

**Manuale di progettazione per  
strutture in acciaio inossidabile**  
(Terza Edizione)

© 2006 Euro Inox e The Steel Construction Institute

2-87997-206-X  
2-87997-039-3 (Prima Edizione)

Euro Inox e The Steel Construction Institute hanno fatto ogni sforzo per far sì che le informazioni presentate siano tecnicamente corrette. In ogni caso, si avvisa il lettore che il materiale qui contenuto è presentato unicamente per informazione generale. Euro Inox, The Steel Construction Institute e tutti coloro che hanno fornito contributi non rispondono di qualunque danno o perdita causata dall'impiego delle informazioni contenute in questa pubblicazione.

ISBN 2-87997-187-X	CD-ROM
ISBN 2-87997-204-3	versione inglese
ISBN 2-87997-205-1	versione francese
ISBN 2-87997-207-8	versione spagnola
ISBN 2-87997-208-6	versione finlandese
ISBN 2-87997-209-4	versione svedese
ISBN 2-87997-210-8	versione tedesca

# PREFAZIONE

## Terza edizione

Questa Terza Edizione del Manuale di Progettazione è stata redatta dallo Steel Construction Institute come risultato del progetto di ricerca FRAC *Progetto di valorizzazione – Progettazione strutturale in acciaio inossidabile lavorato a freddo* (contratto RFS2-CT-2005-00036). Si tratta di una revisione completa della Seconda Edizione con lo scopo di includere gli acciai inossidabili austenitici lavorati a freddo e aggiornare tutti i riferimenti alle nuove versioni degli Eurocodici. Questa terza Edizione fa riferimento alle parti principali delle EN 1990, EN 1991 ed EN 1993. L'approccio della progettazione strutturale al fuoco nel Cap. 7 è stato aggiornato e sono state inserite nuove sezioni sulla durabilità dell'acciaio inossidabile in strutture interrato e sulla valutazione del costo del ciclo di vita della struttura (*life cycle costing*).

Tre nuovi esempi di progettazione sono stati aggiunti per mostrare l'uso appropriato dell'acciaio inossidabile. Questi sono stati completati dai seguenti partner del suddetto progetto FRAC:

- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
- The Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
- Technical Research Centre of Finland (VTT)

Un comitato di verifica progettuale, composto dai rappresentanti di ogni partecipante, subcontraenti ed organismi finanziatori, ha offerto la sua supervisione ai lavori ed ha contribuito alla redazione del manuale. Le seguenti organizzazioni hanno partecipato alla stesura di questa Terza Edizione:

- The Steel Construction Institute (SCI) (coordinatore del progetto)
- Centro Sviluppo Materiali (CSM)
- CUST, University of Blaise Pascale
- Euro Inox
- RWTH Aachen Institute of Steel Construction
- Technical Research Centre of Finland (VTT)
- The Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

## Seconda edizione

Questo manuale di progettazione è stato redatto dallo Steel Construction Institute per essere pubblicato come risultato del programma finanziato dalla CECA "*Progetto di valorizzazione - Sviluppo dell'uso di acciaio inossidabile in edilizia*" (contratto 7215-PP-056) e costituisce una revisione completa del *Manuale di progettazione per strutture in acciaio inossidabile* preparato dallo stesso Istituto fra il 1989 ed il 1992 e pubblicato da Euro Inox nel 1994.

Questa nuova edizione tiene conto dei progressi delle conoscenze in tema di comportamento delle strutture in acciaio inossidabile nell'ultimo decennio ed, in particolare, sono stati inseriti i nuovi suggerimenti di progettazione del progetto finanziato dalla CECA e

recentemente concluso, *Sviluppo dell'uso di acciaio inossidabile nell'edilizia* (contratto 7210-SA/842), che è stato ampliato con l'inserimento del progetto di strutture resistenti al fuoco. Negli ultimi 10 anni sono state emesse nuove norme europee sugli acciai inossidabili, sui collegamenti, sulla produzione, sul montaggio, sulle saldature, ecc. Questo manuale è stato aggiornato alle normative attuali ed ai dati in esse precisati.

Un comitato di verifica progettuale, composto dai rappresentanti di ogni partecipante, subcontraenti ed organismi finanziatori, ha offerto la sua supervisione ai lavori ed ha contribuito alla redazione del manuale.

Gli esempi riportati sono stati effettuati presso i seguenti partecipanti:

- Istituto di Tecnologia di Luleå;
- Centro di Ricerca Tecnica della Finlandia (VTT);
- RWTH di Aachen;
- Centre Technique Industrial de la Construction Métallique (CTICM)
- The Steel Construction Institute (SCI)

Sono stati membri del comitato direttivo e/o hanno redatto gli esempi di progetto:

Nancy Baddoo	The Steel Construction Institute
Massimo Barteri	Centro Sviluppo Materiali (CSM)
Bassam Burgan	The Steel Construction Institute
Helena Burstrand Knutsson	Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
Lars Hamrebjörk	Swedish Institute of Steel Construction (SBI)
Jouko Kouhi	Technical Research Centre of Finland (VTT)
Roland Martland	Health and Safety Executive (UK)
Enrique Mirambell	Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Anders Olsson	AvestaPolarit AB (publ) (ex Luleå Institute of Technology)
Thomas Pauly	Euro Inox
Esther Real	Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Ivor Ryan	Centre Technique Industrial de la Construction Métallique
Heiko Stangenberg	RWTH Aachen Institute of Steel Construction
Asko Talja	Technical Research Centre of Finland (VTT)

## **RINGRAZIAMENTI**

Si ringraziano vivamente i seguenti organismi per il loro sostegno finanziario al progetto:

- Fondo di Ricerca per l'Acciaio ed il Carbone (FRAC) (ex Comunità Europea del Carbone e dell'Acciaio (CECA))
- Euro Inox
- Health and Safety Executive (Regno Unito)
- Outokumpu Stainless Oy.

# PREMESSA

Questo manuale è stato preparato per guidare ingegneri esperti nella progettazione di strutture in acciaio in generale, non necessariamente solo inossidabile. Non deve considerarsi assolutamente come pubblicazione di carattere ufficiale, né come testo in grado di esimere i progettisti dalla loro responsabilità di garantire, nei risultati, la sicurezza e la funzionalità delle strutture.

Il manuale è diviso in due parti:

- Parte I            Raccomandazioni
- Parte II          Esempi di Progettazione

Le raccomandazioni della Parte I sono formulate secondo la filosofia degli stati limite ed, all'occorrenza, si adeguano a quelle delle seguenti Parti dell'Eurocodice 3, *Progettazione delle strutture in acciaio*:

EN 1993-1-1	<i>Progetto di strutture in acciaio: norme generali sugli edifici</i>
EN 1993-1-2	<i>Progetto di strutture in acciaio: strutture anti-incendio</i>
EN 1993-1-3	<i>Progetto di strutture in acciaio: elementi e lamiere sottili formati a freddo</i>
EN 1993-1-4	<i>Progetto di strutture in acciaio: acciai inossidabili</i>
EN 1993-1-5	<i>Progetto di strutture in acciaio: elementi strutturali a piastra</i>
EN 1993-1-8	<i>Progetto di strutture in acciaio: giunti e collegamenti</i>
EN 1993-1-9	<i>Progetto di strutture in acciaio: resistenza alla fatica</i>
EN 1993-1-10	<i>Progetto di strutture in acciaio: qualifica dei materiali per tenacità alla frattura</i>

Questo Manuale fornisce per alcuni fattori solo valori raccomandati, che possono essere soggetti a modifica a livello nazionale attraverso Documenti Nazionali di Applicazione.

Gli Esempi di Progettazione contenuti nella Parte II mostrano come devono utilizzarsi le Raccomandazioni. Un sistema di riferimenti incrociati individua il capitolo degli esempi corrispondente alla raccomandazione in oggetto.

Le Raccomandazioni e gli Esempi di Progettazione sono disponibili on-line presso Steelbiz ([www.steelbiz.org](http://www.steelbiz.org)) e sul sito web di Euro Inox ([www.euro-inox.org](http://www.euro-inox.org)). Un Commento alle Raccomandazioni, che include un insieme completo di riferimenti, è inoltre disponibile on-line su questi siti. Lo scopo del Commento alle Raccomandazioni è consentire al progettista di valutare i fondamenti delle raccomandazioni e facilitare lo sviluppo di revisioni non appena nuovi dati si rendano disponibili. Con l'occasione, vengono presentati i risultati di varie campagne sperimentali condotte specificatamente per fornire una base di dati sperimentali al Manuale. Le Raccomandazioni, gli Esempi di Progettazione e il Commento alle Raccomandazioni sono anche disponibili su un CD edito da Euro Inox.

Uno strumento di progettazione on-line è inoltre disponibile al link [www.steel-stainless.org/software](http://www.steel-stainless.org/software) per la progettazione di membrature in acciaio inossidabile formate a freddo soggette a tensione assiale, compressione assiale o flessione. Lo strumento di progettazione calcola le proprietà della sezione e la resistenza delle membrature in accordo con le raccomandazioni contenute in questo Manuale di Progettazione.

Le raccomandazioni di progettazione presentate in questo manuale si fondano sulle migliori conoscenze a disposizione all'atto della pubblicazione. Comunque, da parte dei partecipanti al progetto e degli altri partecipanti alla redazione del manuale, non si assume alcuna responsabilità per lesioni personali, morti, perdite, danni o ritardi, comunque causati, per l'uso dei suggerimenti contenuti in questo manuale.





# INDICE

PREFAZIONE		iii
RINGRAZIAMENTI		v
PREMESSA		vi
<b>PARTE I - Raccomandazioni</b>		
<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
1.1	Scopo	1
1.2	Simboli	1
1.3	Convenzione per gli assi delle membrature	3
1.4	Unità di misura	3
<b>2</b>	<b>PRINCIPI DI PROGETTAZIONE</b>	<b>5</b>
2.1	Requisiti generali	5
2.2	Progettazione agli stati limite	5
2.3	Carichi	7
<b>3</b>	<b>MATERIALI: PROPRIETA', SCELTA E DURABILITA'</b>	<b>11</b>
3.1	Qualità dei materiali	11
3.2	Comportamento meccanico e valori di progetto delle caratteristiche meccaniche	16
3.3	Proprietà fisiche	21
3.4	Effetti della temperatura	22
3.5	Life cycle costing	22
3.6	Scelta dei materiali	23
3.7	Durabilità	26
<b>4</b>	<b>PROPRIETA' DELLE SEZIONI TRASVERSALI</b>	<b>35</b>
4.1	Generalità	35
4.2	Rapporti massimi larghezza/spessore	35
4.3	Classificazione delle sezioni trasversali	35
4.4	Larghezze efficaci	39
4.5	Elementi irrigiditi	44
4.6	Calcolo delle proprietà delle sezioni	48
4.7	Resistenza delle sezioni	50
<b>5</b>	<b>PROGETTO DELLE MEMBRATURE</b>	<b>55</b>
5.1	Introduzione	55
5.2	Membrature soggette a trazione	55
5.3	Membrature soggette a compressione	55
5.4	Membrature soggette a flessione	59
5.5	Membrature soggette alla combinazione di carichi assiali e momenti flettenti	70
<b>6</b>	<b>PROGETTO DEI COLLEGAMENTI</b>	<b>73</b>
6.1	Raccomandazioni generali	73
6.2	Giunti bullonati	75
6.3	Viti autofilettanti	80
6.4	Giunti saldati	80

<b>7</b>	<b>PROGETTO DI STRUTTURE RESISTENTI AL FUOCO</b>	<b>85</b>
7.1	Generalità	85
7.2	Proprietà meccaniche ad elevata temperatura	85
7.3	Proprietà termiche ad elevata temperatura	88
7.4	Determinazione della resistenza al fuoco delle strutture	89
<b>8</b>	<b>FATICA</b>	<b>97</b>
<b>9</b>	<b>PROVE</b>	<b>98</b>
9.1	Generalità	98
9.2	Determinazione della curva sforzo/deformazione	98
9.3	Prove su membrature	98
<b>10</b>	<b>ASPETTI DELLA FABBRICAZIONE</b>	<b>100</b>
10.1	Introduzione	100
10.2	Immagazzinamento e movimentazione	100
10.3	Operazioni di formatura	101
10.4	Saldatura	103
10.5	Grippaggio	108
10.6	Finitura	108
	<b>APPENDICE A – Relazione fra le designazioni degli acciai inossidabili</b>	<b>111</b>
	<b>APPENDICE B - Snellezza <math>\lambda_{LT}</math> per instabilità laterale-torsionale</b>	<b>113</b>
	B.1 Caso generale	113
	B.2 Casi particolari	116
	<b>APPENDICE C – Caratteristiche dei materiali per il calcolo degli spostamenti</b>	<b>117</b>
	<b>PARTE II - Esempi di progettazione</b>	<b>119</b>
	1 - Colonna a sezione circolare cava (CHS)	121
	2 - Colonna saldata con sezione trasversale ad H e vincoli laterali	123
	3 - Dimensionamento della lamiera grecata per una copertura a due luci	127
	4 – Resistenza a fatica di un giunto saldato tra elementi cavi	135
	5 – Giunto saldato	139
	6 – Giunto bullonato	147
	7 – Resistenza a taglio di una trave alta	153
	8 – Resistenza di una trave ai carichi concentrati	159
	9 – Trave con la flangia compressa non vincolata	165
	10 – Colonna con carico assiale in caso d' incendio	173
	11 - Dimensionamento della lamiera grecata per una copertura a due luci	181
	12 – Trave a C formata a freddo per una pavimentazione esterna	187
	13 – Travatura reticolare composta da elementi cavi	195

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 Scopo

I suggerimenti di questa parte del manuale valgono per specifici tipi di acciai inossidabili impiegati nelle strutture. Servono principalmente per il progetto di elementi e di componenti strutturali secondari per edifici, installazioni offshore e analoghe. Non devono utilizzarsi per strutture particolari, tipo quelle per gli impianti nucleari per i quali già esistono norme specifiche per l'impiego dell'acciaio inossidabile.

I suggerimenti riguardano aspetti del comportamento del materiale, la progettazione di elementi profilati a freddo e saldati ed i loro collegamenti. Valgono per gli acciai inossidabili di tipo austenitico e duplex, che sono impiegati solitamente per applicazioni strutturali o architettoniche. Le raccomandazioni sono state confermate esclusivamente per materiali con carico di snervamento nominale  $f_y$  inferiore a 480 N/mm<sup>2</sup>. Resistenze maggiori possono essere considerate nella progettazione se il progetto viene opportunamente corredato da apposite prove. I suggerimenti sono stati formulati usando il metodo degli stati limite.

## 1.2 Simboli

In generale i simboli usati in questo Manuale sono gli stessi usati nell'Eurocodice 3, EN 1993-1-1, *Progetto di strutture in acciaio*, Parte 1.1, *Norme generali*. E' stato fatto largo uso di indici, come ad es.  $N_{b,z,Rd}$  è la resistenza di progetto (indice  $Rd$ ) di un pilastro soggetto ad un carico assiale ( $N$ ) di instabilità (indice "b") rispetto all'asse minore (indice "z").

Dimensioni ed assi delle sezioni sono illustrati in fig.1.1. Occorre ricordare che, a differenza della normale pratica di molti paesi, l'asse maggiore di una sezione è di solito quello indicato con "y-y" e quello minore con "z-z", si veda il Cap. 1.3.

### Lettere latine maiuscole

$A$	azione eccezionale, area
$C$	valore fissato, coefficiente
$E$	modulo di elasticità, effetto delle azioni
$F$	azione, forza
$G$	azione permanente, modulo di elasticità tangenziale
$I$	momento d'inerzia
$L$	lunghezza, campata
$M$	momento flettente
$N$	forza assiale
$Q$	azione variabile
$R$	resistenza
$V$	azione di taglio
$W$	modulo di resistenza

### Lettere greche maiuscole

$\Delta$	differenza in.... (precede il simbolo principale)
----------	---

### Lettere latine minuscole

<i>a</i>	distanza tra elementi di rinforzo; larghezza della sezione di gola dei cordoni di saldatura
<i>b</i>	larghezza, ampiezza
<i>c</i>	distanza; sporgenza
<i>d</i>	diametro; profondità
<i>e</i>	eccentricità; spostamento dell'asse neutro, distanza dal bordo; distanza dall'estremità
<i>f</i>	resistenza di un materiale
<i>g</i>	intervallo
<i>h</i>	altezza
<i>i</i>	raggio di inerzia; numero intero
<i>k</i>	coefficiente; fattore; lunghezza di schiacciamento
<i>l</i>	lunghezza, campata, lunghezza libera di inflessione
<i>m</i>	costante
<i>n</i>	numero di ...
<i>p</i>	passo; interasse
<i>q</i>	forza uniformemente distribuita
<i>r</i>	raggio; raggio di raccordo
<i>s</i>	passo sfalsato
<i>t</i>	spessore
<i>uu</i>	asse maggiore
<i>vv</i>	asse minore
<i>ww</i>	deformazione per arricciatura
<i>xx,yy,zz:</i>	assi ortogonali

### Lettere greche minuscole

$\alpha$	(alfa)	Rapporto; coefficiente
$\beta$	(beta)	Rapporto; coefficiente
$\gamma$	(gamma)	Coefficiente parziale di sicurezza
$\epsilon$	(epsilon)	Deformazione; Coefficiente = $\left(\frac{235 E}{210000 f_y}\right)^{0.5}$
$\lambda$	(lambda)	rapporto di snellezza (una barra sopra il simbolo indica "parametro adimensionale")
$\rho$	(rho)	Coefficiente di riduzione
$\sigma$	(sigma)	Tensione normale
$\tau$	(tau)	Tensione tangenziale
$\varphi$	(fi)	Rapporto
$\chi$	(chi)	Coefficiente di riduzione (per instabilità)
$\psi$	(psi)	Rapporto tra le tensioni; coefficiente di riduzione

### Indici

<i>a</i>	Valore medio
<i>b</i>	Appoggio, instabilità, bullone
<i>c</i>	Sezione trasversale
<i>cr</i>	Critico
<i>d</i>	Progetto
<i>E</i>	Eulero
<i>eff</i>	Efficace
<i>e</i>	Efficace (con ulteriori indici)
<i>el</i>	Elastico
<i>f</i>	Ala
<i>g</i>	Lordo

$i,j,k$	Indici (in sostituzione di valori numerici)
$k$	Caratteristica
$LT$	Laterale-torsionale
$M$	(riferito a) momento flettente
$N$	(riferito a) forza assiale
$net$	Netto
$o$	Iniziale
$pl$	Plastico
$R$	Resistenza
$r$	Valore ridotto
$S$	Forza interna; momento interno; secante
$s$	Sollecitazione a trazione (area); irrigidimento
$t$	Tensione; trazione; torsione
$u$	Asse principale maggiore della sezione trasversale; ultima
$V$	(riferito a) azione di taglio
$v$	Taglio, asse principale minore della sezione trasversale
$w$	Anima ; saldatura; ingobbamento
$x$	asse lungo la membratura
$y$	Snervamento (valore sperimentale); asse della sezione trasversale (asse maggiore salvo che per sezioni non simmetriche)
$z$	Asse della sezione trasversale (asse minore salvo che per sezioni non simmetriche))
$\sigma$	Tensione normale
$\tau$	Tensione tangenziale

### 1.3 Convenzione per gli assi delle membrature

In generale la convenzione per gli assi delle membrature è la seguente:

$xx-$	secondo la lunghezza della membratura
$yy-$	asse della sezione trasversale perpendicolare all'anima, o all'ala maggiore per sezioni angolari;
$zz-$	asse della sezione trasversale parallelo all'anima, o all'ala maggiore per sezioni in angolari.

L'asse  $yy$  rappresenta normalmente l'asse maggiore della sezione, e quello  $zz$  il minore. Per sezioni angolari non simmetriche gli assi maggiore e minore ( $uu$  e  $vv$ ) sono inclinati rispetto agli assi  $yy$  e  $zz$  (fig.1.1).

La convenzione utilizzata per gli indici che indicano gli assi per i momenti, è la seguente:

*"Si usa l'asse intorno al quale il momento agisce".*

Per esempio, per una sezione ad I il momento flettente agente nel piano dell'anima è definito  $M_y$  perché agisce attorno all'asse della sezione trasversale perpendicolare all'anima.

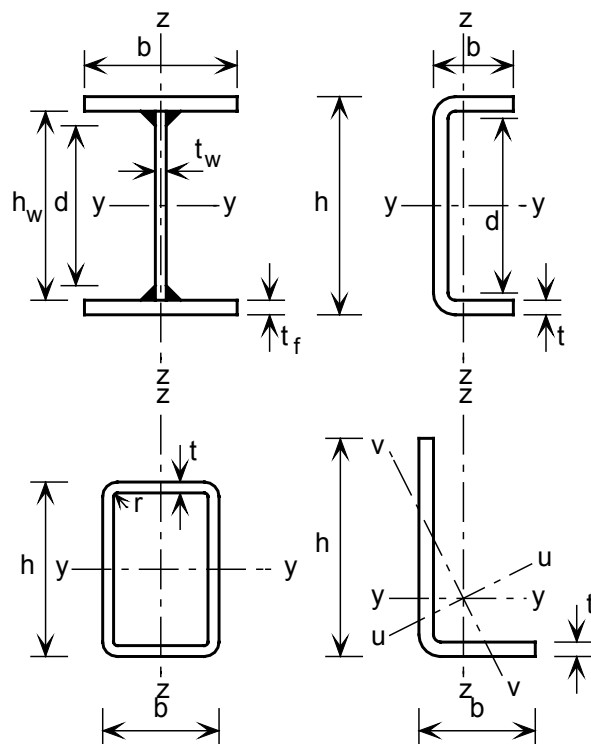
### 1.4 Unità di misura

Si consiglia si usare nei calcoli le seguenti unità di misura:

- Forze e carichi kN, kN/m, kN/m<sup>2</sup>

- Massa specifica  $\text{kg/m}^3$
- Peso specifico  $\text{kN/m}^3$
- Tensioni e resistenze  $\text{N/mm}^2$  (=  $\text{MN/m}^2$  or  $\text{MPa}$ )
- Momento flettente  $\text{kNm}$

Si tenga presente che, secondo la pratica europea il simbolo “,” è utilizzato per separare la parte intera da quella decimale di un numero.



