i manuali di progettazione e le dispense tecniche all'attivo
- Architetture in Acciaio, la rivista italiana dell'architettura in acciaio (free press anche in versione web)
- indagini comparative e studi di mercato
- marketing e ufficio stampa: newsletter periodiche di comunicazione con il mercato di riferimento e collaborazioni con testate e portali web
- 90.000 gli utenti / mese al portale web, un luogo di servizi a supporto della professione dove è possibile reperire tutte le informazioni sui prodotti in acciaio e sulle tecnologie costruttive

Per tutte le informazioni www.promozioneacciaio.it

Gli autori

Aurelio Ghersi (1951). Professore ordinario di Tecnica delle costruzioni presso l'Università di Catania. Ha tenuto corsi di Progetto di strutture, Costruzioni in zona sismica, Tecnica delle costruzioni per Ingegneria civile, edile, edile-architettura, strutturale e geotecnica e Architettura. Ha coordinato lezioni in numerosi corsi di aggiornamento professionale. È autore di numerosi articoli scientifici ed ha pubblicato libri sull'analisi strutturale, sul progetto di strutture antisismiche, sul progetto di elementi strutturali in cemento armato e di elementi strutturali in acciaio formati a freddo. Per Dario Flaccovio ha pubblicato "Il cemento armato", "Edifici antisismici in cemento armato", "Edifici in muratura".

Edoardo M. Marino (1971). Professore associato di Tecnica delle costruzioni presso l'Università di Catania e Dottore di ricerca in Ingegneria delle strutture. È stato docente di Tecnica delle costruzioni per i corsi di Laurea in Ingegneria edile-architettura ed Architettura, nonché di Progetto di strutture in zona sismica per il corso di laurea in Ingegneria civile strutturale e geotecnica, ed in numerosi corsi di aggiornamento. Ha coordinato e/o partecipato a progetti di ricerca di rilevanza nazionale ed internazionale su strutture in acciaio ed antisismiche. È autore di numerosi articoli scientifici pubblicati su riviste nazionali ed internazionali.

Pier Paolo Rossi (1967). Professore associato di Tecnica delle costruzioni presso l'Università di Catania e Dottore di ricerca in Ingegneria delle strutture. È stato docente di Tecnica delle costruzioni per il corso di Laurea in Architettura, nonché di Progetto di strutture e Ponti e grandi strutture per il corso di laurea in Ingegneria civile strutturale e geotecnica, ed in numerosi corsi di aggiornamento. Ha coordinato e/o partecipato a progetti di ricerca di rilevanza nazionale ed internazionale su strutture in acciaio ed antisismiche. È autore di numerosi articoli scientifici pubblicati su riviste nazionali ed internazionali.

Francesca Barbagallo (1989). Dottore di ricerca in Valutazione e mitigazione dei rischi urbani e territoriali ed assegnista di ricerca presso l'Università di Catania. Da due anni è docente a contratto del Laboratorio di Tecnica delle Costruzioni per il corso di Laurea in Ingegneria edile-architettura. La sua attività di ricerca, svolta nel campo degli edifici in zona sismica e delle strutture in acciaio, ha trovato collocazione anche su riviste internazionali.

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 Gheresi

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

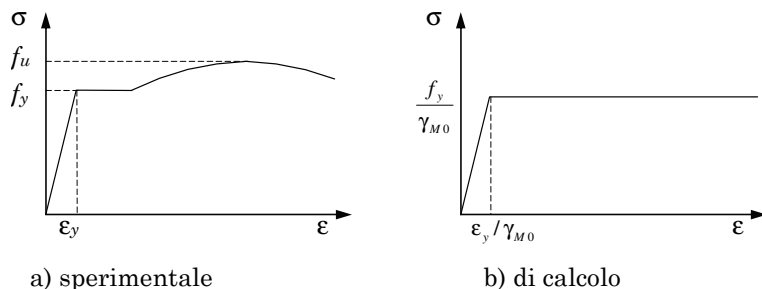


Fig. 1. Legami costitutivi dell'acciaio

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).

3. Elementi strutturali in acciaio

Essendo l'acciaio un prodotto industriale, esso viene utilizzato per realizzare mediante laminazione a caldo elementi di dimensioni standardizzate, ottenuti facendo passare le billette in acciaio attraverso sagome (profili) predefinite. Per questo motivo si parla usualmente di profili *laminati a caldo*. Le forme comunemente usate sono le seguenti.

– *Profili a doppio T*

Sono comunemente utilizzati per travi e colonne di telai. Si distinguono in profili IPE e HE. I primi hanno (tendenzialmente) un'altezza totale pari al doppio della larghezza dell'ala, i secondi un'altezza pari alla larghezza. Oltre alle serie standard (IPE, HE B) sono disponibili serie alleggerite (IPE A, IPE AA, HE A, HE AA), delle quali sono di comune uso soprattutto le A e serie pesanti (IPE O, HE M), poco utilizzate. Sono individuati mediante una sigla che indica il tipo e l'altezza in mm, riferita alla serie base. Ad esempio: HE B 300.

– *Profili a U e a L*

Sono comunemente utilizzati come aste per travature reticolari. I profili ad U (detti anche a C) sono distinti in UPE ed UPN, i primi con ala a spessore costante, i secondi con spessore variabile, e sono individuati mediante una sigla costituita dal nome e dall'altezza in mm. Ad esempio UPE 180. I profili ad L (detti anche angolari) possono essere ad ali di lunghezza uguale o diversa e sono individuati mediante una sigla costituita dalla lettera L e da tre dimensioni (lunghezza delle due ali e spessore) in mm. Ad esempio: L×180×120×10.

– *Profili chiusi*

Sono comunemente utilizzati come aste soggette a compressione o a pressoflessione, ma anche gli unici utilizzati in presenza di rilevante torsione. Possono essere tubolari (cioè con sezione circolare) o scatolari (cioè con sezione quadrata o rettangolare).

– *Lamiere e piatti*

Sono elementi piani, comunemente utilizzati per ritagliare pezzi da usare per i collegamenti, oppure saldati insieme per formare

profili a doppio T di dimensioni superiori a quelle dei profilati standard.

Oltre ai profili laminati a caldo sono disponibili elementi ottenuti piegando a freddo lamiere sottili. A causa del ridotto spessore sono particolarmente sensibili al fenomeno dell'instabilità locale, del quale si parla diffusamente nel capitolo 7. Le forme comunemente usate sono le seguenti.

– *Lamiere grecate*

Sono generalmente utilizzate per solai di calpestio o di copertura. Nel primo caso sono di norma accoppiate ad una soletta in calcestruzzo con una rete di armatura. Nel secondo caso sono fornite in un pacchetto che in genere comprende isolamento termico ed impermeabilizzazione.

– *Profili sottili strutturali*

Sono comunemente utilizzati come elementi strutturali secondari. Usualmente hanno forma ad U o ad L, ma sono possibili anche forme ad omega o a Z. Spesso presentano alle estremità libere delle pieghe che ne irrigidiscono i bordi e limitano il fenomeno dell'instabilità locale. Due profili ad U possono essere accoppiati dorso a dorso per ottenere l'equivalente di un profilo a doppio T.

4. Modellazione e criteri di verifica

Il fatto che l'acciaio presenti un comportamento elastico lineare fino al raggiungimento dello snervamento ha fatto sì che nel passato si adottasse un criterio di verifica denominato metodo delle tensioni ammissibili. Tale metodo si basa sull'uso di un modello lineare e mira a controllare che non si superi la cosiddetta tensione ammissibile $\bar{\sigma}$. Quest'ultima ha un valore nettamente inferiore a quella di snervamento, determinata mediante prova di trazione, in modo da garantire un adeguato coefficiente di sicurezza. In presenza di tensioni normali σ e tensioni tangenziali τ si adottava il criterio di resistenza di Mises, che considera una tensione ideale

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \tau^2} \quad (1)$$

e la confronta con il limite indicato.