**Figura 1.1** *Dimensioni ed assi delle sezioni*

## 2 PRINCIPI DI PROGETTAZIONE

### 2.1 Requisiti generali

Una struttura deve essere progettata e costruita per:

- Mantenersi integra per tutta la sua durata in servizio
- Sostenere i carichi prevedibili durante la costruzione, la messa in opera e il servizio
- Limitare i danni dovuti ai sovraccarichi eccezionali
- Essere adeguatamente durevole in rapporto ai suoi costi di manutenzione.

Questi requisiti possono essere rispettati se si usano materiali adatti, una appropriata progettazione e definendo e specificando procedure per il controllo della qualità in fase di costruzione ed, all'occorrenza, un programma di manutenzione.

Le strutture devono essere progettate tenendo conto di tutti gli stati limite relativi.

### 2.2 Progettazione agli stati limite

Gli stati limite sono condizioni restrittive che, qualora superate, impediscono alla struttura di rispettare le prestazioni richieste. Sono noti tre tipi di stati limite: stato limite ultimo, stato limite di servizio e stato limite di durabilità. Lo stato limite ultimo è quello che, superato, può causare in tutto o in parte il collasso della struttura e in tal modo pregiudicare la sicurezza delle persone. Lo stato limite di servizio è quello per il quale, se esso viene superato, non possono più essere rispettati particolari requisiti di utilizzo. Lo stato limite di durabilità può considerarsi come un sottoinsieme degli altri due, dipendendo, ad es., dal fatto che la corrosione può pregiudicare la resistenza della struttura o il suo aspetto. Alcuni esempi pertinenti sono di seguito illustrati.

Stato limite ultimo:

- Resistenza (compresi snervamento, rottura, instabilità e formazione di cinematismi)
- Stabilità contro svergolamenti e sbandamenti
- Fratture dovute a fatica

Stato limite di servizio:

- Spostamenti
- Vibrazioni (ad es. indotte dal vento)
- Danni riparabili imputabili alla fatica
- Scorrimento viscoso

Stato limite di durabilità

- Corrosione
- Stabilità metallurgica

### Stato limite ultimo

Per lo stato limite ultimo, deve essere rispettata la seguente relazione:

$$S_d \leq R_d \quad (2.1)$$

dove:

$S_d$  è il valore di progetto delle forze e dei momenti nella membratura o nell'elemento dovuti ai carichi, incrementati secondo i coefficienti di sicurezza, applicati sulla struttura ( $F_d$ , vedi Capitolo 2.3) e

$R_d$  è la corrispondente resistenza di progetto indicata nella relativa appendice di queste raccomandazioni.

La resistenza di progetto  $R_d$ , è normalmente data come  $R_k/\gamma_M$  dove  $R_k$  è la resistenza caratteristica e  $\gamma_M$  è un coefficiente parziale di sicurezza. Il coefficiente parziale  $\gamma_M$  assume diversi valori. La tabella 2.1 fornisce i valori di  $\gamma_M$  da usare con questo Manuale di Progettazione, presi dalla EN 1993-1-4. Deve essere inoltre fatto riferimento al Documento Nazionale di Applicazione (DNA) della norma EN 1993-1-4 relativo al Paese per il quale si sta progettando la struttura, poiché esso potrebbe indicare valori  $\gamma_M$  differenti che devono essere utilizzati al posto dei valori riportati nella tabella 2.1. (Se non è disponibile un DNA, allora i fattori  $\gamma_M$  devono essere concordati con il cliente e con l'autorità competente.)

**Tabella 2.1** Valori raccomandati per  $\gamma_M$

Per la resistenza di:	Simbolo	Valore (EN 1993-1-4)
Sezioni trasversali progettate oltre lo snervamento, compresa instabilità locale	$\gamma_{M0}$	1,10
Membrature progettate all'instabilità mediante prove sulle membrature stesse	$\gamma_{M1}$	1,10
Sezioni tese progettate a rottura	$\gamma_{M2}$	1,25
Bulloni, saldature, perni e alette per le giunzioni	$\gamma_{M2}$	1,25

In alternativa alla determinazione della resistenza di progetto mediante calcoli analitici, è ammessa la prova diretta su materiali, elementi e strutture (in merito, cfr. il Cap.9).

### Stati limite di servizio

La corrispondente relazione per gli stati limite di servizio è:

$$E_d \leq C_d \quad (2.2)$$

dove:

$E_d$  è il valore di progetto di un effetto, ad esempio l'inflexione di una membratura in risposta alle forze ed ai momenti agenti su di essa, a causa di un carico caratteristico applicato sull'elemento  $F_k$  (vedere Cap. 2.3.4), e

$C_d$  è il corrispondente valore ammissibile dell'effetto.



### **Stati limite di durabilità**

Per questi tipi di stati limite occorre considerare i fenomeni di corrosione, trattati nel Cap. 3.7.

## **2.3 Carichi**

### **2.3.1 Generalità**

Negli Eurocodici, il carico è espresso in termini di “azioni”. Una “azione” è definita come:

- Un insieme di forze (carichi) applicate alle strutture (azione diretta)
- Un insieme di deformazioni imposte o accelerazioni causate, ad es., da variazioni di temperatura, variazioni di umidità, assestamenti disomogenei o terremoti (azione indiretta)

I valori caratteristici ( $F_k$ ) delle singole azioni sono precisati:

- in EN 1991, *Azioni sulle strutture*, (che sarà sostituita dalla EN 1991 e Documenti nazionali di Applicazione) o su altre norme relative ai carichi; oppure
- dal cliente, o dal progettista dopo aver consultato il cliente, purché siano rispettati i valori minimi prescritti dalle relative norme per i carichi o dalle Autorità competenti.

I valori di progetto delle singole azioni ( $F_d$ ) si ottengono moltiplicando le azioni caratteristiche per i coefficienti parziali di sicurezza ( $\gamma_F$ ).

In fase di progetto si devono considerare tutte le possibili combinazioni reali delle azioni ed identificarne i casi più gravosi.

### **2.3.2 Stato limite ultimo – Azioni**

Si possono distinguere i seguenti tipi di azione:

- Azioni “permanenti” (G), ad es., peso proprio della struttura, equipaggiamenti, impianti ausiliari e fissi;
- Azioni “variabili” (Q), ad es., carichi imposti, carichi di vento, carichi di neve, azioni causate per effetto della temperatura;
- Azioni “eccezionali” (A), ad es., dovuto ad esplosioni, incendi o urti di veicoli.

La EN 1990 *Principi di Progettazione Strutturale* fornisce combinazioni di carichi da utilizzare nella progettazione di edifici e valori raccomandati per i coefficienti parziali moltiplicatori dei carichi ( $\gamma_F$ ).

Deve essere inoltre fatto riferimento all’ Documento Nazionale di Applicazione (DNA) della norma EN 1990 relativo al Paese per il quale si sta progettando la struttura, poiché esso potrebbe indicare valori  $\gamma_F$  differenti che devono essere utilizzati al posto dei valori raccomandati. Il Documento Nazionale di Applicazione fornisce inoltre valori raccomandati per i fattori di riduzione ( $\psi$ ) delle combinazioni di carichi variabili e ( $\xi$ ) dei carichi permanenti sfavorevoli. (Se un DNA non è disponibile, allora i fattori  $\gamma_F$ ,  $\psi$  e  $\xi$  devono essere concordati con il cliente e l’autorità competente.)

Come riportato nella EN 1990, per impiego normale, cioè in casi che non coinvolgono carichi eccezionali, la combinazione delle azioni può essere espressa come:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{o,i} Q_{k,i} \quad (2.3)$$

o in alternativa, la meno favorevole tra le seguenti espressioni:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{o,i} Q_{k,i} \quad (2.4a)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{o,i} Q_{k,i} \quad (2.4b)$$

dove

$G_{k,j}$  è il valore caratteristico dell'azione permanente

$Q_{k,1}$  è il valore caratteristico dell'azione variabile principale 1 (cioè l'azione variabile più sfavorevole)

$Q_{k,i}$  sono i valori caratteristici delle azioni variabili di accompagnamento  $i$

$j$  è l'indice dell'azione permanente

$i$  è l'indice dell'azione variabile

$\gamma_{G,j}$  è il fattore parziale per l'azione permanente  $G_{k,j}$

$\gamma_{Q,1}$  è il fattore parziale per l'azione variabile principale 1

$\xi_j$  è un fattore di riduzione per le azioni permanenti sfavorevoli G

$\psi_{0,i}$  è un fattore di riduzione per il valore della combinazione di un'azione variabile Q.

Tuttavia, di nuovo un riferimento deve essere fatto all'DNA relativo al Paese per il quale si sta progettando la struttura.

Nella EN 1990 sono raccomandati i seguenti valori:

$$\gamma_{G,j} = 1,35 \text{ (per effetti sfavorevoli)}$$

$$\gamma_{Q,1} = 1,5 \quad \gamma_{Q,i} = 1,5$$

$$\xi = 0,85$$

Il valore di  $\psi_0$  dipende dal tipo di carico (si veda in proposito la EN 1990).

Le equazioni 2.4a e 2.4b sono state introdotte poiché l'equazione 2.3 era eccessivamente pessimistica per strutture pesanti. Per strutture in acciaio, le equazioni 2.4a e 2.4b generalmente danno carichi più leggeri rispetto all'equazione 2.3.

### 2.3.3 Stato limite ultimo – Carichi sulle strutture offshore

Si deve fare riferimento alle norme API RP2A – LRFD: *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Load and Resistance Factor Design*, First Edition, 1993.

Nell'uso di questo Manuale, per il progetto dei componenti in acciaio inossidabile della parte superiore della struttura, vengono suggerite le seguenti combinazioni dei carichi insieme ai carichi specificati nelle API RP2A. Si noti che vengono utilizzati gli stessi simboli delle API RP2A.

#### **Condizioni normali d'esercizio:**

$$1,3D_1 + 1,3D_2 + 1,5L_1 + 1,5L_2 + 1,2(W_o + 1,25D_n) \quad (2.5)$$

#### **Condizioni estreme di maltempo:**

$$1,1D_1 + 1,1D_2 + 1,1L_1 + 1,35(W_e + 1,25D_n) \quad (2.6)$$

In presenza di carichi verticali che si oppongono alle forze interne dovute a vento, onde e correnti, i carichi verticali possono così ridursi:

$$0,9D_1 + 0,9D_2 + 0,8L_1 + 1,35(W_e + 1,25D_n) \quad (2.7)$$

dove:

- $D_1$  è il carico permanente, che comprende il peso proprio delle strutture, equipaggiamenti, impianti ausiliari e fissi
- $D_2$  è il carico permanente comprensivo del peso di equipaggiamenti ed altre voci variabili a seconda delle diverse modalità operative
- $L_1$  è il carico accidentale 1, comprensivo del peso dei carburanti presenti nelle condotte e nei serbatoi
- $L_2$  è il carico accidentale, costituito da carichi di breve durata dovute ad operazioni quali sollevamento di utensili da trivellazione e sollevamento mediante gru, macchinari in funzione, ormeggio serbatoi e carico degli elicotteri
- $W_o$  è il valore di calcolo del carico o dell'effetto del vento, delle onde e delle correnti
- $W_e$  è il valore limite del carico o dell'effetto del vento, delle onde e delle correnti (periodo di ritorno di 100 anni)
- $D_n$  è la forza d'inerzia

### 2.3.4 Carichi allo stato limite di servizio

Gli stati limite di servizio devono essere verificati per le seguenti combinazioni di carichi:

- caratteristica
- frequente
- quasi permanente.

La EN 1990 fornisce le combinazioni di carichi da utilizzare nella progettazione delle costruzioni. (Deve essere inoltre fatto riferimento all' DNA relativo al Paese per il quale si sta progettando la struttura.)

Per la combinazione caratteristica, normalmente utilizzata per gli stati limite ultimi, deve essere impiegata la seguente combinazione di carichi:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (2.8)$$

dove tutti i termini sono definiti nella Cap. 2.3.2.

Si noti che l'EN 1990 fornisce le combinazioni appropriate delle azioni da usare nelle seguenti situazioni:

- per calcolare gli spostamenti sotto combinazioni normali di azioni (Appendice A.1.4.3(1))
- quando occorre tener conto delle deformazioni a lungo termine causate da ritiro, rilassamento o viscosità (Appendice A.1.4.3(6))
- se si devono considerare l'aspetto della struttura, il benessere degli operatori o il funzionamento dei macchinari (Appendice A.1.4.3(4) e (5)).

## 3 MATERIALI: PROPRIETA', SCELTA E DURABILITA'

### 3.1 Qualità dei materiali

#### 3.1.1 Introduzione

Esistono vari tipi di acciaio inossidabile e non tutti sono adatti per applicazioni strutturali, specie se saldati. Gli acciai inossidabili sono distinti in 5 gruppi o classi a seconda della loro struttura metallurgica (ossia, austenitici, ferritici, martensitici, duplex ed indurenti per precipitazione). Gli acciai inossidabili austenitici ed i duplex sono di solito i più utilizzati per la costruzione di strutture.

Gli acciai inossidabili austenitici offrono una buona combinazione di proprietà di resistenza alla corrosione, di formatura e di fabbricazione; i duplex presentano una forte resistenza all'usura, con ottima resistenza alla tensocorrosione (corrosione sotto tensione).

I tipi più comunemente usati, tipicamente definiti come austenitici standard, sono 1.4301 (noto come AISI 304) e 1.4401 (noto come AISI 316). Contengono il 17-18% di cromo e l'8-11% di nichel. I tipi a basso tenore di carbonio di queste classi sono 1.4307 (AISI 304L) e 1.4404 (AISI 316L). I tipi 1.4301 e 1.4401 erano, in passato, fabbricati con un contenuto in carbonio notevolmente più elevato con implicazioni sul comportamento alla corrosione<sup>1</sup>. Per evitare problemi riguardanti la resistenza a corrosione in presenza di saldature, si sarebbero dovuti impiegare i tipi "L" o gli acciai stabilizzati, come il tipo 1.4541 o 1.4571.

Il tipo 1.4318 è un acciaio inossidabile a basso tenore di carbonio ed elevato contenuto di azoto che incrudisce molto rapidamente quando lavorato a freddo; generalmente è utilizzato nell'industria automobilistica, negli aeroplani, per la realizzazione di componenti strutturali per carrozze treni ed elementi architettonici portanti.

In questo manuale sono contemplati soltanto gli acciai ottenuti con trattamenti di laminazione e formatura, e non quelli prodotti tramite getti. Nel Cap. 3.6 vengono fornite indicazioni sulla scelta dei tipi di acciaio per particolari applicazioni.

#### 3.1.2 Norme

##### ***Prodotti piani e prodotti lunghi***

La normativa di riferimento è la EN 10088, *Acciai inossidabili*, costituita da tre parti:

- Parte 1, *Elenchi degli acciai inossidabili* che fornisce la composizione chimica e dati di riferimento riguardanti alcune caratteristiche fisiche, come il modulo di elasticità  $E$ ;

---

<sup>1</sup> Il carbonio presente nell'acciaio reagisce con il cromo e provoca la precipitazione di carburi di cromo ai bordi dei grani in dati cicli termici, ad es., nelle zone termicamente alterate delle saldature ("ZTA"). La migrazione locale del cromo dalla regione di confine delle particelle di carburi genera un attacco corrosivo preferenziale intercristallino e questo acciaio viene definito *sensibilizzato* o *affetto da degradazione da saldatura* (cfr. 3.7.2).

- Parte 2, *Condizioni tecniche di fornitura per lamiere sottili, piastre e nastri per impieghi generali* che fornisce le caratteristiche tecniche e la composizione chimica dei materiali usati per la formatura dei profilati;
- Parte 3, *Condizioni tecniche di fornitura per prodotti semilavorati, barre, tondi e profilati per impieghi generali*, che fornisce le proprietà tecniche e la composizione chimica dei materiali usati per i prodotti lunghi.

Il sistema di designazione della EN 10088 si basa sul numero Europeo dell'acciaio e sul nome dell'acciaio.

Ad es., il tipo AISI 304L ha il numero di acciaio 1.4307, in cui:

<b>1.</b>	<b>43</b>	<b>07</b>
Indica il materiale (acciaio)	Indica un gruppo di acciai inossidabili	Identifica la sua qualità

Il sistema del nome dell'acciaio offre qualche chiarimento sulla composizione chimica dell'acciaio. Il nome dell'acciaio numero 1.4307 è X2CrNi18-9, dove:

<b>X</b>	<b>2</b>	<b>CrNi</b>	<b>18-9</b>
Indica un acciaio molto legato	100 x % di Carbonio	Simboli chimici degli elementi principali presenti nella lega	Percentuali dei principali elementi presenti nella lega

Ogni nome di un acciaio inossidabile ha un unico numero corrispondente. Va notato che, sebbene le designazioni delle DIN tedesche siano simili, non sono tutte identiche a quelle della EN 10088. Nell'Appendice A è presente una tabella di equivalenza fra le varie designazioni nazionali e quella europea degli acciai inossidabili.

La tabella 3.1 illustra le caratteristiche meccaniche per gli acciai inossidabili comuni specificate nella EN 10088-2. La composizione chimica di tali acciai è presente nella tabella 3.2.

Sia gli acciai inossidabili austenitici che gli acciai duplex possono essere ritenuti adeguatamente tenaci e non suscettibili a frattura fragile per temperature di servizio fino a - 40°C.

I valori di progetto delle proprietà meccaniche sono indicati nel Cap. 3.2.4.

**Tabella 3.1** Valori di specifica delle proprietà meccaniche dei comuni acciai inossidabili secondo EN-10088-2

	Tipo di acciaio	Forme di prodotto <sup>(1)</sup>	Spessor e max (mm)	Minimo carico unitario di scostamento dalla proporzionalità dello 0,2% <sup>(2)</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	Resistenza a trazione (N/mm <sup>2</sup> )	Allungament o dopo rottura (%)
Acciai austenitici al Cr-Ni	1.4301	C	8	230	540 – 750	45 <sup>(3)</sup>
		H	13,5	210	520 – 720	45 <sup>(3)</sup>
		P	75	210	520 – 720	45
	1.4307	C	8	220	520 – 700	45
		H	13,5	200	520 – 700	45
		P	75	200	500 – 700	45
Acciai austenitici al Cr-Ni-Mo	1.4401	C	8	240	530 – 680	40
		H	13,5	220	530 – 680	40
		P	75	220	520 – 670	45
	1.4404	C	8	240	530 – 680	40
		H	13,5	220	530 – 680	40
		P	75	220	520 – 670	45
Acciai austenitici stabilizzati	1.4541	C	8	220	520 – 720	40
		H	13,5	200	520 – 720	40
		P	75	200	500 – 700	40
	1.4571	C	8	240	540 – 690	40
		H	13,5	220	540 – 690	40
		P	75	220	520 – 670	40
Acciai austenitici basso C arricchiti al Ni	1.4318	C	8	350	650 – 850	35
		H	13,5	330	650 – 850	35
		P	75	330	630 – 830	45
	1.4362	C	8	450	650 – 850	20
		H	13,5	400	650 – 850	20
		P	75	400	630 – 800	25
Acciai duplex	1.4462	C	8	500	700 – 950	20
		H	13,5	460	700 – 950	25
		P	75	460	640 – 840	25

Note.

- (1) C = nastri laminati a freddo, H = nastri laminati a caldo, P = lamiere laminate a caldo  
(2) Proprietà delle sezioni trasversali  
(3) Per materiali stirati e raddrizzati , il valore min. è inferiore del 5%

**Tabella 3.2** *Composizione chimica secondo EN 10088-2*

Tipo di acciaio	Contenuto leganti (max. o ammissibile) in % sul peso					
	C	Cr	Ni	Mo	Altri	
Acciai austenitici	1.4301	0,07	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4307	0,03	17,5 – 19,5	8,0 – 10,5		
	1.4401	0,07	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4404	0,03	16,5 – 18,5	10,0 – 13,0	2,0 – 2,5	
	1.4541	0,08	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0		Ti: 5xC – 0,7 (1)
	1.4571	0,08	16,5 – 18,5	10,5 – 13,5	2,0 – 2,5	Ti: 5xC – 0,7 (1)
	1.4318	0,03	16,5 – 18,5	6,0 - 8,0		N: 0,1 – 0,2
Acciai duplex	1.4362	0,03	22,0 – 24,0	3,5 – 5,5	0,1 – 0,6	N: 0,05 – 0,2
	1.4462	0,03	21,0 – 23,0	4,5 – 6,5	2,5 – 3,5	N: 0,1 – 0,22

Nota:

(1) Il titanio si aggiunge per stabilizzare il carbonio e per migliorare le proprietà anticorrosione nelle zone termicamente alterate delle saldature. Tuttavia, salvo che nella fabbricazione di profilati pesanti, l'uso di acciai inossidabili austenitici al Ti è stato praticamente sostituito dalla rapida disponibilità dei tipi 1.4307 e 1.4404.

### **Elementi di collegamento**

Gli elementi di collegamento in acciaio inossidabile sono contemplati dalla EN ISO 3506, *Elementi di collegamento in acciaio inossidabile resistenti a corrosione*. La specifica indica la composizione chimica e le proprietà per i elementi di collegamento per le classi austenitiche, martensitiche e ferritiche. Sono ammessi materiali alternativi, non presenti nella specifica, se rispettano i requisiti richiesti per le caratteristiche fisiche e meccaniche ed hanno una resistenza equivalente alla corrosione.

Nelle EN ISO 3506, il materiale per bulloni e dadi è caratterizzato dalla lettera "A" per gli austenitici, dalla "F" per i ferritici e dalla "C" per i martensitici. Si consiglia l'utilizzo di elementi di collegamento austenitici, per i quali le proprietà sono date dalle Tabelle 3.3 e 3.4 (ricavate dalla EN ISO 3506). La lettera è seguita da un numero (1, 2, 3, 4 o 5) che rispecchia la resistenza alla corrosione, in cui "1" rappresenta la più bassa e "5" la più alta.

Gli acciai di tipo A1, a causa del loro alto contenuto in zolfo, hanno una resistenza alla corrosione più bassa rispetto a quelli con un normale tenore di zolfo. Bisogna porre attenzione qualora si prendessero in considerazione gli elementi di collegamento di tipo A1; cfr. al riguardo il Cap.3.6.1.

Gli acciai di tipo A2 hanno resistenza alla corrosione equivalente a quella del tipo 1.4301; gli acciai di tipo A3 sono acciai inossidabili stabilizzati con resistenza alla corrosione equivalente a quella del tipo 1.4541. (Si definisce "stabilizzato" un acciaio che ha in lega un forte agente di formazione di carburi, come il titanio che



reagisce prevalentemente con il carbonio ed evita la formazione di carburi di cromo).

Gli acciai di tipo A4 contengono molibdeno ed hanno resistenza alla corrosione equivalente alla classe 1.4401. Gli acciai di tipo A5 sono acciai inossidabili al molibdeno stabilizzati, con caratteristiche degli acciai del tipo 1.4571.

Gli elementi di collegamento austenitici possono essere ottenuti con tre livelli massimi di resistenza (conosciuti come "classi di resistenza"), come mostrato nella tabella 3.3. Occorre tener presente che i valori devono essere concordati per fissaggi maggiori dell'M39 per la classe di proprietà 50, e dell'M24 per le classi di proprietà 70 e 80, poiché i valori dipendono dalla lega e dal metodo di lavorazione.

Gli elementi di collegamento prodotti con classe di proprietà 50 sono non magnetici, quelli delle classi 70 e 80 possono mostrare invece qualche caratteristica magnetica.

La condizione dell'acciaio degli elementi di collegamento nella classe di proprietà 50 è "ricotto", con più elevata resistenza alla corrosione. Le classi di proprietà 70 e 80 sono lavorate a freddo e ciò può influire leggermente sulla resistenza alla corrosione. Gli elementi di collegamento con classe di proprietà 50, con filettatura ottenuta a macchina, possono mostrare una maggiore tendenza all'usura della filettatura; cfr. in merito il Cap. 10.5.

Occorre tenere conto della necessità di adattare resistenza e proprietà anti-corrosione dei dadi e del materiale originario.

Si raccomanda di sottoporre a prova campioni di ogni lotto di produzione.

**Tabella 3.3** Valori minimi delle proprietà per tipi di elementi di collegamento austenitici secondo ISO 3506

Tipo di acciaio <sup>(1)</sup>	Classe di resistenza	Diametro filettato	Bulloni		Dadi
			Resistenza max. a trazione <sup>(2)</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	Carico unitario di scostamento dalla proporzionalità dello 0,2% (N/mm <sup>2</sup> )	Sollecitazione e massima (N/mm <sup>2</sup> )
A1, A2, A3, A4 and A5	50	≤ M39	500	210	500
	70	≤ M24 <sup>(3)</sup>	700	450	700
	80	≤ M24 <sup>(3)</sup>	800	600	800

Note:

(1) Oltre ai vari tipi di acciaio contemplati in EN ISO 3056 per le classi di proprietà 50, 70 e 80, possono usarsi altri tipi di acciaio indicati nella EN 10088-3.

(2) La resistenza a trazione si calcola sull'area sollecitata.

(3) Per fissaggi con diametro nominale della filettatura  $d > 24$  mm, le caratteristiche meccaniche devono essere concordate fra fornitore e utilizzatore e contrassegnate con la classe di proprietà secondo questa tabella.

**Tabella 3.4** *Composizione chimica di elementi di collegamento secondo EN ISO 3506*

Tipo di acciaio	Composizione chimica (in % sul peso) <sup>(1)</sup>								
	C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	P	S	Altri
A1	0,12	16,0 – 18,0	5,0 – 10,0	0,7	1,0	6,5	0,20	0,15 – 0,35	
A2	0,1	15,0 – 20,0	8,0 – 19,0	<sup>(2)</sup>	1,0	2,0	0,05	0,03	
A3	0,08	17,0 – 19,0	9,0 – 12,0	<sup>(2)</sup>	1,0	2,0	0,045	0,03	sia Ti: $\geq 5xC - 0,8$ sia Nb/Ta: $\geq 10xC - 1,0$
A4	0,08	16,0 – 18,5	10,0 – 15,0	2,0 – 3,0	1,0	2,0	0,045	0,03	
A5	0,08	16,0 – 18,5	10,5 – 14,0	2,0 – 3,0	1,0	2,0	0,045	0,03	sia Ti: $\geq 5xC - 0,8$ sia Nb/Ta: $\geq 10xC - 1,0$

Note:  
 (1) I valori sono i massimi salvo altre indicazioni  
 (2) Il molibdeno può essere presente a discrezione del produttore

## 3.2 Comportamento meccanico e valori di progetto delle caratteristiche meccaniche

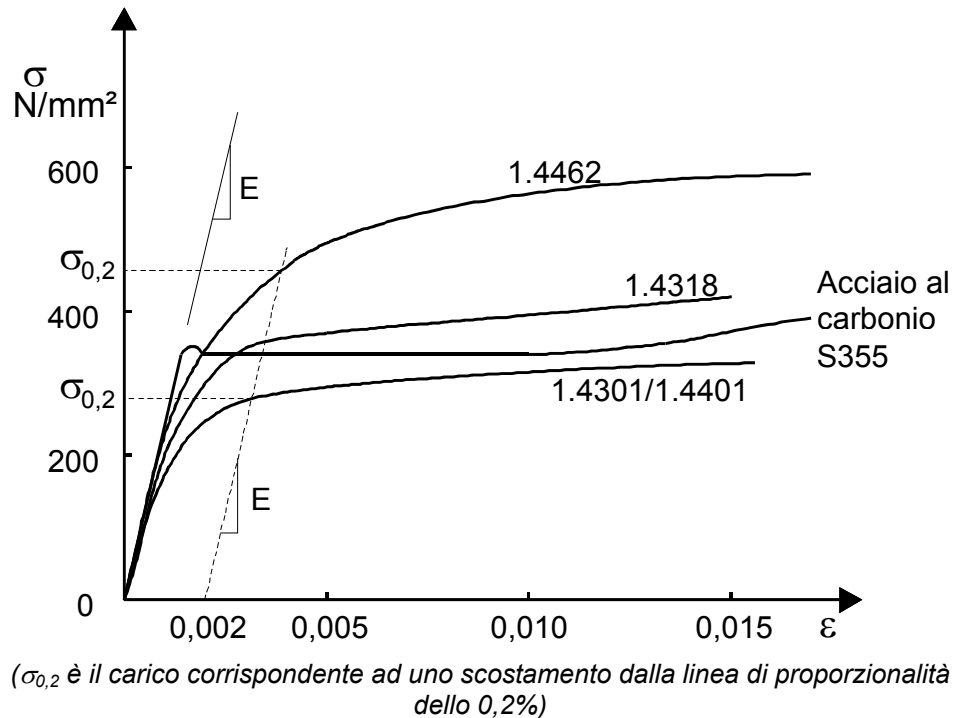
### 3.2.1 Comportamento sforzo-deformazione

Il comportamento sforzo-deformazione degli acciai inossidabili differisce per numerosi aspetti da quello degli acciai al carbonio. La differenza più importante è quella della forma della curva sforzo-deformazione. Mentre gli acciai al carbonio mostrano un comportamento elastico lineare fino al limite di snervamento ed una curva piatta prima di giungere all'incrudimento, l'acciaio inossidabile presenta un andamento più arrotondato con un limite di snervamento non ben definito (vedi fig. 3.1). Pertanto, il "limite" di snervamento dell'acciaio inossidabile è generalmente indicato come la tensione che dà luogo ad uno scostamento dalla linea di proporzionalità dello 0,2% durante la prova di trazione.

Si osservi che la fig. 3.1 illustra tipiche curve sforzo/deformazione sperimentali, tali curve danno una rappresentazione verosimile del comportamento di alcuni materiali allo stato di fornitura e non sono quelle da utilizzate in fase di progetto.

Alcuni gradi di acciaio inossidabile, come il 1.4318, incrudiscono a velocità più elevata di altri.

Gli acciai inossidabili possono assorbire urti considerevoli senza fratturarsi, a causa della loro eccellente duttilità (specialmente i tipi austenitici) e delle loro caratteristiche di incrudimento.



**Figura 3.1** Tipiche curve sforzo/deformazione per acciai inossidabili ed acciai al carbonio (trazione nella direzione di laminazione)

### 3.2.2 Fattori che influiscono sul comportamento sforzo/deformazione

Esistono alcuni fattori che possono variare l'andamento della curva sforzo/deformazione per ogni tipo di acciaio inossidabile. Questi fattori, che possono essere tra loro dipendenti, riguardano:

#### **Lavorazione a freddo:**

Il grado di resistenza dei tipi duplex ed austenitici è migliorato dalla lavorazione a freddo (come quella che si ha durante le operazioni di laminazione a freddo, comprese il livellamento/spianatura a rulli). Associata a questo miglioramento, si riscontra una diminuzione della duttilità, che in genere non comporta conseguenze negative, dato l'elevato valore della duttilità soprattutto per gli acciai inossidabili austenitici.

La tabella 3.5 fornisce i livelli di incrudimento specificati nella EN 1993-1-4 che sono presi dalla normativa europea per gli acciai inossidabili EN 10088. Gli acciai lavorati a freddo possono essere specificati in termini di carico di snervamento minimo allo 0.2% di scostamento dalla proporzionalità o carico massimo a trazione o durezza.

Quando l'acciaio inossidabile è lavorato a freddo, esso tende a manifestare un comportamento a trazione e compressione non-simmetrico e un'anisotropia (differenti caratteristiche di sforzo-deformazione nelle direzioni longitudinale e trasversale rispetto a quella di laminazione). Il grado di asimmetria e di anisotropia dipende dal tipo di acciaio, dal livello di lavorazione a freddo e dal percorso di produzione. La fig. 3.2 mostra le curve sforzo-deformazione per il tipo 1.4318 lavorato a freddo a livello C850; la resistenza a compressione in direzione longitudinale giace ben al disotto della resistenza a trazione nella direzione trasversale (valore tradizionalmente dato nelle norme di prodotto come la

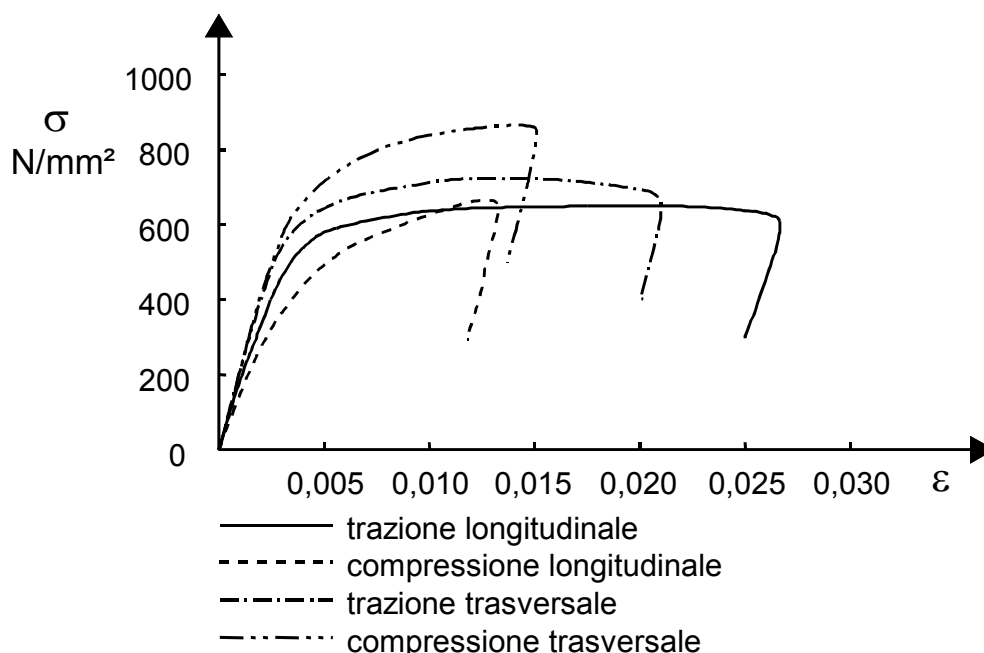
EN 10088). È perciò necessaria particolare attenzione nella scelta della resistenza di progetto per il materiale lavorato a freddo (vedere il Cap. 3.2.4). L'acciaio inossidabile lavorato a freddo generalmente costa tra il 10% e il 100% in più dell'equivalente materiale ricotto, in funzione del tipo di acciaio, della forma di prodotto e del livello di lavorazione a freddo.

**Tabella 3.5** *Livelli di resistenza per lavorazione a freddo secondo la EN 10088-2 (applicabile a prodotti piani di spessore  $\leq 6$  mm)*

Livello di lavorazione a freddo	Minimo carico unitario di scostamento 0,2% (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>1) 2)</sup>	Minima resistenza a trazione <sup>1) 2)</sup>	Tipi di acciaio inossidabile disponibili nelle relativa condizione
CP350	350	700 <sup>3)</sup>	1.4301, 1.4541, 1.4401, 1.4571
CP500	500	850 <sup>3)</sup>	1.4301, 1.4541, 1.4401, 1.4571, 1.4318
CP700	700	1000 <sup>3)</sup>	1.4318, 1.4301
C700	350 <sup>3)</sup>	700	1.4301, 1.4541, 1.4401, 1.4571
C850	500 <sup>3)</sup>	850	1.4301, 1.4541, 1.4401, 1.4571, 1.4318
C1000	700 <sup>3)</sup>	1000	1.4318, 1.4301

Note:

- (1) Valori intermedi di scostamento dello 0,2% o della resistenza a trazione possono essere concordati col produttore dell'acciaio.
- (2) Il massimo spessore disponibile per ogni livello di resistenza decresce all'aumentare della resistenza richiesta. Il massimo spessore disponibile e l'allungamento residuo sono inoltre dipendenti dalla capacità di incrudimento dell'acciaio e dal livello di lavorazione a freddo – informazioni più precise possono essere richieste dal produttore.
- (3) Non specificato, i valori mostrati sono solo indicativi.



**Figura 3.2** *Tipiche curve sforzo - deformazione per il tipo 1.4318 lavorato a freddo al livello C850*

Tipico degli angoli delle sezioni dei profilati formati a freddo è un miglioramento del 50% circa della resistenza allo 0,2% di scostamento dalla proporzionalità. Tuttavia l'effetto è localizzato e l'aumento di resistenza della membratura dipende dalla posizione degli angoli nella sezione; ad esempio, in una trave si avrebbe un vantaggio ridotto in corrispondenza degli angoli prossimi all'asse neutro. Il miglioramento della resistenza è più che sufficiente a compensare gli effetti dovuti all'assottigliamento del materiale negli angoli deformati a freddo. Si consiglia di verificare con prove (si veda Cap. 9) qualunque vantaggio strutturale si intenda assumere a causa dell'aumento di resistenza locale per lavorazione a freddo. Per profilati strutturali cavi lavorati a freddo sono disponibili in alcuni paesi come la Finlandia, Certificazioni nazionali che permettono l'utilizzo delle proprietà della lavorazione a freddo.

Una successiva saldatura delle membrature avrà un parziale effetto di ricottura con una conseguente riduzione di qualunque proprietà derivante dalla lavorazione a freddo. Il Cap. 6 fornisce le linee guida per il progetto di connessioni saldate tra elementi strutturali formati a freddo.

### ***Sensibilità alla velocità di deformazione***

La sensibilità alla velocità di deformazione è più pronunciata negli acciai inossidabili che in quelli al carbonio. In altri termini, negli acciai inossidabili si può ottenere una resistenza proporzionalmente superiore per rapide variazioni di deformazione rispetto a quelli al carbonio.

### ***Trattamenti termici***

I produttori di acciaio inossidabile offrono vari tipi di finiture che comportano la ricottura o addolcimento. La ricottura, o addolcimento, riduce l'aumento di resistenza e l'anisotropia.

### **3.2.3 Valori tipici delle caratteristiche meccaniche**

Dai punti 3.2.1 e 3.2.2 risulta chiaro che, quando si considerano le proprietà meccaniche degli acciai inossidabili rispetto a quelli al carbonio, vengono coinvolti molti più fattori. La loro metallurgia è più complessa ed il processo di fabbricazione ha conseguenze di maggior rilievo sulle loro proprietà finali. Per ogni tipo di acciaio si possono verificare delle differenze nelle proprietà meccaniche per materiali fabbricati da produttori diversi. Tuttavia, le caratteristiche meccaniche, che dipendono dalla composizione chimica e dai trattamenti termomeccanici, sono ampiamente sotto controllo da parte dei produttori ed è possibile concordare le proprietà desiderate con i singoli produttori.

Da un punto di vista strutturale, è significativo il margine con il quale la resistenza allo 0,2% supera il minimo valore ammesso. I valori tipici di resistenza sono fra il 20 ed il 35% al di sopra dei minimi di specifica. Il margine di miglioramento osservato per la resistenza allo 0,2% non è riscontrato per i valori di resistenza a rottura a trazione, che sono di solito soltanto il 10% circa al di sopra dei minimi specificati.

### **3.2.4 Valori di progetto delle caratteristiche meccaniche**

#### ***Prodotti piani***

Sono da considerarsi tre diversi casi: valori minimi previsti, valori risultanti da prove dirette sul materiale o valori certificati dallo stabilimento di produzione.

- (i) Progetto con i valori minimi previsti

*Materiale allo stato ricotto*

Si utilizzino come resistenza caratteristica allo snervamento,  $f_y$ , e resistenza caratteristica a rottura,  $f_u$ , i valori minimi previsti nella EN 10088-2 e riportati in tabella 3.1;

*Materiale lavorato a freddo*

Valori nominali più elevati possono essere adottati per  $f_y$  e  $f_u$  di materiali forniti in condizioni di lavorato a freddo, secondo quanto specificato nella EN 10088.

Per materiali forniti con una specificata resistenza allo 0.2% di scostamento (ad esempio nella condizione CP350), la tensione minima di scostamento dello 0.2% riportata in tabella 3.5 può essere preso come  $f_y$ . Per tenere in debito conto l'asimmetria che si manifesta nel materiale allo stato incrudito, in quei casi in cui la compressione in direzione longitudinale è una condizione di carico prevalente (i.e. nel comportamento a colonna o a flessione con sezione prevalentemente compressa) il valore di  $f_y$ , dovrebbe essere preso pari a  $0,8 \times$  tensione di scostamento dello 0.2%. L'utilizzo di valori più elevati è ammesso se avallato da opportune prove sperimentali (si veda Cap. 9).

Per materiali forniti con una specificata resistenza a trazione (ad esempio nella condizione C700), la resistenza minima a trazione riportato in tabella 3.5 può essere presa come  $f_u$ , il valore minimo di scostamento dello 0.2% da prendere per  $f_y$  dovrebbe essere concordato con il produttore.

*Nota 1:* Sezioni cave rettangolari sono disponibili in materiale lavorato a freddo con resistenze intermedie tra CP350 e CP500 con carico di snervamento e carico di rottura garantiti dal produttore (con carico di snervamento valido in trazione e compressione).

*Nota 2:* Le regole di progettazione contenute in questo Manuale sono applicabili a materiali fino al grado CP500 e C850. Per gradi più elevati, la progettazione deve essere condotta mediante prove sperimentali in accordo al Cap. 9, fa eccezione la resistenza della sezione di Classe 1, 2, e 3 in assenza di instabilità locale o globale, che può essere calcolata in accordo al Cap. 4.

(ii) Progetto con i valori sperimentali

E' un caso da prendere in considerazione solo quando sono state eseguite prove di trazione su provini ricavati da lamiere o da nastri dai quali vengono formate o prodotte le membrane. Il progettista deve inoltre essere certo che le prove siano state svolte secondo norme riconosciute, ad es. secondo le EN 10002-1, e che i procedimenti adottati dal costruttore siano tali che le membrane siano state effettivamente fabbricate con il materiale testato e montate correttamente nella struttura.

Il valore della resistenza di progetto può essere ricavato statisticamente secondo le raccomandazioni dell'Allegato Z alla EN 1993-1-1 (da sostituirsi con l'Allegato D alla EN 1990).

La resistenza caratteristica a rottura a trazione  $f_u$  deve soddisfare il valore minimo fornito nella EN 10088-2.

(iii) Progetto con i valori certificati dell'acciaieria

Sono valori della resistenza misurati allo 0,2% presenti nei certificati dell'acciaieria (o del fornitore). Il valore della resistenza di progetto può essere ricavato statisticamente secondo le raccomandazioni dell'Allegato Z alla EN 1993-1-1 (sostituita con l'Allegato D alla EN 1990).

La resistenza caratteristica a rottura a trazione  $f_u$  deve soddisfare il valore minimo fornito nella EN 10088-2.

Per tutti gli acciai standard austenitici e duplex, utilizzati solitamente nelle applicazioni strutturali, viene utilizzato, per il modulo di Young, un valore di 200.000 N/mm<sup>2</sup> come previsto dalla EN 10088-2. Per la valutazione degli spostamenti è più indicato il modulo secante, vedere il Cap. 5.4.6. Per questi tipi di acciai si può assumere, per il rapporto di Poisson, un valore di 0,3 e, per il modulo di elasticità tangenziale G, il valore 76 900 N/mm<sup>2</sup>.

### **Viti e bulloni**

Per calcolare la resistenza di un fissaggio sotto trazione, taglio o loro combinazione, si assume per la resistenza  $f_{ub}$ :

$$f_{ub} = \sigma_{ub}$$

dove  $\sigma_{ub}$  è il valore minimo previsto per la resistenza a rottura a trazione indicata nella tabella 3.3 per una specifica classe di resistenza.