L'approccio attuale tende a considerare il comportamento del materiale oltre il limite elastico e fino all'esaurimento delle risorse plastiche, con le verifiche allo stato limite ultimo. In questo caso si simula usualmente il comportamento dell'acciaio mediante un legame elastico perfettamente plastico (Fig. 1b), con un tratto orizzontale senza limiti deformativi, che può consentire, in determinate situazioni, la completa plasticizzazione della sezione. Si utilizza come limite il valore di calcolo della tensione di snervamento f_y/γ_{M0} ottenuto dividendo f_y per il coefficiente parziale di sicurezza γ_{M0} , conformemente all'impostazione del metodo degli stati limite. Il legame trascura a favore di sicurezza il fenomeno dell'incrudimento perché esso avviene per deformazioni molto alte, sicuramente incompatibili con la struttura. L'incrudimento è però accettato e considerato nei calcoli quando la verifica si riferisce a porzioni molto piccole dell'elemento strutturale, perché le forti deformazioni in zone limitate hanno scarso effetto sull'intera struttura. È questo il caso della verifica delle sezioni forate e dei collegamenti, per i quali si accetta il raggiungimento del valore di calcolo della tensione ultima f_{u}/γ_{M2} .

La normativa italiana (punto 4.2.4.1.2) consente il procedimento innanzi detto, indicato come verifica allo stato plastico, prescrivendo come valori dei coefficienti di sicurezza parziale $\gamma_{M0} = 1.05$ e $\gamma_{M2} = 1.25$. Ulteriori verifiche allo stato limite ultimo richieste dalla normativa italiana (punto 4.2.4.1.3) sono quelle tese a scongiurare l'instabilità dell'asta. In questo caso, il valore caratteristico della tensione di snervamento viene ridotto attraverso il coefficiente di sicurezza parziale γ_{M1} che vale 1.05, come γ_{M0} .

La normativa italiana consente anche, in alternativa, una verifica in campo elastico che prevede la valutazione dello stato tensionale con un modello lineare, l'uso della formula di Mises riportata come equazione (1) ed il confronto tra la tensione ideale ed il valore di calcolo della tensione di snervamento dell'acciaio. Questo procedimento è sicuramente cautelativo ma comporta un incremento dei

costi strutturali e quindi, a parere di chi scrive, può aver senso utilizzarlo solo nei casi in cui la verifica sia tanto complessa da rendere poco agevole l'individuazione del comportamento della sezione pienamente plasticizzata.

5. Peculiarità delle strutture in acciaio

5.1. Elevata resistenza del materiale

Un primo aspetto che caratterizza le strutture in acciaio è il fatto che il materiale acciaio presenta una resistenza nettamente più grande rispetto agli altri materiali per uso strutturale, ad esempio, il calcestruzzo o la muratura. Ciò è per molti aspetti vantaggioso, perché consente l'adozione di sezioni più piccole e leggere. La riduzione del peso strutturale è particolarmente utile per le situazioni in cui il peso proprio è preponderante rispetto al carico portato, ad esempio per i ponti di grande luce oppure per i grattacieli.

Nelle strutture in acciaio, a causa della grande resistenza del materiale, diventano però fondamentali alcuni aspetti che normalmente sono irrilevanti nelle strutture in cemento armato e muratura.

- Forte deformabilità delle aste inflesse, per le quali la verifica allo stato limite di spostamenti o vibrazioni in esercizio diventa molto spesso più condizionante della verifica di resistenza allo stato limite ultimo.
- Forte snellezza delle aste compresse, che devono essere quindi sempre verificate nei confronti dell'instabilità flessionale (Euleriana).
- Ulteriori problemi di instabilità a tutti i livelli, dall'instabilità globale del telaio ad instabilità flesso-torsionale o torsionale delle singole aste, fino all'instabilità locale delle porzioni compresse della sezione trasversale di un'asta.
- Rischio di inversione del carico verticale in presenza di vento, cioè la possibilità che la pressione verso l'alto dovuta al vento sia maggiore del carico verticale; ciò è particolarmente preoccupante nelle travature reticolari, perché l'inversione del segno del carico

provoca compressione (e quindi rischio di instabilità) in aste normalmente progettate a trazione.

5.2. Modalità di assemblaggio della struttura

Le strutture in acciaio sono sempre costituite dall'assemblaggio di singoli elementi. Il progetto dei collegamenti diventa un aspetto fondamentale, e a volte critico, nell'ambito dell'attività progettuale. Ciò è chiaro fin dall'esame degli elaborati grafici, che devono esaminare separatamente:

- il lavoro in officina (taglio, foratura, saldatura dei pezzi) che deve portare alla realizzazione di elementi (aste e piatti di collegamento) perfettamente idonei al successivo montaggio;
- la fase di montaggio, con le sequenze progressive di collegamenti da effettuare in cantiere.

Le scelte progettuali che si effettuano nel suddividere una struttura in più elementi da realizzare in officina, spesso mediante saldatura di più parti, ed il loro successivo assemblaggio in cantiere hanno forti ricadute sul costo dell'opera ma devono tener conto di numerosi aspetti, come quelli di seguito elencati.

- Dimensione massima degli elementi, tenendo conto della necessità di trasportarli dall'officina al cantiere.
- Semplicità ed economicità del singolo collegamento, che spingerebbe verso collegamenti a cerniera.
- Influenza dei collegamenti sul grado di iperstaticità della struttura. Collegamenti a cerniera spingono verso strutture isostatiche (o quasi) con grandi semplificazioni per il calcolo della struttura. Tuttavia, contemporaneamente, la riduzione del grado di iperstaticità mina la *robustezza* della struttura, cioè la sua capacità di superare situazioni impreviste. Basti pensare che in uno schema isostatico il cedimento di un collegamento porta al crollo, mentre in uno schema iperstatico vi è sempre la possibilità di una redistribuzione delle azioni.

5.3. Altre problematiche specifiche

Le strutture in acciaio presentano alcuni problemi che richiedono specifici interventi. Il primo aspetto da considerare è quello della

corrosione. Una semplice verniciatura può già garantire una certa protezione, ma ciò richiederebbe successivi interventi in tempi relativamente brevi. Il modo migliore per prevenire la corrosione è la zincatura, che crea un'alterazione superficiale del materiale, dovuta alla reazione tra acciaio e zinco, che garantisce una protezione per lungo periodo. Un altro aspetto specifico è quello della resistenza al fuoco, perché le alte temperature che si sviluppano in caso d'incendio provocano un peggioramento delle caratteristiche meccaniche ed in particolare una forte riduzione del modulo elastico. Ciò può rendere possibile l'instabilità di aste compresse fino al crollo complessivo della struttura. In questo caso, l'uso di vernici intumescenti può essere di aiuto. Tuttavia, più spesso si tende ad usare rivestimenti che garantiscono maggiore sicurezza ma contemporaneamente hanno un maggiore impatto estetico sulla struttura.

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 ($M_1=0$ ed $M_2=0$) 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

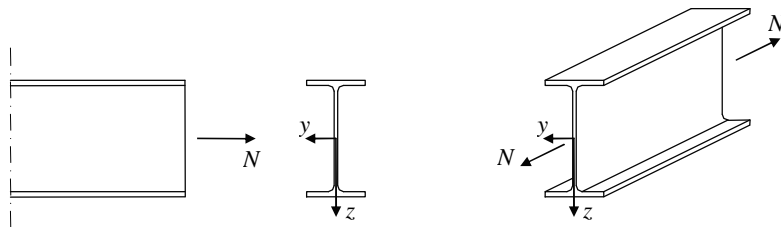


Fig. 1. Sezione soggetta a sforzo normale centrato

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



Acquistalo