Per la resistenza a lungo termine di un fissaggio, si deve far riferimento alla EN 1990 per l'appropriata combinazione di azioni allo stato limite ultimo.

## **3.3 Proprietà fisiche**

La tabella 3.6 fornisce le proprietà fisiche a temperatura ambiente allo stato ricotto dei tipi riportati nella EN 10088-1 e considerati in questo Manuale. Le proprietà fisiche possono variare leggermente a seconda della forma e delle dimensioni del prodotto, ma di solito queste variazioni non sono di rilevante importanza nelle applicazioni.

**Tabella 3.6** *Proprietà fisiche a temperatura ambiente, stato ricotto*

Tipo di acciaio	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Dilatazione termica da 20° a 100°C (10 <sup>-6</sup> /°C)	Conducibilità termica (W/m °C)	Capacità termica (J/kg °C)
1.4301	7900	16	15	500
1.4307	7900	16	15	500
1.4401	8000	16	15	500
1.4404	8000	16	15	500
1.4541	7900	16	15	500
1.4571	8000	16,5	15	500
1.4318	7900	16	15	500
1.4362	7800	13	15	500
1.4462	7800	13	15	500

La proprietà fisica più importante, dal punto di vista strutturale, è il coefficiente di dilatazione lineare che, per i tipi austenitici, è assai diverso rispetto a quello degli acciai al carbonio (12 x 10<sup>-6</sup>/°C). Quando vengono usati insieme acciai al carbonio ed acciai inossidabili bisogna tener conto, in fase di progetto, degli effetti dovuti alla differenza di dilatazione termica.

I tipi duplex e ferritici sono magnetici. Nelle applicazioni dove le proprietà non magnetiche degli acciai austenitici sono importanti, occorre porre la massima attenzione nella scelta dei prodotti di consumo usati in saldatura per ridurre al minimo il contenuto di ferrite nei cordoni. Un livello considerevole di deformazione a freddo, specie per gli acciai austenitici poco legati, può anche incrementare la permeabilità magnetica; la successiva ricottura dovrebbe ripristinare le proprietà non magnetiche. Per le applicazioni non magnetiche è raccomandabile che venga fornita dal produttore dell'acciaio un'ulteriore consulenza.

### **3.4 Effetti della temperatura**

Gli acciai austenitici sono impiegati per applicazioni criogeniche. Rispetto agli acciai al carbonio i tipi duplex ed austenitici mantengono una frazione più elevata della loro resistenza al di sopra dei 550°C circa. Tuttavia, il progetto di strutture soggette ad altissima o bassissima temperatura per lunghi periodi esula dai fini di questo Manuale. Molto più importanti, rispetto alle proprietà considerate in questo Cap. 3, sono altre proprietà meccaniche e i diversi fenomeni di corrosione. Nella maggior parte dei casi sono più adatti, per applicazioni in condizioni ad elevata temperatura, altri tipi di acciai inossidabili rispetto a quelli qui considerati, per i quali si dovrebbe far ricorso ad ulteriori approfondimenti.

Gli acciai duplex non possono essere impiegati a lungo termine per temperature superiori ai 300°C per la possibilità di infragilimento.

Il Cap. 7 tratta del progetto di strutture resistenti al fuoco e fornisce le proprietà meccaniche e fisiche alle alte temperature.

### **3.5 Life cycle costing**

C'è una crescente consapevolezza sul fatto che i costi del ciclo di vita (o dell'intera vita), e non solo i costi iniziali, devono essere considerati quando si selezionano i materiali. I costi del ciclo di vita prendono in considerazione:

- costi iniziali
- costi operativi
- valore residuo

L'acciaio inossidabile viene a volte considerato un materiale costoso. Tuttavia, l'esperienza ha dimostrato che utilizzando un materiale resistente alla corrosione per evitare la futura manutenzione, si possono risparmiare i costi di messa fuori servizio e ripristino della struttura, che superano di gran lunga i costi iniziali del materiale.

Il costo iniziale dei prodotti strutturali in acciaio inossidabile è approssimativamente quattro volte quello dell'equivalente prodotto in acciaio al carbonio. Tuttavia si avranno risparmi dalla mancanza di operazioni di rivestimento superficiale a intervalli regolari (ripetuti) di tempo.

L'eccellente resistenza alla corrosione dell'acciaio inossidabile può offrire molti vantaggi, tra cui:

- minori costi e frequenza di ispezioni



- minori costi di manutenzione
- lunga vita in servizio

L'acciaio inossidabile ha un elevato valore residuo (valore alla fine della vita della struttura), sebbene questo sia di rado un fattore decisionale per una struttura con una lunga vita di progetto (ad esempio sopra i 50 anni).

Il Life Cycle Costing utilizza il principio standard di contabilità del flusso di cassa scontato per ridurre tutti quei costi a valori attuali. Il tasso di sconto comprende inflazione, tassi di interesse bancari, tasse e, eventualmente, un fattore di rischio.

Questo consente un confronto realistico sulla base delle opzioni disponibili e dei vantaggi potenziali a lungo termine nell'utilizzo dell'acciaio da valutarsi rispetto alla selezione di altri materiali.

## **3.6 Scelta dei materiali**

### **3.6.1 Tipi**

Nella maggior parte delle strutture in acciaio inossidabile si intende sfruttare la resistenza alla corrosione sia per motivi estetici, che per ridurre al minimo la manutenzione o avere la massima durata. La resistenza alla corrosione deve pertanto essere il criterio fondamentale per la selezione del tipo di acciaio più adatto.

La resistenza alla corrosione degli acciai inossidabili è dovuta alla presenza di un film passivo in superficie che, permettendo un adeguato rifornimento di ossigeno o di agenti ossidanti, tende spontaneamente a riformarsi in caso di danni. Questa pellicola di ossidi è dovuta principalmente alla presenza di cromo nell'acciaio; anche l'aggiunta di nichel e di altri elementi in lega possono sostanzialmente migliorare la protezione assicurata dal film. In particolare si utilizza una piccola aggiunta di molibdeno per migliorare la resistenza alla corrosione da pitting dell'acciaio (cfr. 3.7.2).

La corrosione può avere inizio quando lo strato superficiale di ossidi subisce danni di origine meccanica o di origine elettrochimica.

Una progettazione accurata deve garantire risultati sicuri, i progettisti devono quindi essere consapevoli che anche gli acciai inossidabili possono, in determinate circostanze, essere soggetti a diverse forme di corrosione. Nonostante la presenza di questi effetti di degrado, è perfettamente possibile utilizzare tipi di acciaio inossidabile molto efficaci, ammesso che si tenga conto di alcuni principi elementari. I problemi possono manifestarsi quando, nell'uso di questi materiali, non si prendono in considerazione i principi della corrosione.

La scelta di un corretto tipo di acciaio inossidabile deve tener conto dell'ambiente di esercizio, del processo con cui è stato prodotto, della finitura superficiale e della manutenzione della struttura. Va osservato che le esigenze di manutenzione sono minime: il semplice lavaggio dell'acciaio inossidabile, eventualmente anche da parte della pioggia, è assai importante per l'aumento della sua durata in servizio.

Il primo passo è la caratterizzazione dell'ambiente di esercizio, compresa la previsione di variazioni ragionevoli dalle condizioni di progetto. Nella valutazione dell'ambiente atmosferico, particolare attenzione deve essere dedicata alle condizioni locali, come la presenza di ciminiere che possono espellere fumi

corrosivi. Devono essere considerati anche possibili sviluppi o cambiamenti d'uso. Fattori di rilievo possono essere anche le condizioni superficiali, la temperatura dell'acciaio e le sollecitazioni previste (vedi Cap. 3.7.2).

I tipi di acciaio più indicati possono essere selezionati per offrire una globale e soddisfacente resistenza alla corrosione nell'ambiente in cui saranno inseriti. La scelta deve tener conto del tipo di corrosione che può manifestarsi in maniera significativa nell'ambiente interessato. A tal fine è necessario valutare il tipo di corrosione che si riscontra negli acciai inossidabili. Il Cap. 3.7 puntualizza i principi basilari della corrosione negli acciai inossidabili e precisa le condizioni in cui l'acciaio inossidabile è esente da qualsiasi rischio e complicazione. In esso sono inoltre illustrati i punti generali di una corretta pratica ed anche i casi in cui gli acciai inossidabili devono essere utilizzati con precauzione. In questi ultimi casi dovrebbe essere richiesta una consulenza specialistica per utilizzare con successo l'acciaio inossidabile nella maggior parte dei casi.

Successivamente, va tenuto conto delle proprietà meccaniche, della facilità di produzione, della disponibilità delle diverse forme del prodotto, della finitura superficiale e dei costi.

La valutazione dell'adeguatezza di un tipo di acciaio può essere meglio effettuata se si fa riferimento alle utilizzazioni dell'acciaio inossidabile presenti in applicazioni ed ambienti simili. La tabella 3.7 fornisce indicazioni per la scelta dei tipi più adatti dal punto di vista atmosferico. Le normative nazionali devono essere inoltre controllate, poiché in molti casi possono essere assai più restrittive. Per i casi di acciai inossidabili immersi, si veda il Cap. 3.7.3.. Quando l'acciaio inossidabile viene a contatto con prodotti chimici, dovrebbe essere richiesta una consulenza specialistica.

**Tabella 3.7** *Tipi di acciaio inossidabile consigliati per impiego in differenti tipologie di atmosfera*

Tipo di acciaio	Ubicazione											
	Rurale			Urbana			Industriale			Marina		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
Acciai austenitici al cromo-nichel (es. 1.4301, 1.4307, 1.4541, 1.4318)	T	T	T	T	T	(T)	(T)	(T)	X	T	(T)	X
Acciai austenitici al cromonichel-molibdeno (es. 1.4401, 1.4404, 1.4571), duplex 1.4362	0	0	0	0	T	T	T	T	(T)	T	T	(T)
Acciai duplex (1.4462)	0	0	0	0	0	0	0	0	T	0	0	T

L Condizioni di minima corrosione per una certa categoria; es. clima temperato a bassa umidità, bassa temperatura.  
M Condizioni tipiche della categoria.  
H Condizioni di corrosione più elevata della categoria; es. presenza continua di forte umidità, elevata temperatura ambiente ed aria inquinata particolarmente aggressiva.  
O Potenzialmente eccedente le specifiche per quanto riguarda la corrosione.  
T Probabilmente la migliore scelta per la resistenza alla corrosione e costo.  
X Probabilmente soggetto ad eccesso di corrosione.  
(T) Da tenere in considerazione se si prendono alcune precauzioni (es. quando è richiesta una superficie relativamente levigata e quando si esegue un regolare lavaggio)  
NOTE: Le normative nazionali possono contenere requisiti più restrittivi.

Occorre prestare attenzione all'uso di acciai inossidabili *a lavorabilità migliorata* per gli elementi di collegamento. L'aggiunta di zolfo nella composizione di questi acciai austenitici, li rende meno resistenti alla corrosione, specie se usati in ambienti industriali o marini. Ciò vale in particolare per gli elementi di

collegamento di materiale A1 secondo la EN ISO 3506; vedasi. al riguardo la tabella 3.3.

### **3.6.2 Disponibilità dei tipi di prodotti**

#### ***Tipi generici di prodotti***

Nastri, lamiere e barre sono tutti prodotti largamente disponibili nelle classi di acciaio inossidabile trattate in questo Manuale. I prodotti tubolari sono disponibili nei tipi austenitici ed anche nel tipo duplex 1.4462 (2205). I prodotti tubolari nel tipo duplex 1.4362 (2304) non hanno larga diffusione, poiché questo tipo è da poco utilizzato nell'industria delle costruzioni, anche se ormai viene usato da alcuni anni per pareti anti-esplosione nelle strutture offshore.

Esistono diversi profilati laminati (angolari, profilati a C, a T, rettangolari cavi e ad I) nei tipi austenitici standard, come ad es. 1.4301 e 1.4401, ma non per le qualità degli acciai inossidabili duplex. (Si noti che sono molti i prodotti laminati disponibili nei tipi 1.4301 e 1.4401 rispetto a quelli a basso tenore di carbonio 1.4307 e 1.4404). Generalmente gli elementi possono essere fabbricati per formatura a freddo (laminazione o piegatura) o assemblati mediante saldatura.

Il materiale nella condizione di lavorato a freddo è disponibile in varie tipologie di prodotto tra cui lamiere, nastri, barre e sezioni cave:

- lamiere e nastri (spessori tipicamente  $\leq 6.0$  mm)
- barre rotonde (diametri da 5 mm a 60 mm)
- sezioni cave quadrate e rettangolari (dimensioni della sezione fino a 400 mm, spessori da 1,2 mm a 6,0 mm).

I gradi di acciaio inossidabile commercialmente disponibili in condizione di lavorato a freddo sono anche dati in tabella 3.5.

#### ***Formatura a freddo***

E' importante verificare a priori, con i potenziali fornitori, i limiti della formatura a freddo, poiché gli acciai inossidabili richiedono carichi per la formatura stessa più elevati rispetto agli acciai al carbonio. La lunghezza degli elementi formati a freddo su pressa è necessariamente limitata dalle dimensioni della macchina o dalla sua potenza nel caso di materiali più spessi o più resistenti. I tipi duplex richiedono circa il doppio del carico di formatura applicato ai materiali austenitici e pertanto, di conseguenza, la serie degli elementi in duplex è più limitata. Inoltre, a causa della minore duttilità dei materiali duplex, devono essere impiegati raggi di piegatura superiori. Ulteriori informazioni sono presenti nel Cap. 10.3.2.

#### ***Finitura superficiale***

In determinate applicazioni, la finitura e l'aspetto delle superfici hanno un certo rilievo. I produttori offrono una serie di finiture standard: finitura di stabilimento, finitura opaca e finitura lucida. Si possono inoltre offrire finiture con tessiture personalizzate. Nonostante le diverse finiture siano standardizzate, la variabilità dei trattamenti crea differenze d'aspetto fra le varie acciaierie e anche fra i prodotti dello stesso stabilimento. La finitura lucida è utilizzata frequentemente nelle applicazioni architettoniche, tuttavia si deve tener conto che questo tipo di finitura evidenzia qualsiasi difetto di non planarità del materiale, specialmente nei pannelli. Questo problema può essere risolto con l'utilizzo di lamiere sottili irrigidite, goffrate, tessute, modellate o profilate.

### **Viti e bulloni**

Gli elementi di collegamento più ampiamente disponibili sono quelli della classe di proprietà 70 secondo la EN ISO 3506. Agli elementi di collegamento della classe di proprietà 70 ed 80 si applicano alcune restrizioni (cfr. tabella 3.3). E' anche possibile utilizzare fissaggi "speciali" ordinati su misura, offrendo in alcuni casi una soluzione economica.

Gli elementi di collegamento possono essere fabbricati con diverse tecniche, ad esempio tramite macchine utensili, per formatura o fucinatura. I filetti ottenuti mediante macchina utensile non devono essere usati in ambienti fortemente aggressivi (ad esempio ambienti marini.) per il problema di una eventuale corrosione interstiziale. Devono perciò essere preferiti gli elementi di collegamento ottenuti per rullatura perché sono generalmente più robusti di quelli fatti a macchina ed offrono miglior resistenza al grippaggio.

## **3.7 Durabilità**

### **3.7.1 Premessa**

Gli acciai inossidabili sono molto resistenti alla corrosione e possono essere usati in maniera soddisfacente nella maggior parte degli ambienti. I limiti di resistenza alla corrosione di un determinato acciaio inossidabile dipendono dai suoi costituenti; ciò significa che ogni tipo di acciaio risponde in maniera leggermente diversa quando lo si espone ad un ambiente corrosivo. La scelta del tipo di acciaio inossidabile più adatto per una determinata applicazione deve essere accuratamente studiata. Generalmente, più alto è il grado di resistenza alla corrosione, più elevato è il costo del materiale. Ad esempio, l'acciaio tipo 1.4401 è più costoso del 1.4301 per l'aggiunta del molibdeno.

Il materiale in condizione di lavorato a freddo ha una resistenza alla corrosione simile a quella del materiale ricotto.

I motivi più comuni per cui un metallo non rispetta le aspettative in tema di resistenza alla corrosione sono:

- a) non corretta valutazione dell'ambiente o dell'esposizione per condizioni inaspettate, ad es una contaminazione da ioni cloruro non prevista;
- b) il processo di lavorazione dell'acciaio inossidabile, che può aver indotto condizioni non previste nella valutazione iniziale.

Sebbene gli acciai inossidabili possano scolorire e macchiarsi (spesso per contaminazione con acciaio al carbonio), hanno una durata notevole in edilizia. In ambienti industriali aggressivi ed in ambienti marini le prove non hanno mostrato nessuna riduzione delle capacità degli elementi, anche in presenza di una leggera perdita di peso. Tuttavia, le sgradevoli macchie di ruggine sulle superfici esterne possono essere ancora considerate, da parte degli utenti, come un difetto. Una scelta accurata del tipo di materiale, un'efficiente valutazione dei dettagli ed una adeguata lavorazione, possono ridurre notevolmente la possibilità di macchie (degrado) e di corrosione; nel Cap. 10 vengono forniti consigli pratici in merito. L'esperienza dimostra che, generalmente, entro i primi due o tre anni di vita della struttura, cominciano a manifestarsi seri problemi di corrosione.

In determinati ambienti aggressivi, alcuni tipi di acciaio inossidabile possono essere soggetti ad attacchi localizzati. I sei meccanismi di questi attacchi sono descritti in seguito; gli ultimi tre si riscontrano, tuttavia, raramente nelle strutture su terraferma.

Va rilevato che la presenza di umidità (compresa quella per condensazione) è un fattore determinante per lo sviluppo della corrosione.

### **3.7.2 Tipi di corrosione e prestazioni dei tipi di acciaio**

#### ***Corrosione per pitting***

Come indica lo stesso termine inglese *pitting* questo tipo di corrosione si manifesta in punti localizzati. Esso si verifica in seguito alla rottura locale dello strato protettivo, di solito causata da ioni cloro; anche altri alogenuri, solfati ed altri anioni possono avere effetti simili. Nei punti di innesco i prodotti della corrosione possono creare una soluzione molto corrosiva, che spesso comporta un forte avanzamento del fenomeno. Comunque, nella maggior parte delle applicazioni strutturali, la distribuzione dei punti di corrosione è generalmente superficiale e la riduzione della sezione di un elemento è trascurabile. I prodotti della corrosione possono però macchiare le parti architettoniche in vista. La corrosione da pitting deve essere ancora meno accettata nelle tubazioni, condotte e strutture di contenimento.

Poiché gli ioni cloro sono la causa predominante di corrosione da pitting, gli ambienti marini e litoranei risultano essere ambienti molto aggressivi. La probabilità che vi siano altre cause di corrosione da pitting, oltre la presenza di cloruri, dipende anche da fattori quali la temperatura, l'alcalinità, l'acidità e il contenuto di agenti ossidanti. La resistenza al pitting di un acciaio inossidabile dipende dalla sua composizione chimica; essa è favorita dalla presenza di cromo, molibdeno e azoto.

Una misura approssimativa della resistenza alla corrosione da pitting è data dal coefficiente di pitting, definito PRE (Pitting Resistance Equivalent), espresso da:

$$\text{PRE} = \% \text{ (in peso) di Cr} + 3,3 \times \% \text{ (in peso) di Mo} + 30 \times \% \text{ (in peso) di N.}$$

$$\text{PRE} = \% \text{ (in peso) di Cr} + 3,3 \times \% \text{ (in peso) di Mo} + 16 \times \% \text{ (in peso) di N per i gradi duplex}$$

Il PRE di un acciaio inossidabile è un indice pratico della sua resistenza al pitting rispetto ad altri acciai inossidabili, ma non ha un significato assoluto.

Il tipo 1.4301 ha il PRE più basso rispetto ai tipi considerati in questo Manuale, per cui non è indicato per applicazioni architettoniche in ambienti marini, eccetto forse, che per componenti di strutture interne effettivamente riparati dagli spruzzi del mare e dall'atmosfera salmastra. Il tipo 1.4301 può mostrare livelli di corrosione da pitting inaccettabili in ambienti industriali aggressivi; pertanto in questi casi sono preferibili i tipi 1.4401 o duplex.

#### ***Corrosione interstiziale***

La corrosione interstiziale si manifesta negli stessi ambienti in cui si genera la corrosione da pitting. La corrosione inizia più facilmente in un interstizio che non su una superficie libera, poiché la diffusione degli ossidanti, indispensabili per la conservazione della pellicola passiva, è limitata. La severità dell'interstizio dipende molto dalla sua geometria: tanto più stretta e profonda è la fessura, tanto più sono favorevoli le condizioni per lo sviluppo della corrosione. Questo potrebbe essere un

problema solamente in soluzioni stagnanti, dove si può verificare un accumulo di cloruri.

La fessura può essere causata da un giunto metallo-metallo, da una guarnizione, da incrostazioni biologiche, da depositi e da danni superficiali, quali scalfitture profonde. Bisognerebbe fare il possibile per eliminare le fessure, ma spesso non è possibile eliminarle completamente.

Come nel caso della corrosione da pitting, i leganti come cromo, molibdeno e azoto migliorano la resistenza agli attacchi e pertanto la resistenza alla corrosione interstiziale aumenta passando dal tipo 1.4301 a quello 1.4401, fino al 1.4462.

### **Corrosione galvanica**

Quando due diversi metalli sono a contatto elettrico tramite un elettrolita (cioè un liquido conduttore di elettricità come l'acqua marina o acqua dolce non depurata), si stabilisce una corrente attraverso l'elettrolita che va dal metallo costituente l'anodo a quello che funge da catodo, che è il più nobile. Di conseguenza, il metallo meno nobile si corrode.

Questa forma di corrosione assume particolare rilevanza nel caso di collegamenti tra acciai inossidabili ed acciai al carbonio o basso-legati. Ciò si verifica pure nel caso di giunti fra due diversi acciai inossidabili, sebbene in misura minore. E' importante scegliere un filo d'apporto per saldatura che sia nobile almeno quanto il materiale su cui viene depositato. In ambienti corrosivi dove può essere presente acqua come grandi impianti industriali e ambienti costieri, e per strutture immerse in acque marine o salmastre, i bulloni martensitici e ferritici (vedasi 3.1.2) devono essere esclusi dai collegamenti in acciaio inossidabile austenitico.

La corrosione galvanica non deve costituire un problema per gli acciai inossidabili, sebbene in alcuni casi la sua prevenzione possa richiedere misure precauzionali apparentemente eccessive.

La corrosione galvanica, in linea di principio, deve essere evitata impedendo il flusso di corrente mediante:

- isolamento dei metalli diversi, ad es. interrompendo il contatto fra metalli (vedasi 6.1.1);
- eliminazione del ponte elettrolita, cioè interrompendo il circuito elettrolitico mediante verniciatura o altro rivestimento. Quando si ricorre a quest'ultima soluzione e non è possibile rivestire entrambi i metalli, è preferibile ricoprire il più nobile (ossia l'acciaio inossidabile nel caso di contatto elettrolitico fra acciaio inossidabile ed acciaio al carbonio).

Il rischio di un profondo attacco corrosivo è maggiore se l'area del metallo più nobile (ossia l'acciaio inossidabile) è grande rispetto a quella del metallo meno nobile (cioè l'acciaio al carbonio). Particolare attenzione merita l'utilizzo di vernici o di altri rivestimenti per l'acciaio al carbonio. In presenza di minuscoli pori o cavità nel rivestimento, la superficie ridotta dell'acciaio al carbonio nudo presenterà un valore molto elevato del rapporto area catodica/area anodica e può verificarsi un fenomeno di pitting considerevole nell'acciaio al carbonio. Questo è naturalmente molto più grave nel caso di materiali immersi. Per questo motivo è preferibile verniciare l'acciaio inossidabile: ogni poro darà luogo a minime differenze fra le aree.

Negli elementi di collegamento e nei collegamenti, rapporti sfavorevoli fra aree si verificano con notevole probabilità. Bisogna evitare l'uso di bulloni in acciaio al carbonio su membrature in acciaio inossidabile in quanto, essendo alto il rapporto fra l'area dell'acciaio inox e quella dell'acciaio al carbonio, i bulloni saranno soggetti ad attacchi aggressivi. Viceversa l'entità dell'attacco ad una membratura in acciaio al carbonio in presenza di bullonature in acciaio inossidabile è sensibilmente minore. In genere è opportuno riferirsi all'esperienza maturata in situazioni locali simili, infatti, spesso, metalli diversi, in presenza di condizioni occasionali di condensazione o di umidità, specialmente in caso di bassa conducibilità dell'elettrolita, possono essere accoppiati senza effetti rischiosi.

E' difficile prevedere questi effetti perché l'entità della corrosione è determinata da una serie di fenomeni complessi. L'utilizzo di tabelle dei potenziali elettrici ignora la presenza di pellicole superficiali di ossidi, l'effetto del rapporto fra superfici ed il comportamento chimico dei diversi elettroliti. Un uso acritico di queste tabelle può quindi condurre a risultati sbagliati. Esse dovrebbero essere utilizzate con molta attenzione ed unicamente per una valutazione iniziale.

Gli acciai inossidabili costituiscono, di solito, in una coppia di metalli, il catodo e sono quindi immuni da corrosione. I contatti fra acciai austenitici con lo zinco e l'alluminio possono causare una maggior corrosione di questi due metalli. Ciò può essere trascurabile dal punto di vista strutturale, tuttavia può risultare sgradevole il polverino bianco/grigio che si viene a formare. L'accoppiamento con il rame deve essere generalmente evitato.

Il comportamento generale degli accoppiamenti fra metalli in ambienti rurali, urbani, industriali e costieri è completamente documentato nel PD 6484, *Osservazioni sulla corrosione nei contatti bimetallici e sua riduzione.*

### **Tensocorrosione (Corrosione sotto tensione)**

Lo sviluppo delle rotture per tensocorrosione ("SCC", ovvero Stress Corrosion Cracking) richiede la simultanea presenza di sollecitazioni a trazione e di specifici fattori ambientali che raramente si ritrovano negli ambienti dei normali edifici. Non occorre che le sollecitazioni siano molto alte rispetto a quelle di snervamento del materiale e possono essere imputabili ai carichi e agli effetti residui dei procedimenti di fabbricazione, quali saldature o piegature. Particolare attenzione merita l'utilizzo di membrature in acciaio inossidabile con elevate tensioni residue (ad es., per deformazione a freddo) in ambienti ricchi di cloruri (ad es., piscine, installazioni costiere o strutture offshore).

Gli acciai inossidabili duplex presentano in genere una maggior resistenza alla tensocorrosione rispetto agli austenitici considerati in questo Manuale. Per quelle applicazioni nelle quali la SCC risulta essere una forma di corrosione pericolosa sono stati sviluppati acciai inossidabili austenitici molto legati 1.4539, 1.4529, 1.4547, 1.4565 (non considerati in questo Manuale).

Una certa cautela deve essere esercitata quando componenti contenenti elevate tensioni residue (ad esempio per lavorazione a freddo) sono utilizzati in ambienti ricchi di ioni cloruro (ad esempio piscine al coperto, ambiente marittimo, offshore). La EN1993-1-4 raccomanda che nel caso di membrature portanti in atmosfera contenente cloruri che non possono essere pulite regolarmente (ad esempio coperture sospese al disopra di piscine), devono essere utilizzati solo i tipi 1.4529, 1.4547, 1.4565, a meno che la concentrazione di ioni cloruro in acqua sia (eccezionalmente)  $\leq 250$  mg/l, nel qual caso è utilizzabile anche il tipo 1.4539. Possono essere utilizzati anche altri tipi dei quali sia possibile dimostrare una equivalente resistenza alla rottura per tensocorrosione in queste atmosfere.

### **Corrosione generale (uniforme)**

Nelle condizioni normali, in cui tipicamente si trovano le strutture, gli acciai inossidabili non mostrano quella riduzione della sezione, in seguito alla formazione di ruggine, che caratterizza gli acciai al carbonio e quelli basso legati.

L'acciaio inossidabile è resistente a molte sostanze chimiche; infatti è utilizzato a volte per il loro contenimento. Nei casi in cui l'acciaio inossidabile viene a contatto con prodotti chimici è opportuno consultare apposite tabelle presenti in letteratura oppure ricorrere ad esperti in corrosione.

### **Corrosione intergranulare (sensibilizzazione) e degrado della saldatura**

Quando gli acciai inossidabili austenitici sono soggetti a prolungate esposizioni fra i 450 e 850°C, il carbonio, in essi contenuto, migra verso i bordi dei grani e precipita come carburo di cromo, che a sua volta asporta cromo dalla soluzione solida e ne riduce il contenuto nella zona adiacente al bordo dei grani stessi. In queste condizioni l'acciaio viene detto *sensibilizzato*. Il bordo del grano diventa una zona preferenziale per un attacco in seguito ad una successiva esposizione in ambiente corrosivo. Questo fenomeno, se si manifesta nella zona termicamente alterata di una saldatura, è noto anche come *degrado della saldatura*.

Per impedire la corrosione intergranulare si può ricorrere a tre soluzioni:

- impiegare acciai a basso tenore di carbonio;
- usare acciai stabilizzati con titanio e niobio, poiché questi elementi, combinandosi preferenzialmente con il carbonio, formano particelle stabili e riducono di conseguenza il rischio di formazione di carburi di cromo;
- ricorrere a trattamenti termici, anche se raramente utilizzati nella pratica come soluzione alla corrosione intergranulare.

I tipi di acciai inossidabili a basso tenore di carbonio (0,03% massimo), di spessore fino a 20 mm, non sono soggetti a corrosione intergranulare in seguito alla saldatura ad arco.

### **3.7.3 Corrosione in determinati ambienti**

#### **Aria**

L'aria differisce da ambiente ad ambiente e conseguentemente mutano i suoi effetti sugli acciai inossidabili. L'atmosfera delle zone rurali, non contaminata dai fumi dell'industria o dalla salsedine delle coste, è particolarmente "favorevole" in termini di resistenza alla corrosione, anche nelle aree a forte umidità. L'atmosfera nelle aree industriali e marine è considerevolmente più aggressiva. E' opportuno fare riferimento alla tabella 3.7 per la scelta dei tipi più adatti di acciaio inossidabile.

La causa più comune di corrosione atmosferica sono le particelle metalliche di ferro che si formano nel corso della produzione e del montaggio ed i cloruri di origine marina, derivanti da trattamenti industriali e dal cloruro di calcio usato per la produzione del cemento. Alcune particelle depositate, pur se inerti, sono in grado di assorbire deboli soluzioni acide di anidride solforosa che possono rompere la pellicola passiva in punti localizzati.



L'aspetto generale degli acciai inossidabili esposti è influenzato dalla finitura superficiale (la migliore è quella più liscia) e dal lavaggio, regolare o meno (eseguito appositamente o dovuto alla pioggia).

### ***Acqua marina***

L'acqua marina, compresa quella salmastra, ha un alto contenuto di cloruri ed è perciò estremamente corrosiva, specie se fluisce lentamente (sotto 1,5 m/s circa.). A basse velocità del flusso d'acqua può manifestarsi una notevole corrosione per pitting nei tipi 1.4301 e 1.4401 i quali possono essere inoltre colpiti da attacchi nelle fessure, presenti come dettagli di progetto oppure derivanti dall'azione di organismi incrostanti.

Gli spruzzi d'acqua salata possono provocare maggiori attacchi rispetto a quelli dovuti ad una totale immersione poiché la concentrazione dei cloruri aumenta per effetto dell'evaporazione dell'acqua o per la deposizione di cristalli di sale.

Bisogna considerare la possibilità di una forte corrosione galvanica nei casi in cui l'acciaio inossidabile venga utilizzato con altri metalli in presenza di acqua di mare.

### ***Altri tipi di acqua***

Gli acciai inossidabili austenitici, sono, in genere, sufficientemente adatti in presenza di acqua distillata, di rubinetto e di caldaia. In caso di acidità elevata, deve preferirsi il tipo 1.4401; altrimenti anche il tipo 1.4301 è sufficiente. Per evitare problemi di corrosione da pitting o interstiziale, in presenza di minime quantità di cloruri, è consigliabile l'utilizzo del tipo 1.4401 che è il più adatto in questi casi. Particolare attenzione va riservata alle acque fluviali: la presenza di attività biologiche e microbiologiche può provocare, in tempi relativamente brevi, fenomeni di pitting negli acciai inossidabili austenitici.

E' necessario considerare le probabilità di fenomeni di erosione-corrosione nel caso di acque che contengono particelle abrasive.

### ***Ambienti con presenza di prodotti chimici***

Gli acciai inossidabili sono largamente impiegati in ambienti in cui sono presenti sostanze chimiche e non si ritiene ora opportuno scendere troppo nei dettagli. In molti casi possono essere maggiormente adatti acciai diversi da quelli trattati in questo Manuale. A riguardo sarebbe opportuna la consulenza di un esperto in corrosione.

La documentazione dei produttori sui risultati delle prove di resistenza alla corrosione per numerosi prodotti chimici richiede un'attenta interpretazione. Nonostante essa possa offrire un'indicazione sulle resistenze alla corrosione di un certo tipo di acciaio, le condizioni operative (temperatura, pressione, concentrazione, ecc.) variano ed in genere sono diverse da quelle di prova; inoltre le impurità ed il grado di aerazione della soluzione possono avere un notevole effetto sui risultati.

### ***Terreni***

La corrosione esterna dell'acciaio inossidabile interrato dipende dalla chimica e dalla resistività del terreno. I terreni differiscono nella loro corrosività in funzione del livello di umidità, del pH, dell'aerazione, della presenza di contaminazione chimica, dell'attività microbiologica e del drenaggio superficiale. Gli acciai inossidabili generalmente lavorano bene in una varietà di terreni e particolarmente bene in terreni ad alta resistività, sebbene della corrosione per pitting (vaiolatura) si sia manifestata in terreni umidi a bassa resistività.

La presenza di specie chimiche aggressive come ioni cloruro e solfati così come di alcuni tipi di batteri e di correnti vaganti (dovute all'alimentazione di sistemi di trasporto elettrici locali come treni e tram) può causare corrosione localizzata. Lo sviluppo di corrente vagante può essere soppresso con un adeguato isolamento elettrico delle strutture (es. rivestimenti o avvolgimenti nel caso di condutture) e/o mediante protezione catodica.

Per la selezione del tipo, è raccomandato considerare la resistenza alla corrosione dell'acciaio inossidabile interrato in primo luogo in relazione alla presenza di ioni cloruro, in secondo luogo in funzione della resistività e del pH del terreno, assumendo in tutti i casi terreni scarsamente drenati. La tabella 3.8 raccomanda i gradi sfruttabili per differenti condizioni di terreno.

**Tabella 3.8** *Tipi di acciaio inossidabile per l'impiego in differenti tipologie di terreno*

Sito	Condizioni del terreno	Tipo di acciaio
Entroterra	Cl < 500 ppm	1.4301
	Resistività >1000 ohm cm pH > 4.5	1.4404
Marino – zona non soggetta a maree	Cl < 1500 ppm	1.4404
	Resistività >1000 ohm cm pH > 4.5	
Marino – zona soggetta a maree		1.4410
		1.4547

Nota:  
Il tipo 1.4410 è un duplex e il tipo 1.4547 è un super-austenitico. Questi tipi non sono generalmente utilizzati nelle costruzioni e non rientrano tra gli scopi di questo Manuale di Progettazione.

### **Controllo della corrosione in fase di progetto**

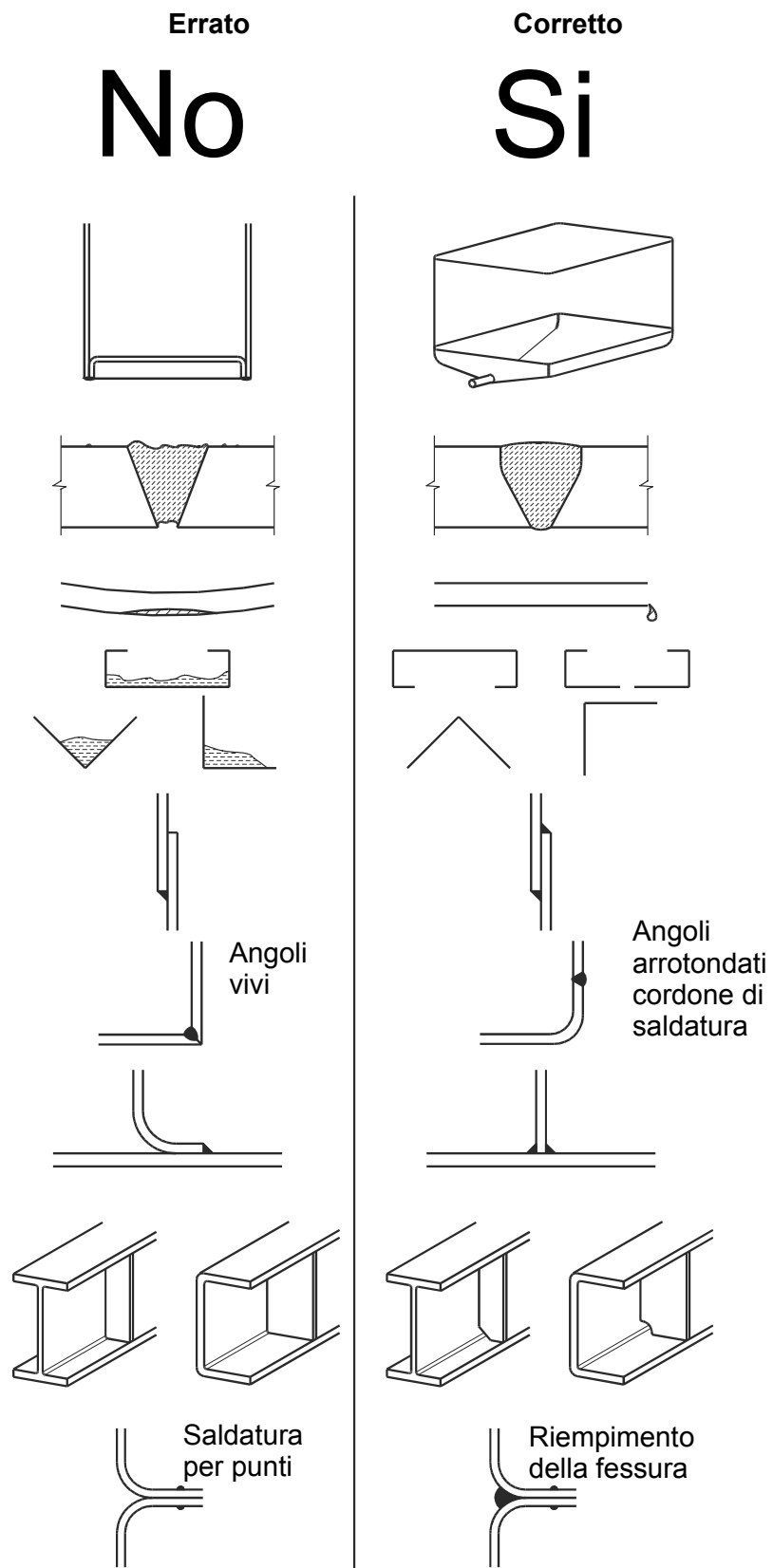
L'operazione più importante nella prevenzione dei problemi di corrosione è la scelta di una qualità appropriata di acciaio inossidabile, prodotto con processi adatti in funzione dell'ambiente di servizio. Tuttavia, dopo la scelta di un particolare acciaio, bisogna fare il possibile per sfruttare al massimo la resistenza alla corrosione del materiale, ponendo la massima attenzione ai dettagli. In fase di programmazione e nella fase della progettazione esecutiva devono essere considerate le azioni anticorrosive.

La tabella 3.9 fornisce una lista di controllo. Non tutti i punti offriranno i migliori dettagli dal punto di vista strutturale, né tutti i punti devono ritenersi applicabili ad ogni ambiente. Alcuni suggerimenti sono superflui, in particolare in ambienti poco corrosivi o in ambienti sottoposti a regolare manutenzione. La fig. 3.3 illustra le caratteristiche di progetto, valide e non, per la durabilità.

**Tabella 3.9** *Controllo della corrosione in fase di progetto*

<p><b>Evitare l'accumulo di sporcizia:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• orientare i profili ad angolo e a C per render minima la possibilità di infiltrazione di sporcizia</li><li>• prevedere fori di drenaggio con dimensioni sufficienti per evitare l'intasamento</li><li>• evitare superfici orizzontali</li><li>• prevedere una leggera inclinazione nei rinforzi "a fazzoletto" normalmente giacenti su piani orizzontali;</li><li>• usare elementi tubolari e barre (sigillandoli con aria o gas anidri in caso di rischio di formazione di condense pericolose)</li><li>• specificare finiture levigate</li></ul>
<p><b>Evitare fessure:</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• impiegare connessioni saldate anziché bullonate</li><li>• usare saldatura o stuccatura per riempire le connessioni</li><li>• sono preferibili cordoni di saldatura rivestiti/profilati</li><li>• evitare incrostazioni di microrganismi</li></ul>
<p><b>Ridurre la possibilità di rotture da tensocorrosione negli ambienti in cui essa può manifestarsi (cfr. 3.7.2):</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• ridurre al minimo le tensioni residue di fabbricazione con un'accurata scelta dei cicli di saldatura</li><li>• effettuare una pallinatura (evitando però l'uso di pallini di ferro/acciaio)</li></ul>
<p><b>Ridurre la possibilità di corrosione da pitting (ved. Cap. 10):</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• asportare le gocce di saldatura</li><li>• decapare l'acciaio inossidabile per asportare i residui indesiderati dei prodotti di saldatura. Evitare reagenti fortemente ossidanti contenenti cloruri, come il cloruro ferrico; ricorrere viceversa ad un bagno o ad una pasta decapante contenenti una miscela di acido nitrico e di acido fluoridrico. Le saldature devono sempre essere pulite per ripristinare la resistenza alla corrosione</li><li>• evitare l'inserimento di particelle di acciai al carbonio (ad es., utilizzare locali di fabbrica ed utensili esclusivamente per l'acciaio inossidabile)</li><li>• adottare un idoneo piano di manutenzione</li></ul>
<p><b>Ridurre la possibilità di corrosione galvanica (ved. 3.7.2):</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• fornire un isolamento elettrico</li><li>• utilizzare vernici appropriate</li><li>• ridurre l'esposizione all'umidità</li><li>• impiegare metalli con potenziali elettrici molto vicini</li></ul>

Figura 3.3 Confronto di dettagli progettati in maniera errata e corretta ai fini della curabilità



## **4 PROPRIETA' DELLE SEZIONI TRASVERSALI**

### **4.1 Generalità**

Le raccomandazioni dei Cap. 4 e 5 valgono per le sezioni trasversali di elementi con i limiti dimensionali indicati in 4.2.

I rapporti lunghezza/spessore degli elementi stabiliscono se gli elementi stessi, quando sono parzialmente o totalmente soggetti a compressione, presentano fenomeni di instabilità locale con conseguente diminuzione della resistenza della loro sezione. Gli elementi e le sezioni trasversali sono classificati nelle Classi 1, 2, 3 e 4 in funzione della loro suscettibilità all'instabilità e alla loro capacità di ruotare (Classi 1 e 2), cfr. 4.3.

In fase di progetto si può tener conto della resistenza ridotta delle sezioni trasversali della Classe 4, impiegando la larghezza efficace degli elementi, cfr. 4.4.1.

Per calcolare le proprietà della sezione di lamiere sottili ed elementi strutturali formati a freddo a sezione aperta possono essere utilizzate le dimensioni sulla linea media della sezione. Per altri tipi di elementi devono essere utilizzate le dimensioni effettive della sezione.

### **4.2 Rapporti massimi larghezza/spessore**

La tabella 4.1 fornisce i rapporti massimi larghezza/spessore per gli elementi in acciaio inossidabile.

### **4.3 Classificazione delle sezioni trasversali**

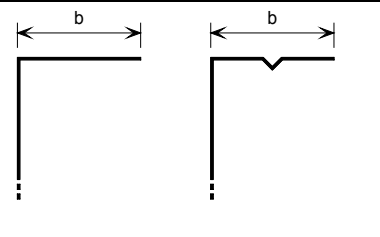
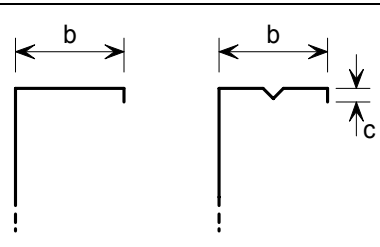
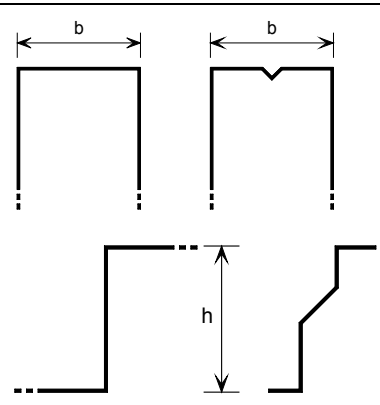
#### **4.3.1 Generalità**

In linea di principio, le sezioni trasversali di elementi in acciaio inossidabile si classificano allo stesso modo di quelle degli acciai al carbonio. Si distinguono le seguenti quattro classi:

- |          |  |
|----------|--|
| Classe 1 | sezioni trasversali che possono formare cerniere plastiche con capacità di rotazioni così come previste nell'analisi plastica;   |
| Classe 2 | sezioni trasversali in grado di offrire un momento plastico resistente, ma con limitate possibilità di rotazione;  |
| Classe 3 | sezioni trasversali in cui la sollecitazione calcolata in corrispondenza della fibra più compressa della membratura può raggiungere la resistenza di snervamento, ma non sono in grado di sviluppare, a causa dell'instabilità locale, un momento plastico resistente; |

Classe 4 sezioni trasversali in cui si manifesta l'instabilità locale prima ancora che sia raggiunto il limite di snervamento in uno o più punti delle sezioni;

**Tabella 4.1** *Massimi rapporti larghezza/spessore*

<p>a) Elemento piano, eventualmente irrigidito, connesso lungo un bordo ad un'anima e con l'altro bordo libero</p>	$b/t \leq 50$	
<p>b) Elemento piano, eventualmente irrigidito, connesso lungo un bordo ad un'anima e lungo l'altro bordo ad una piccola semplice aletta</p>	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$	
<p>c) Elemento piano, eventualmente irrigidito, connesso lungo entrambi i bordi ad un'anima o ad una flangia</p>	$b/t \leq 400$  $h/t \leq 400$	
<p>Note:            Gli elementi piani, come in (a), con rapporti <math>b/t</math> superiori a 30 e tutti gli elementi piani con rapporti <math>b/t</math> approssimativamente superiori a 75, possono mostrare, per i carichi in condizioni di esercizio, distorsioni visibili.</p>		

La classificazione di una sezione trasversale dipende dalla classe più alta (cioè quella più sfavorevole) delle parti che la costituiscono, soggette totalmente o parzialmente a compressione. Si osservi che la classificazione delle sezioni trasversali può variare, in funzione del momento o del carico assiale agenti, lungo la lunghezza dell'elemento.

### 4.3.2 Limiti di classificazione di parti di sezioni trasversali

Gli elementi sono classificati nelle Classi 1, 2 e 3 a seconda dei limiti precisati nella tabella 4.2. Gli elementi che non raggiungono i requisiti della Classe 3 sono classificati nella Classe 4.

**Tabella 4.2** Rapporti massimi larghezza/spessore per parti soggette a compressione (foglio 1)

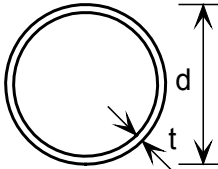
Parti interne compresse				
Classe	Parte soggetta a flessione	Parte soggetta a compressione	Parte soggetta a flessione e compressione	
1	$c/t \leq 56,0\varepsilon$	$c/t \leq 25,7\varepsilon$	se $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq 308\varepsilon/(13\alpha - 1)$ se $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq 28\varepsilon/\alpha$	
2	$c/t \leq 58,2\varepsilon$	$c/t \leq 26,7\varepsilon$	se $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq 320\varepsilon/(13\alpha - 1)$ se $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq 29,1\varepsilon/\alpha$	
3	$c/t \leq 74,8\varepsilon$	$c/t \leq 30,7\varepsilon$	$c/t \leq 15,3\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ per $k_\sigma$ vedasi 4.4.1	
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Tipo	1.4301	1.4401	1.4462
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	220	460
	$\varepsilon$	1,03	1,01	0,698
<b>Note:</b> Per sezioni cave $c$ può essere prudenzialmente assunto come $(h-2t)$ or $(b-2t)$ $E = 200\,000$ N/mm <sup>2</sup> $\alpha = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{N_{Ed}}{f_y c \sum t_w} \right)$ per sezioni simmetriche rispetto all'asse principale				

**Tabella 4.2** (continua) *Rapporti massimi larghezza/spessore per parti soggette a compressione (foglio 2)*

		Distribuzione delle sollecitazioni (compressione: positiva)		
		Estremo in compressione	Estremo in tensione	
<u>Flange esterne</u>				
Classe	Tipo di sezione	Parte soggetta a compressione	Parte soggetta a flessione e compressione	
			Estremo in compressione	Estremo in trazione
1	Formato a freddo	$c/t \leq 10,0\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Saldato	$c/t \leq 9,0\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	Formato a freddo	$c/t \leq 10,4\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10,4\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10,4\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Saldato	$c/t \leq 9,4\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9,4\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9,4\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
3	Formato a freddo	$c/t \leq 11,9\varepsilon$	$c/t \leq 18,1\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$	For $k_\sigma$ see 4.4.1.
	Saldato	$c/t \leq 11,0\varepsilon$	$c/t \leq 16,7\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$	For $k_\sigma$ see 4.4.1.
<u>Angolari</u>				
Si faccia riferimento anche alle <u>Flange esterne</u>				
Non si applica ad angolari in contatto con altri elementi per tutta la lunghezza				
Classe	Sezione compressa			
3	$h/t \leq 11,9\varepsilon$ ; $(b+h)/2t \leq 9,1\varepsilon$			
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Tipo	1.4301	1.4401	1.4462
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	220	460
	$\varepsilon$	1,03	1,01	0,698
Note:				
$E = 200\,000$ N/mm <sup>2</sup>				
$\alpha = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{N_{Ed}}{f_y c \sum t_w} \right)$ per sezioni simmetriche rispetto all'asse principale				



**Tabella 4.2** (continua) *Rapporti massimi larghezza/spessore per parti soggette a compressione (foglio 3)*

Elementi tubolari			
			
Classe	Sezione soggetta a flessione	Sezione soggetta a compressione	
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$	$d/t \leq 50\varepsilon^2$	
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$	$d/t \leq 70\varepsilon^2$	
3	$d/t \leq 280\varepsilon^2$ Nota: per $d/t > 280\varepsilon^2$ si veda EN 1993-1-6	$d/t \leq 90\varepsilon^2$ Nota: per $d/t > 90\varepsilon^2$ si veda EN 1993-1-6	
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Tipo	1.4301	1.4401    1.4462
	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	210	220    460
	$\varepsilon$	1,03	1,01    0,698
Nota: $E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$			

## 4.4 Larghezze efficaci

### 4.4.1 Larghezze efficaci degli elementi con sezione trasversale di Classe 4

Le proprietà delle sezioni trasversali della Classe 4 possono essere determinate analiticamente impiegando le larghezze efficaci delle parti in compressione totale o parziale. In alternativa si possono eseguire prove dirette, vedi Cap. 9.

L'area efficace di una sezione trasversale di Classe 4 in compressione totale o parziale,  $A_{\text{eff}}$ , è l'area lorda della sezione trasversale meno la somma delle aree non efficaci di ciascun elemento snello che costituisce la sezione trasversale stessa. L'area efficace di ciascun elemento di Classe 4 è data dalla larghezza efficace,  $b_{\text{eff}}$ , calcolata nel seguito, moltiplicata per lo spessore dell'elemento. Quando la sezione trasversale è soggetta a flessione, è necessario calcolare un momento d'inerzia efficace,  $I_{\text{eff}}$ , ed un modulo efficace della sezione,  $W_{\text{eff}}$ .

Le larghezze efficaci degli elementi in compressione totale o parziale, possono desumersi dalla tabella 4.3 per elementi interni e dalla tabella 4.4 per elementi esterni.

Le larghezze efficaci delle flange compresse si possono basare sul rapporto  $\psi$  di sollecitazione determinato per la sezione trasversale lorda ( $\psi$  è definito nelle tabelle 4.3 e 4.4). Le larghezze efficaci delle ali devono determinarsi con il rapporto di sollecitazione  $\psi$  stabilito per una sezione trasversale che comprende l'area efficace della flangia di compressione e l'area lorda dell'anima e della flangia in tensione.

Il fattore di riduzione  $\rho$  può essere calcolato nel seguente modo:

Elementi interni laminati a freddo o saldati:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad (4.1a)$$

Elementi esterni formati a freddo:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad (4.1b)$$

Elementi esterni saldati:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,242}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad (4.1c)$$

dove  $\bar{\lambda}_p$  è la snellezza dell'elemento definita come:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (4.2)$$

in cui

$t$  è lo spessore

$k_\sigma$  è il coefficiente d'instabilità corrispondente al rapporto  $\psi$  della tabella 4.3 o 4.4 a seconda del caso

$\bar{b}$  è la larghezza diversa caso per caso:

$\bar{b} = d$  per le anime (eccetto sezioni cave rettangolari)

$\bar{b}$  = larghezza dell'elemento piano per anime di sezioni cave rettangolari, che può essere assunta sempre pari a  $h-2t$

$\bar{b} = b$  per elementi di flange interne (eccetto sezioni cave rettangolari)

$\bar{b}$  = larghezza dell'elemento piano per flange di sezioni cave rettangolari, che può essere  $b-2t$

$\bar{b} = c$  per flange esterne

$\bar{b} = (b+h)/2$  per angolari con ali uguali

$\bar{b} = h$  or  $(b+h)/2$  per angolari con ali diverse

$\varepsilon$  è il coefficiente del materiale, definito alla tabella 4.2.

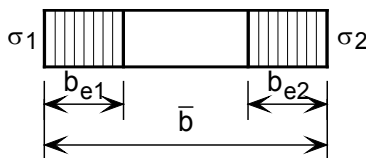
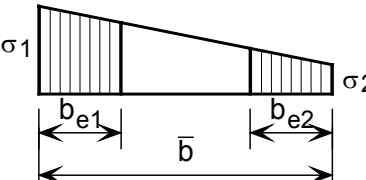
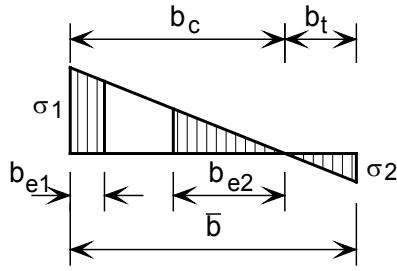
Generalmente l'asse neutro della sezione efficace si trova ad una distanza  $e$  dall'asse neutro della sezione reale, vedi figg. 4.1 e 4.2. Ciò va tenuto in conto nel calcolo delle proprietà della sezione trasversale efficace.

Quando una sezione trasversale è soggetta a compressione assiale, le raccomandazioni al Cap. 5.5.2 tengono conto del momento supplementare  $\Delta M$ , dato da:

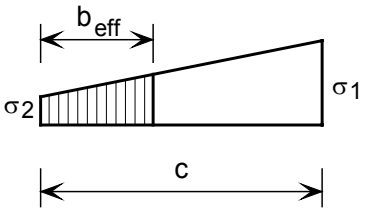
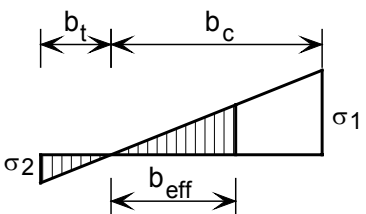
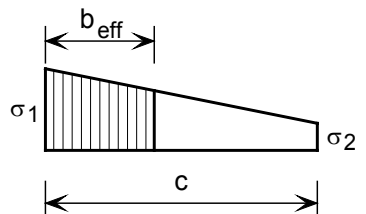
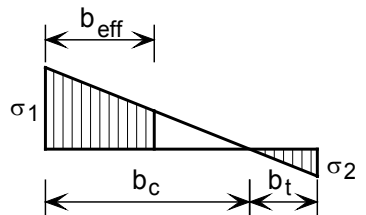
$$\Delta M = N e_N$$

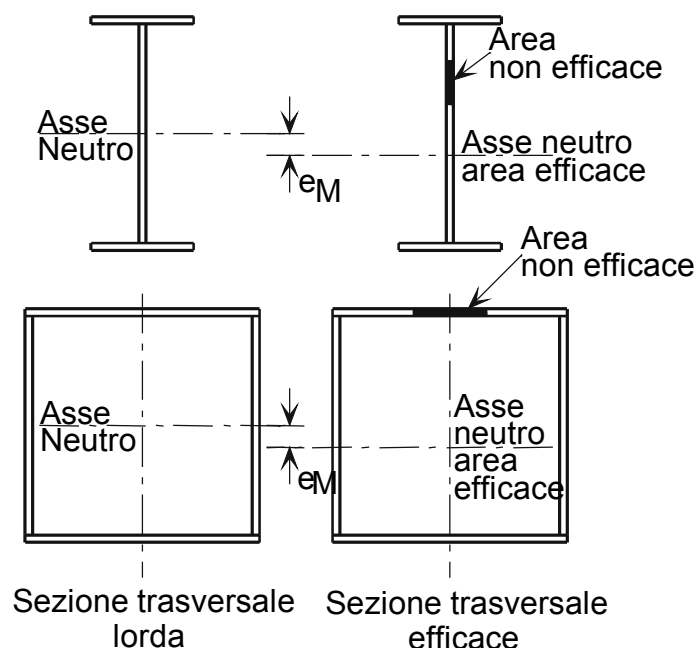
in cui  $e_N$  è lo spostamento dell'asse neutro quando la sezione trasversale è soggetta a compressione uniforme, vedi fig. 4.2.

**Tabella 4.3** Elementi interni soggetti a compressione

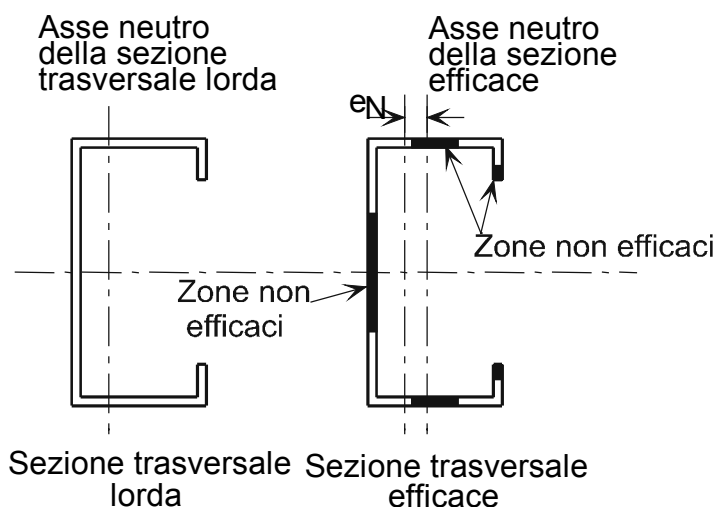
Distribuzione delle sollecitazioni (compressione positiva)				Larghezza efficace $b_{\text{eff}}$		
				$\psi = 1 :$  $b_{\text{eff}} = \rho \bar{b}$  $b_{e1} = 0,5 b_{\text{eff}} \quad b_{e2} = 0,5 b_{\text{eff}}$		
				$1 > \psi \geq 0 :$  $b_{\text{eff}} = \rho \bar{b}$  $b_{e1} = \frac{2 b_{\text{eff}}}{5 - \psi} \quad b_{e2} = b_{\text{eff}} - b_{e1}$		
				$\psi < 0 :$  $b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$  $b_{e1} = 0,4 b_{\text{eff}} \quad b_{e2} = 0,6 b_{\text{eff}}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Fattore di instabilità $k_\sigma$	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

**Tabella 4.4** Elementi esterni soggetti a compressione

Distribuzione delle sollecitazioni (compressione positiva)			Larghezza efficace $b_{eff}$		
			$1 > \psi \geq 0 :$ $b_{eff} = \rho c$		
			$\psi < 0 :$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$+1 \geq \psi \geq -3$	
Fattore di instabilità $k_\sigma$	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21 \psi + 0,07 \psi^2$	
			$1 > \psi \geq 0 :$ $b_{eff} = \rho c$		
			$\psi < 0 :$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Fattore di instabilità $k_\sigma$	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5 \psi + 17,1 \psi^2$	23,8



**Figura 4.1** Sezioni trasversali di Classe 4 soggette a momento flettente



**Figura 4.2** Sezioni trasversali di Classe 4 soggette a compressione

#### 4.4.2 Effetti della diffusione dello sforzo di taglio

L'effetto dello sforzo di taglio sulle flange può essere trascurato se  $b_0 < L_e / 50$  dove  $b_0$  è pari alla larghezza della flangia esterna o a metà della larghezza di un elemento interno e  $L_e$  è la distanza fra i punti di momento flettente nullo. Dove questo limite per  $b_0$  è superato, devono essere considerati gli effetti dello sforzo di taglio sulle flange; in questo caso sono applicabili le linee guida per l'acciaio al carbonio contenute nella EN 1993-1-5. Da notare che la EN 1993-1-5 richiede che lo sforzo di taglio sulle flange venga preso in considerazione sia per gli stati limite di servizio che per gli stati limite ultimi.

### 4.4.3 Accartocciamento delle flange

Per una membratura soggetto a flessione o un profilato ad arco in cui il lato concavo sia in compressione, se le flange sono particolarmente larghe rispetto alle dimensioni della sezione, deve essere preso in considerazione l'effetto sulla capacità portante dell'accartocciamento di una flangia (cioè della sua curvatura verso l'interno, in direzione del piano neutro), a meno che tale accartocciamento risulti inferiore al 5% dello spessore della sezione trasversale del profilato. Se l'accartocciamento è più grande, allora la riduzione della resistenza dell'elemento, ad esempio a causa di una riduzione della lunghezza del braccio di leva di parti delle ampie flange, e il possibile effetto della flessione delle anime, devono essere presi in considerazione.

I rapporti larghezza-spessore delle flange in tipiche travi in acciaio inossidabile sono tali da rendere improbabile l'accartocciamento delle flange. Dove richiesto, è applicabile la guida per acciai al carbonio contenuta nella EN 1993-1-3

## 4.5 Elementi irrigiditi

### 4.5.1 Irrigidimenti ai bordi

Per gli irrigidimenti ai bordi valgono le indicazioni per gli acciai al carbonio presenti nella EN 1993-1-3.

### 4.5.2 Irrigidimenti intermedi

Per gli irrigidimenti intermedi valgono le indicazioni per gli acciai al carbonio presenti nella EN 1993-1-3.

### 4.5.3 Profilati trapezoidali di copertura con irrigidimenti intermedi sulle flange

La sezione trasversale efficace di una flangia con irrigidimenti intermedi, soggetta a compressione uniforme, è costituita dalle aree efficaci ridotte degli irrigidimenti  $A_{s,red}$  che comprendono oltre all'area dell'irrigidimento stesso anche due strisce appartenenti alla flangia, di larghezza  $0,5b_{eff}$  o  $15t$ , adiacenti all'irrigidimento (vedi figg. 4.3 e 4.4).

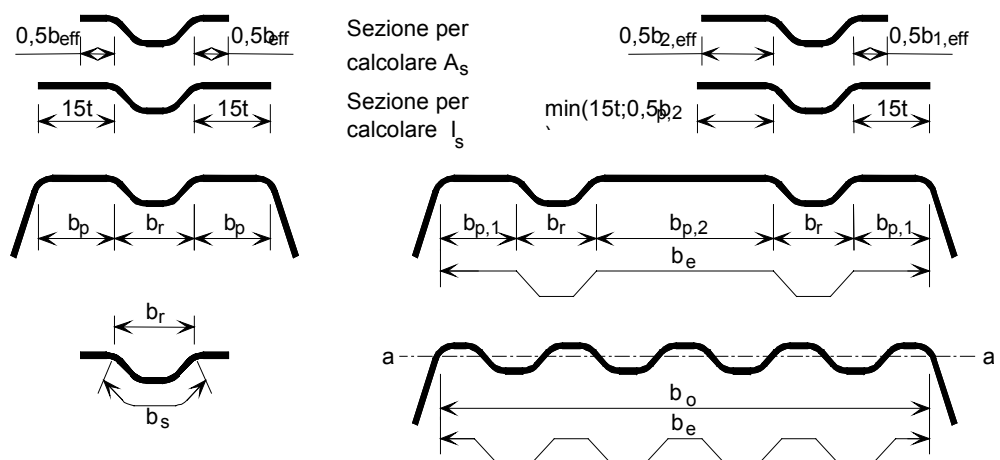
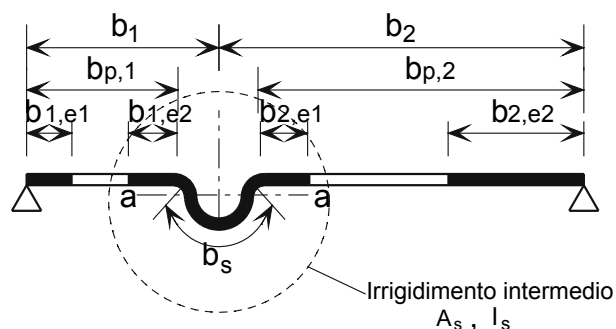


Figura 4.3 Flange in compressione con uno, due o più irrigidimenti



**Figura 4.4** Irrigidimento intermedio

Per un singolo irrigidimento centrale alla flangia, la tensione critica di instabilità elastica  $\sigma_{cr,s}$  (usata per determinare  $\bar{\lambda}_d$ ) si ottiene con la seguente formula:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4b_p^2(2b_p + 3b_s)}} \quad (4.3)$$

dove:

$b_p$  è la larghezza teorica della porzione piana dell'elemento in figg. 4.3, 4.4 e 4.5

$b_s$  è la larghezza dell'irrigidimento misurata lungo il suo perimetro, vedi figg. 4.3, 4.4 e 4.5

$A_s$  è l'area della sezione trasversale dell'irrigidimento intermedio, cioè  $t(b_{1,e2} + b_{2,e1} + b_s)$ , vedi figg. 4.3, 4.4 e 4.5

$I_s$  è il momento d'inerzia dell'irrigidimento, assunto come il momento d'inerzia dell'area efficace  $A_s$  rispetto all'asse baricentrico  $a-a$  della sezione trasversale, vedi figg. 4.3, 4.4 e 4.5

$k_w$  è un coefficiente che tiene conto della parziale limitazione rotazionale della flangia irrigidita offerta dalle anime o da altri elementi adiacenti, vedi sotto. Per il calcolo della sezione trasversale efficace, soggetta a compressione assiale,  $k_w=1,0$ .

Per due irrigidimenti di flangia disposti simmetricamente, la sollecitazione critica d'instabilità elastica  $\sigma_{cr,s}$  si ottiene da:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{8b_l^2(3b_e - 4b_l)}} \quad (4.4)$$

in cui:

$$b_e = 2b_{p,1} + b_{p,2} + 2b_s \quad (4.5)$$

$$b_l = b_{p,1} + 0,5b_r \quad (4.6)$$

dove:

$b_{p,1}$  è la larghezza teorica di una delle parti piane esterne, vedi figg. 4.3, 4.4 e 4.5

$b_{p,2}$  è la larghezza teorica della parte piana centrale, vedi figg. 4.3, 4.4 e 4.5

$b_r$  è la larghezza complessiva dell'irrigidimento, vedi figg. 4.3, 4.4 e 4.5

Il valore di  $k_w$  può essere calcolato a partire dalla lunghezza libera di inflessione  $l_b$  della flangia compressa, nella maniera seguente:

$$\text{se } \frac{l_b}{s_w} \geq 2, \quad k_w = k_{w0} \quad (4.7)$$

$$\text{se } \frac{l_b}{s_w} < 2, \quad k_w = k_{w0} - (k_{w0} - 1) \left[ \frac{2l_b}{s_w} - \left( \frac{l_b}{s_w} \right)^2 \right] \quad (4.8)$$

dove:

$s_w$  è la lunghezza inclinata dell'anima, vedi fig. 4.5.

In alternativa, il coefficiente di limitazione rotazionale  $k_w$  può essere cautelativamente assunto come 1,0 come nel caso di un vincolo a cerniera.

I valori di  $l_b$  e di  $k_{w0}$  possono essere determinati da:

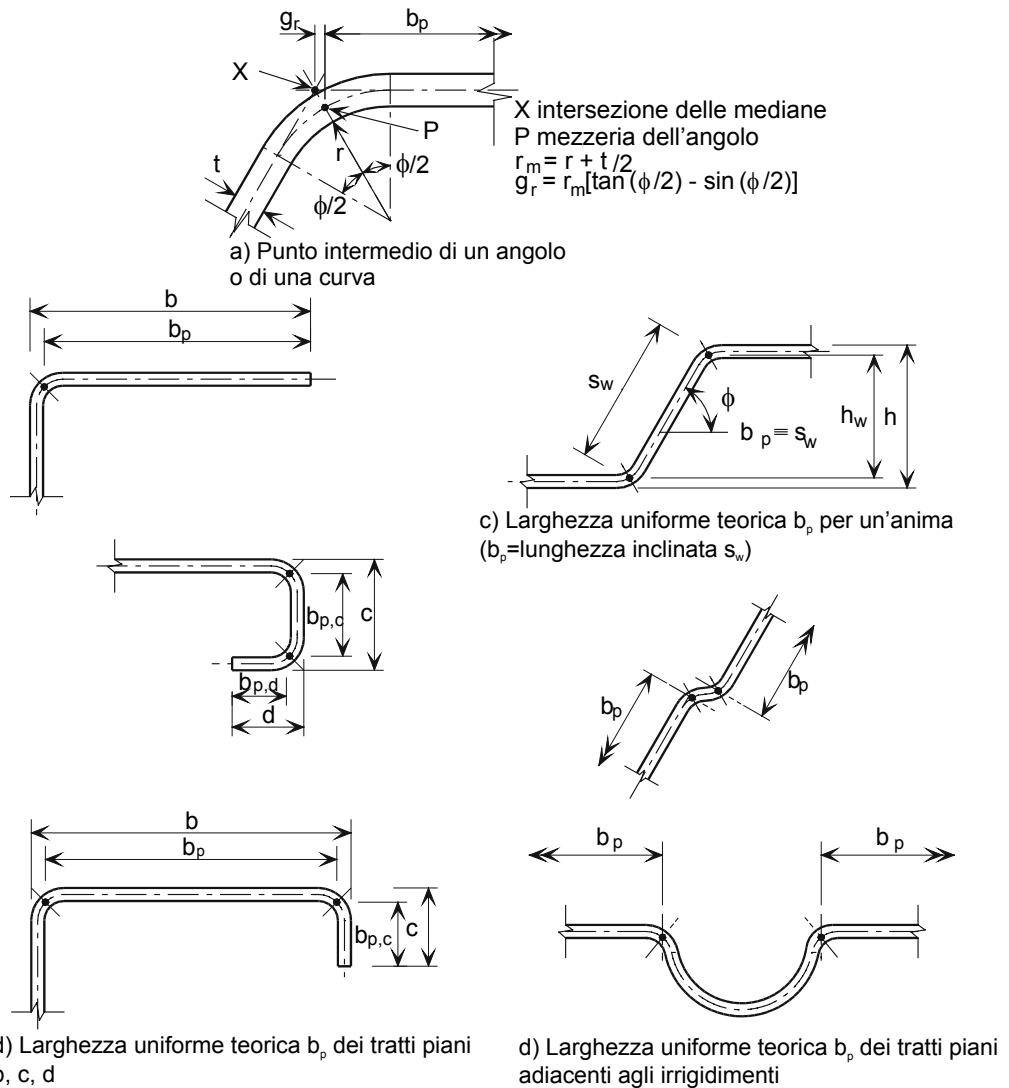
a) per una flangia in compressione con un irrigidimento intermedio:

$$l_b = 3,07 \sqrt[4]{\frac{I_s b_p^2 (2b_p + 3b_s)}{t^3}} \quad (4.9)$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2b_d}{s_w + 0,5b_d}} \quad (4.10)$$

$$\text{con } b_d = 2b_p + b_s \quad (4.11)$$





**Figura 4.5** *Larghezze teoriche dei tratti piani  $b_p$  tenendo conto degli spigoli arrotondati*

b) per una flangia in compressione con due o tre irrigidimenti intermedi:

$$l_b = 3,65 \sqrt[4]{\frac{I_s b_1^2 (3b_e - 4b_1)}{t^3}} \quad (4.12)$$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{(2b_e + s_w)(3b_e - 4b_1)}{b_1(4b_e - 6b_1) + s_w(3b_e - 4b_1)}} \quad (4.13)$$

L'area efficace ridotta dell'irrigidimento  $A_{s,red}$ , per tener conto dell'instabilità locale, deve assumersi come:

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_y / \gamma_{MO}}{\sigma_{com,ser}} \quad \text{ma sempre} \quad A_{s,red} \leq A_s \quad (4.14)$$

dove:

$\sigma_{\text{com,ser}}$  è la massima tensione di compressione nell'irrigidimento (calcolata sulla base della sezione efficace) in condizioni di carico allo stato limite di servizio.

Se le anime non sono rinforzate, il coefficiente di riduzione  $\chi_d$  si ottiene dalle seguenti espressioni:

$$\text{se } \bar{\lambda}_d \leq 0,65 \quad \chi_d = 1,0 \quad (4.15)$$

$$\text{se } 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38 \quad \chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d \quad (4.16)$$

$$\text{se } \bar{\lambda}_d \geq 1,38 \quad \chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} \quad (4.17)$$

$$\text{dove } \bar{\lambda}_d = \sqrt{f_y / \sigma_{\text{cr,s}}}$$

Se le anime sono rinforzate si deve fare riferimento alla EN 1993-1-3.

Nel calcolo delle proprietà delle sezioni efficaci l'area efficace ridotta  $A_{s,\text{red}}$  può essere rappresentata impiegando uno spessore ridotto  $t_{\text{red}} = t A_{s,\text{red}} / A_s$  per tutti gli elementi inclusi in  $A_s$ .

## 4.6 Calcolo delle proprietà delle sezioni

### 4.6.1 Generalità

Il calcolo delle proprietà delle sezioni deve essere eseguito a regola d'arte, considerando ogni riduzione dell'area lorda dovuta ad instabilità locale o alla presenza di fori, a seconda dei casi. Si può trascurare l'assottigliamento del materiale negli angoli laminati a freddo in quanto compensato dall'aumento di resistenza ottenuto con l'incrudimento.

### 4.6.2 Influenza degli angoli arrotondati

L'influenza degli spigoli arrotondati sulla resistenza della sezione trasversale può essere trascurata se il raggio interno  $r \leq 5t$  e  $r \leq 0.10b_p$ ; in tal caso la sezione può essere considerata formata da elementi piani con spigoli vivi.

L'influenza degli angoli arrotondati sulle proprietà delle sezioni può essere considerata con sufficiente approssimazione utilizzando le proprietà calcolate per sezioni analoghe a spigoli vivi, vedi fig. 4.6, e riducendole, con sufficiente precisione, tramite le seguenti approssimazioni:

$$A_g = A_{g,\text{sh}} (1 - \delta) \quad (4.18)$$

$$I_g = I_{g,\text{sh}} (1 - 2\delta) \quad (4.19)$$

$$I_w = I_{w,\text{sh}} (1 - 4\delta) \quad (4.20)$$

con

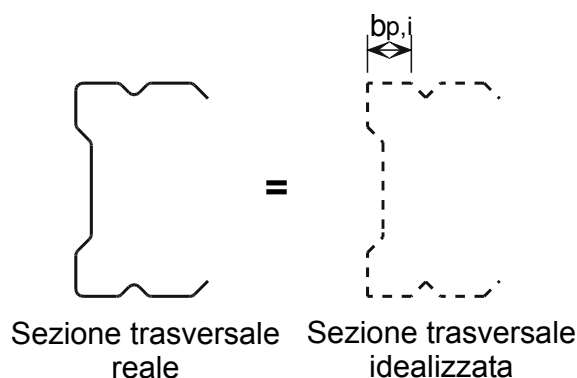
$$\delta = 0,43 \sum_{j=1}^n r_j / \sum_{i=1}^m b_{p,i} \quad (4.21)$$

dove:

$A_g$  è l'area della sezione trasversale lorda

- $A_{g,sh}$  è il valore di  $A_g$  per una sezione trasversale a spigoli vivi
- $b_{p,i}$  è la larghezza teorica piana dell' $i$ -esimo tratto piano di una sezione trasversale a spigoli vivi
- $I_g$  è il momento d'inerzia dell'area della sezione trasversale lorda
- $I_{g,sh}$  è il valore di  $I_g$  per una sezione trasversale a spigoli vivi
- $I_w$  è la costante di ingobbamento della sezione trasversale lorda
- $I_{w,sh}$  è il valore di  $I_w$  per una sezione trasversale a spigoli vivi
- $m$  è il numero dei tratti piani
- $n$  è il numero dei tratti curvi
- $r_j$  è il raggio di curvatura interno del  $j$ -esimo tratto curvo

La riduzione sopra citata può pure essere applicata nel calcolo delle proprietà efficaci  $A_{eff}$ ,  $I_{y,eff}$ ,  $I_{z,eff}$  e  $I_{w,ef}$ , purché le larghezze teoriche dei tratti piani siano misurate tra i punti d'intersezione delle loro mediane rispetto allo spessore.



**Figura 4.6** Sezione trasversale reale ed idealizzata

### 4.6.3 Sezione lorda

Nel calcolare le proprietà delle sezioni trasversali lorde i fori per gli elementi di collegamento (viti e bulloni) non devono essere detratti, ma deve essere considerata una riduzione per le aperture di maggiori dimensioni.

### 4.6.4 Sezione netta

La superficie netta di una sezione o di un elemento della sezione deve essere valutata in termini di superficie lorda tenendo conto opportunamente delle riduzioni dovute a tutte le aperture, compresi i fori per gli elementi di collegamento (viti e bulloni), per i quali si deve considerare il loro diametro nominale.

Quando i fori non sono disposti sfalsati, l'area da sottrarre all'area lorda deve essere calcolata come la massima delle somme delle superfici dei fori in qualsiasi sezione perpendicolare alla direzione dello sforzo.

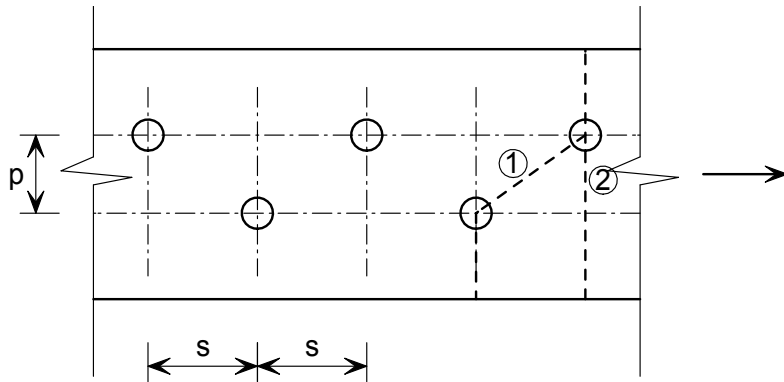
Se i fori sono sfalsati (fig. 4.7) l'area totale dei fori da sottrarre è la maggiore tra:

- l'area dei fori lungo un percorso perpendicolare alla direzione dello sforzo, come per fori non sfalsati (piano di rottura (2) in fig. 4.7)
- $t \left( nd_0 - \sum \frac{s^2}{4p} \right)$

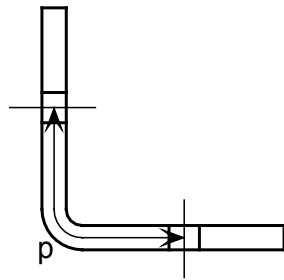
dove:

- $s$  è l'interasse dei fori in direzione parallela allo sforzo
- $p$  è l'interasse dei fori in direzione perpendicolare allo sforzo
- $t$  è lo spessore
- $n$  è il numero di fori seguendo una qualunque linea (diagonale o a zig-zag) che si estende progressivamente attraverso tutto l'elemento, o sua parte (piano di rottura (1) in fig. 4.7)
- $d_0$  è il diametro del foro

Per profilati tipo angolari con fori su entrambe le ali, la distanza va presa al centro dello spessore, vedi fig. 4.8.



**Figura 4.7** Fori sfalsati



**Figura 4.8** Tratto utile per angolare con fori in entrambe le ali

## 4.7 Resistenza delle sezioni

### 4.7.1 Generalità

Questo Capitolo si occupa esclusivamente della resistenza delle sezioni trasversali; tuttavia è comunque necessario un controllo dei possibili fenomeni d'instabilità per stabilire la resistenza di una membratura. L'instabilità di una membratura è analizzata nel Cap. 5. I coefficienti  $\gamma_M$  impiegati in questo capitolo sono riportati nella tabella 2.1.

L'incrudimento connesso al processo di laminazione a freddo (vedi 3.2.2) aumenta generalmente la resistenza delle sezioni trasversali, ma non sono ancora disponibili

dati sufficienti per offrire raccomandazioni per il progetto. Se si vogliono sfruttare i vantaggi dell'incrudimento, si suggerisce di determinare la resistenza delle sezioni trasversali mediante prove dirette (vedi Cap. 9).

In casi eccezionali si possono utilizzare, nella progettazione, le proprietà di incrudimento per deformazione dell'acciaio inossidabile, vedi 4.7.7.

#### 4.7.2 Sezioni trasversali soggette a trazione

La resistenza delle sezioni trasversali soggette solamente a trazione uniforme,  $N_{t,Rd}$ , può essere assunta come la più bassa fra:

a) la resistenza plastica di progetto della sezione trasversale reale:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.22)$$

b) la resistenza massima di progetto della sezione trasversale al netto dei fori per gli elementi di collegamento:

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (4.23)$$

dove:

$A_g$  è l'area lorda

$A_{net}$  è l'area netta o l'area netta efficace (vedi 4.6.4)

$f_y$  è la resistenza caratteristica allo snervamento (generalmente assunta come il valore minimo previsto della tensione unitaria di scostamento dalla proporzionalità allo 0.2%, vedi tabella 3.1)

$f_u$  è la resistenza caratteristica a rottura per trazione (generalmente assunta come valore minimo previsto, vedi tabella 3.1)

$$k_r = [1 + 3r(d_0 / u - 0,3)] \quad \text{comunque } k_r \leq 1,0 \quad (4.24)$$

$r$  = [numero di bulloni nella sezione trasversale]/[numero totale dei bulloni nella giunzione]

$d_0$  è il diametro nominale del foro per il bullone

$u$  =  $2e_2$  comunque  $u \leq p_2$

#### 4.7.3 Sezioni trasversali soggette a compressione

La resistenza di una sezione trasversale soggetta a compressione,  $N_{c,Rd}$ , con risultante agente sul baricentro della sezione lorda (per sezioni trasversali di Classe 1, 2 e 3) o della sezione efficace (per sezioni trasversali della Classe 4), può essere assunta come:

$$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0} \quad \text{per sezioni trasversali di Classe 1, 2 o 3} \quad (4.25)$$

$$N_{c,Rd} = A_{eff} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{per sezioni trasversali della Classe 4} \quad (4.26)$$

Nota: le sezioni di Classe 4 non doppiamente simmetriche possono essere determinate secondo 4.7.6 per tener conto del momento flettente aggiuntivo  $\Delta M_{Ed}$  causato dallo spostamento del baricentro nella sezione efficace, vedi 4.4.1

#### 4.7.4 Sezioni trasversali soggette a momento flettente

In assenza di azioni di taglio e azioni assiali, il momento resistente di progetto di una sezione trasversale soggetta a flessione semplice,  $M_{c,Rd}$ , è dato da:

$$M_{c,Rd} = W_{pl} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{per le sezioni trasversali di Classe 1 o 2} \quad (4.27)$$

$$M_{c,Rd} = W_{el} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{per quelle di Classe 3} \quad (4.28)$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_y / \gamma_{M0} \quad \text{per quelle di Classe 4} \quad (4.29)$$

dove:

$W_{pl}$  modulo di resistenza plastico della sezione

$W_{el}$  modulo di resistenza elastico della sezione

$W_{eff}$  modulo di resistenza elastico della sezione efficace

Per sezioni trasversali soggette a flessione composta, vedasi 4.7.6.

#### 4.7.5 Sezioni trasversali soggette a taglio

Il taglio resistente plastico di una sezione trasversale,  $V_{Rd}$ , può di solito essere assunto come:

$$V_{Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0} \quad (4.30)$$

dove:

$A_v$  è l'area di taglio, che può assumersi come segue:

- per profilati laminati ad I e H, caricati trasversalmente rispetto al loro asse  $A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$  ma non minore di  $\eta h_w t_w$
- per profilati laminati a U, caricati trasversalmente rispetto al loro asse  $A - 2bt_f + (t_w + r)t_f$
- per profilati laminati a T, caricati trasversalmente rispetto al loro asse  $0,9(A - bt_f)$
- per profilati saldati ad I, H e scatolari, caricati trasversalmente rispetto al loro asse:  $\eta \sum (h_w t_w)$
- per profilati saldati a I, H, U e scatolari con carico parallelo rispetto al loro asse:  $A - \sum (h_w t_w)$
- per profilati tubolari laminati a sezione rettangolare di spessore uniforme:
  - con carico parallelo all'altezza:  $Ah / (b + h)$
  - con carico parallelo alla larghezza:  $Ab / (b + h)$
- per profilati tubolari a sezione circolare di spessore uniforme:  
 $2A / \pi$

$A$  è l'area della sezione

$h$  è l'altezza totale

$b$  è la larghezza totale

- $h_w$  è l'altezza dell'anima della sezione
- $r$  è il raggio degli angoli
- $t_f$  è lo spessore della flangia
- $t_w$  è lo spessore dell'anima (se non è costante va preso il valore minimo)
- $\eta$  vedere la EN 1993-1-5 (la EN 1993-1-4 raccomanda  $\eta = 1,20$ )

Nota: lo stesso valore di  $\eta$  deve essere utilizzato per calcolare la resistenza all'instabilità locale a taglio così come utilizzato per calcolare la resistenza alla deformazione plastica di taglio. Per temperature superiori a 400 °C, va assunto pari a 1.0.

Anche la resistenza all'instabilità per taglio deve essere controllata, vedi 5.4.3.

#### 4.7.6 Sezioni trasversali soggette a combinazioni di carichi

Quando sono contemporaneamente presenti sulla sezione momento flettente e carico assiale allora deve essere verificato quanto segue.

Per sezioni di Classe 1 e 2 il criterio di resistenza da soddisfare è:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad (4.31)$$

dove:

$M_{N,Rd}$  è il momento resistente plastico di progetto, ridotto opportunamente per la presenza della forza assiale  $N_{Ed}$ .

Per sezioni simmetriche rispetto ad entrambi gli assi (ad I, H o altro) non bisogna tenere in conto l'effetto della forza assiale sul momento resistente plastico rispetto all'asse y-y quando entrambi i seguenti criteri sono soddisfatti:

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \text{ and} \quad (4.32a)$$

$$N_{Ed} \leq 0,5h_w t_w f_y / \gamma_{M0} \quad (4.32b)$$

In assenza di forze di taglio per le sezioni di Classe 3 e 4 la massima tensione longitudinale deve soddisfare il seguente criterio di resistenza:

$$\sigma_{x,Ed} \leq f_y / \gamma_{M0} \quad (4.33)$$

dove:

$\sigma_{x,Ed}$  è la massima tensione longitudinale dovuta alla forza assiale ed al momento flettente di progetto, calcolata rispetto alla sezione netta.

Per le sezioni di Classe 4 deve inoltre essere soddisfatto il seguente criterio:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff,y,min} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff,z,min} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1 \quad (4.34)$$

dove:

$A_{eff}$  è l'area efficace della sezione soggetta a compressione uniforme

$W_{eff,min}$  è il modulo di resistenza efficace calcolato rispetto all'asse principale

$e_N$  è lo spostamento che subisce l'asse baricentrico principale nel calcolo della sezione efficace per compressione uniforme

Si noti che per sezioni angolari gli assi  $y$  e  $z$  precedentemente nominati corrispondono rispettivamente agli assi  $u$  e  $v$ .

Se  $V_{Ed}$  supera il 50% di  $V_{pl.Rd}$ , la resistenza di progetto della sezione trasversale in presenza di una combinazione del momento e della sollecitazione assiale deve essere calcolata, per l'area soggetta a taglio, con un carico di snervamento ridotto,  $(1 - \rho)f_y$ , in cui  $\rho = (2V_{Ed}/V_{pl.Rd} - 1)^2$ .

#### **4.7.7 Sfruttamento delle proprietà allo stato incrudito**

In determinati casi, come quello di travi soggette a carichi accidentali di breve durata, è possibile considerare, in fase di progetto, i vantaggi delle proprietà dell'incrudimento degli acciai inossidabili.

A tal proposito può essere adottato, in tutti i calcoli, un valore  $\sigma_0$  della resistenza allo snervamento  $f_y$ , superiore rispetto a quello solito di scostamento dalla proporzionalità dello 0.2%. Si raccomanda che, in mancanza di una valutazione più dettagliata, che probabilmente richiederebbe una analisi non lineare agli elementi finiti, siano osservate le seguenti limitazioni:

- la sezione trasversale deve essere di Classe 1 o 2 e calcolata usando  $\sigma_0$  anziché  $f_y$  nella determinazione di  $\varepsilon$  nella tabella 4.2;
- la sezione trasversale è soggetta solamente a flessione semplice secondo l'asse maggiore;
- la membratura considerata non deve essere interessata da alcun fenomeno di instabilità (flessionale, torsionale, torsionale-laterale o locale, vedi Cap.5), utilizzando ancora  $\sigma_0$  in tutti i calcoli;
- i collegamenti alle membrature adiacenti e le membrature stesse devono essere abbastanza robusti da migliorare la resistenza della membratura.

Particolare attenzione va posta nella determinazione dei requisiti di resistenza dei collegamenti.

Per le sezioni trasversali di Classe 3 e 4, si possono assumere resistenze maggiori purché i relativi valori siano verificati dalle prove dirette citate nel Cap. 9.



## 5 PROGETTO DI ELEMENTI

### 5.1 Introduzione

Le verifiche di progetto per le membrature in acciaio inossidabile sono analoghe a quelle richieste per le membrature in acciaio al carbonio. Si raccomanda di ricavare forze e momenti agenti su di essi da un'analisi elastica globale.

Oltre alla resistenza delle sezioni trasversali, vedi Cap. 4, si deve tener conto dei fenomeni di instabilità globale delle membrature, di cui si occupa questo capitolo.

Un possibile metodo progettuale per affrontare la verifica dell'instabilità delle membrature in acciaio inossidabile è quello di usare il modulo tangente, in corrispondenza del carico di punta, anziché il modulo iniziale come nelle norme per gli acciai al carbonio. L'assunzione di livelli di approssimazione sulla geometria e sulle tensioni residue analoghi a quelli degli acciai al carbonio e l'utilizzo delle stesse regole valide per gli acciai al carbonio permette di solito di raggiungere risultati soddisfacenti. I progettisti possono seguire questa strada, che però richiede tecniche di soluzione iterative, che non sono state trattate in questo manuale, salvo in alcuni casi in cui sono state applicate per ricavare curve progettuali da usare con il modulo iniziale. E' stato dato invece maggior rilievo alla taratura mediante dati sperimentali disponibili.

I paragrafi seguenti si applicano a sezioni almeno un asse di simmetria. La resistenza di membrature sprovviste di un qualunque asse di simmetria deve essere verificata con prove appropriate.

### 5.2 Membrature soggette a trazione

Le membrature soggette unicamente a trazione non presentano fenomeni di instabilità; pertanto, il loro progetto può basarsi solamente sulla resistenza della sezione trasversale, cfr. 4.7.2, e sulla resistenza dei loro giunti, vedi Cap.6.

Per un angolare connesso solo mediante un'ala o per altre membrature connesse in modo asimmetrico:

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} \leq N_{u,Rd} \quad (5.1)$$

dove i termini sono definiti in 4.7.2 and  $N_{u,Rd}$  è ricavato nella 6.2.3, equazioni 6.5, 6.6 o 6.7

### 5.3 Membrature soggette a compressione

#### 5.3.1 Generalità

Gli elementi soggetti a compressione possono subire numerosi tipi di instabilità, tra cui:

- instabilità delle parti piane della sezione (soltanto per la Classe 4)
- instabilità flessionale,
- instabilità torsionale,
- instabilità flesso-torsionale.

### **Sezioni con due assi di simmetria (profilati cavi rettangolari e circolari, travi ad I, ecc.)**

Le sezioni trasversali a simmetria doppia non necessitano di verifica per l'instabilità flessio-torsionale dato che il loro centro di taglio coincide con il loro baricentro; l'instabilità torsionale può però essere critica.

I profilati a sezione rettangolare e tubolari non presentano instabilità torsionale.

Per la serie dimensionale di profilati cavi rettangolari, tipicamente usati in edilizia, l'instabilità torsionale non è critica, ma deve essere tenuto in conto solo per i tipi rettangolari cavi con rapporti  $h/b$  insolitamente elevati.

### **Sezioni con un asse di simmetria (angolari ad ali eguali, profilati a U, ecc.)**

Occorre verificare i profilati del tipo a sezione a U e gli angolari ad ali eguali per l'instabilità flessio-torsionale poiché il loro centro di tagli non coincide con il loro baricentro.

### **Sezioni antisimmetriche (profilati a Z, a croce, ecc.)**

L'instabilità torsionale può essere il modo critico di instabilità per questi elementi.

## **5.3.2 Instabilità delle lamiere**

Si tiene conto dell'instabilità della lamiera per le sezioni di Classe 4 usando il coefficiente  $\beta_{A,c}$ , che è il rapporto fra l'area efficace e quella lorda della sezione trasversale. Occorre considerare nelle sezioni trasversali asimmetriche di Classe 4 il momento supplementare, dovuto allo spostamento dell'asse neutro della sezione efficace da quello della sezione lorda come illustrato in 5.5.

## **5.3.3 Instabilità per flessione**

La resistenza all'instabilità per flessione deve essere determinata mediante la:

$$N_{b,Rd} = \chi \beta_A A_g f_y / \gamma_{M1} \quad (5.2)$$

dove:

$\beta_A = 1$  per le sezioni trasversali di Classe 1, 2, 3

$= A_{eff}/A_g$  per le sezioni trasversali di Classe 4

$A_{eff}$  è l'area efficace di sezioni trasversali di Classe 4

$A_g$  è l'area lorda

$\chi$  è il coefficiente di riduzione per tenere conto dell'instabilità, dato da:

$$\chi = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1 \quad (5.3)$$

in cui:

$$\varphi = 0,5 \left( 1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \right) \quad (5.4)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\beta_A A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\beta_A f_y}{E}} \quad (5.5)$$

dove

$\alpha$  è il fattore di imperfezione definito nella tabella 5.1

$N_{cr}$  è la forza elastica critica per il relativo modo di instabilità basata sulle proprietà della sezione trasversale lorda

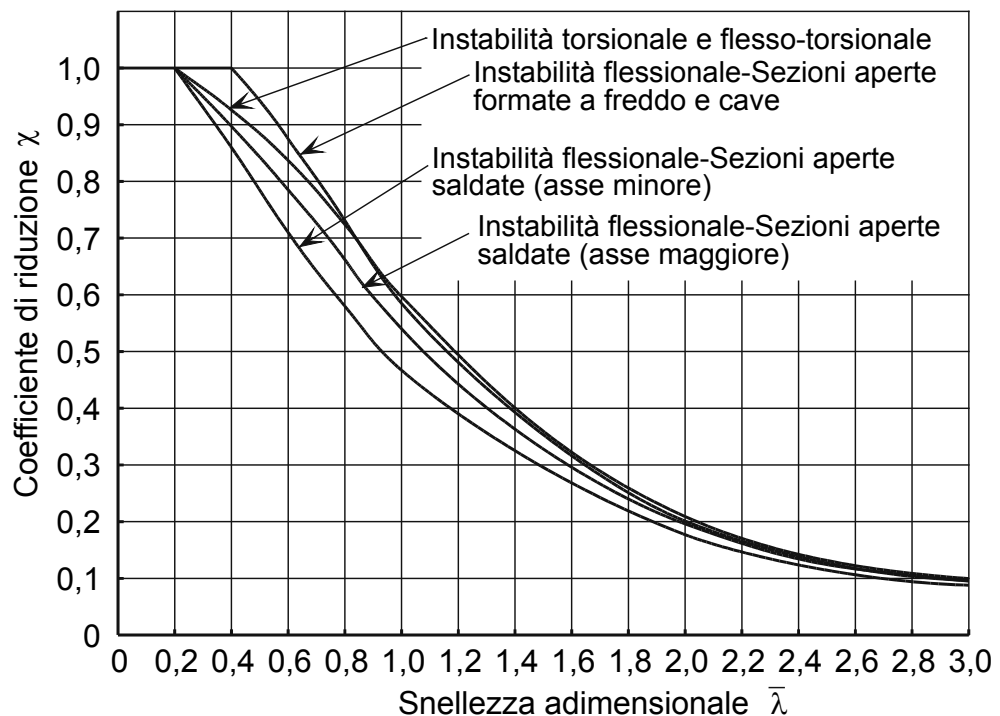
$\bar{\lambda}_0$  è la snellezza limite adimensionale definita in tabella 5.1

$L_{cr}$  è la lunghezza libera di inflessione nel piano di instabilità considerato, determinata sulla base delle condizioni vincolari

$i$  è il raggio giratore intorno al relativo asse, determinato utilizzando le proprietà della sezione trasversale lorda

Le curve di instabilità sono illustrate in fig. 5.1. I valori per  $\alpha$  e  $\bar{\lambda}_0$  riportati nella tabella 5.1 non si applicano a sezioni cave ricotte dopo la fabbricazione.

Se la snellezza adimensionale è tale che  $\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0$  o  $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq \bar{\lambda}_0^2$  gli effetti di instabilità possono essere trascurati ed è necessario verificare solo la sezione trasversale.



**Figura 5.1** Curve di instabilità flessionale, torsionale e flessio-torsionale

Il calcolo della lunghezza libera di inflessione deve essere basato sui principi della meccanica strutturale, prendendo in considerazione le condizioni al contorno.

**Tabella 5.1** Valori di  $\alpha$  e  $\bar{\lambda}_0$  per l'instabilità flessionale, torsionale e flesso-torsionale

Tipo di instabilità	Tipo di elemento	$\alpha$	$\bar{\lambda}_0$
Flessionale	Profilati aperti formati a freddo	0,49	0,40
	Profilati cavi (saldati e non)	0,49	0,40
	Profilati aperti saldati (asse maggiore)	0,49	0,20
	Profilati aperti saldati (asse minore)	0,76	0,20
Torsionale e flesso-torsionale	Tutti gli elementi	0,34	0,20

### 5.3.4 Instabilità torsionale e flesso-torsionale

La resistenza a questi modi di instabilità è determinabile come indicato in 5.3.3 con la sostituzione di  $\bar{\lambda}$  con  $\bar{\lambda}_T$ , come nelle equazioni 5.6 e 5.7, ed assumendo  $\alpha = 0,34$  e  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ .

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{f_y \beta_A A_g}{N_{cr}}} \quad (5.6)$$

in cui:

$\beta_A = 1$  per le sezioni trasversali di Classe 1, 2, 3

$= A_{eff}/A_g$  per le sezioni trasversali di Classe 4

$$N_{cr} = N_{cr,TF} \quad \text{e} \quad N_{cr} < N_{cr,T}$$

dove:

$N_{cr,T}$  è la forza elastica critica di instabilità torsionale

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left( GI_t + \frac{\pi^2 EI_W}{l_T^2} \right) \quad (5.7a)$$

$N_{cr,TF}$  è la forza elastica critica di instabilità torsionale-flessionale

Per sezioni trasversali simmetriche rispetto all'asse y-y (ad esempio  $z_0 = 0$ )

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \left[ 1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left( 1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} \right)^2 + 4 \left( \frac{y_0}{i_0} \right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right] \quad (5.7b)$$

in cui

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2$$

$i_y$  e  $i_z$  sono i raggi giroatori della sezione trasversale lorda intorno agli assi y e z rispettivamente

$y_0$  e  $z_0$  sono le coordinate del centro di taglio con riferimento al baricentro della sezione lorda

$G$  è il modulo di taglio

$l_T$  è la lunghezza di instabilità della membratura per l'instabilità torsionale (vedere la EN 1993-1-3)

$I_T$  è la costante torsionale della sezione trasversale lorda

$I_W$  è la costante di imbozzamento della sezione trasversale lorda

$$\beta = 1 - \left( \frac{y_0}{i_0} \right)^2$$

$N_{cr,y}$  e  $N_{cr,z}$  sono le forze elastiche critiche assiali per instabilità flessionale rispetto agli assi y-y e z-z rispettivamente.

Per una sezioni trasversali con due assi di simmetria il centro di taglio coincide con il baricentro, e quindi  $y_0 = 0$  e  $z_0 = 0$

$$N_{cr,TF} = N_{cr,T} \quad \text{purché} \quad N_{cr,T} < N_{cr,y} \quad \text{e} \quad N_{cr,T} < N_{cr,z}$$

Da notare che per gli angoli, gli assi y e z sopra menzionati devono essere presi rispettivamente come assi u e v.

## 5.4 Membrature soggette a flessione

### 5.4.1 Generalità

Un elemento è sottoposto a flessione semplice quando è sollecitato perpendicolarmente all'asse longitudinale ed è collegato in modo tale da escludere sollecitazioni di torsione, trazione o compressione alle sue estremità.

Per determinare il momento resistente di una trave si deve tener conto dei seguenti fattori:

- snervamento della sezione trasversale (vedi 4.7)
- instabilità delle parti piane (soltanto per sezioni di Classe 4 - vedi 4.7)
- instabilità laterale per torsione (vedi 5.4.2)
- instabilità per taglio (vedi 5.4.3)
- resistenza locale in corrispondenza dei punti di applicazione del carico o delle reazioni vincolari.

Si deve ricordare che per gli elementi sottoposti a flessione, le flange vanno verificate allo sforzo di taglio e all'accartocciamento secondo quanto riportato in 4.4.2 e 4.4.3.

La flessione composta deve essere trattata come descritto in 5.5.3

### 5.4.2 Instabilità laterale per torsione

La possibilità di instabilità laterale per torsione può essere trascurata nelle seguenti circostanze:

- Trave soggetta a flessione esclusivamente secondo l'asse minore;
- Travi vincolate lateralmente per tutta la loro lunghezza da rinforzi d'irrigidimento
- Travi la cui snellezza laterale dimensionale è  $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$  (vedi sotto) o per  $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16$ .

In ogni altro caso, la resistenza all'instabilità laterale per torsione deve essere determinata mediante:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \beta_{w,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1} \quad (5.8)$$

dove

$$\begin{aligned} \beta_{w,y} &= 1 \text{ per sezioni trasversali di Classe 1 o 2} \\ &= W_{el,y} / W_{pl,y} \text{ per sezioni trasversali di Classe 3} \\ &= W_{eff,y} / W_{pl,y} \text{ per sezioni trasversali di Classe 4} \end{aligned}$$

$\chi_{LT}$  è il coefficiente di riduzione che tiene conto dell'instabilità laterale per torsione, dato da

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + [\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0.5}} \leq 1 \quad (5.9)$$

in cui:

$$\varphi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \quad (5.10)$$

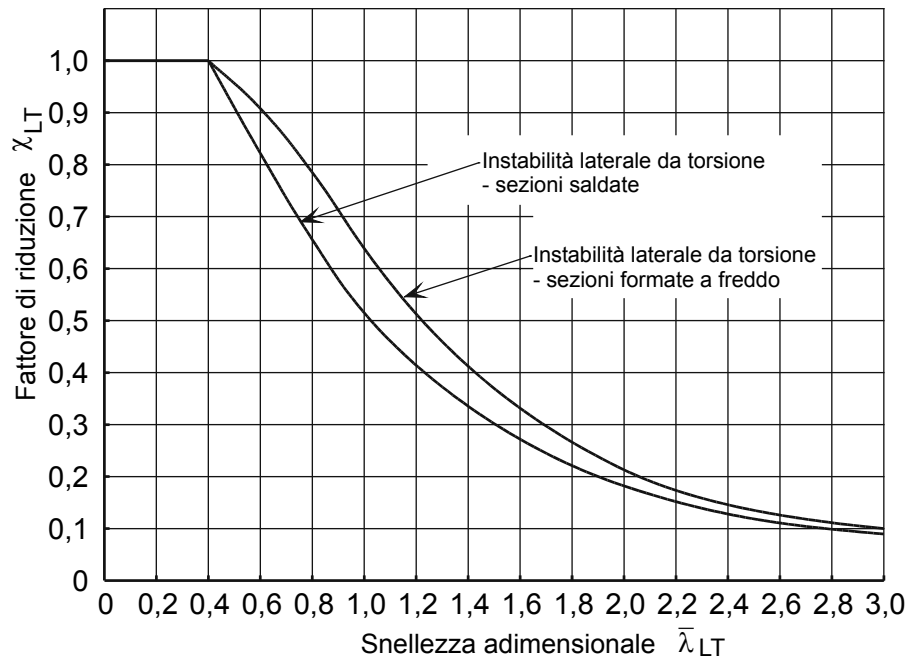
$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (5.11)$$

$\alpha_{LT}$  è il coefficiente di correzione  
 = 0,34 per elementi formati a freddo e tubolari (con o senza saldatura)  
 = 0,76 per elementi saldati a sezione aperta e altri per i quali non sono disponibili dati sperimentali

$M_{cr}$  è il momento elastico critico per l'instabilità laterale torsionale (Appendice B).

Da notare che per gli angolari gli assi  $y$  e  $z$  suddetti devono essere considerato asse  $u$  e  $v$  rispettivamente.

Le curve di instabilità laterale-torsionale sono illustrate in fig. 5.2.



**Figura 5.2** Curve di instabilità laterale-torsionale

### 5.4.3 Resistenza a taglio

#### 5.4.3 Resistenza a taglio

La resistenza a taglio è limitata sia dalla resistenza plastica a taglio (cfr. 4.7.5) sia da quella all'instabilità per taglio.

La resistenza all'instabilità per taglio deve essere controllata quando risulti  $h_w/t \geq 52\varepsilon/\eta$  per anima non irrigidita o  $h_w/t \geq 23\varepsilon\sqrt{k_\tau}/\eta$  per anima irrigidita.

La resistenza all'instabilità per taglio per una trave deve essere calcolata come segue:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (5.12a)$$

nella quale il contributo dell'anima è dato da:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (5.12b)$$

dove:

$h_w$  è l'altezza dell'anima (fig. 5.3)

$\varepsilon$  è definita nella tabella 4.2

$k_\tau$  è il coefficiente di instabilità per taglio

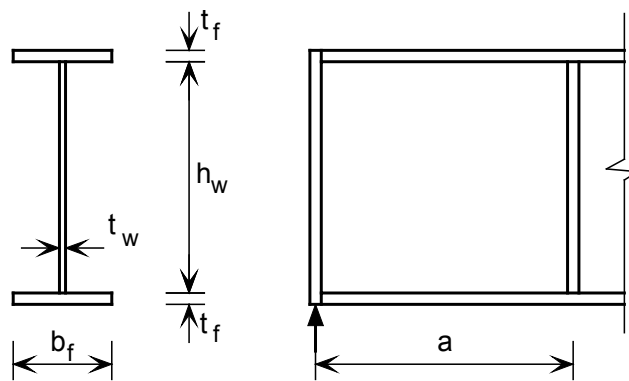
$V_{bw,Rd}$  è il contributo dell'anima alla resistenza all'instabilità per taglio

$V_{bf,Rd}$  è il contributo delle flange alla resistenza all'instabilità per taglio

$f_{yw}$  è il carico di snervamento caratteristico dell'anima

$\eta$  vedere la EN 1993-1-5 (la EN 1993-1-4 raccomanda  $\eta = 1,20$ )

Nota: Lo stesso valore di  $\eta$  utilizzato per calcolare la resistenza all'instabilità per taglio deve essere utilizzato per la resistenza plastica a taglio. Per temperature superiori a 400°C,  $\eta$  deve essere preso pari a 1,0.



**Figura 5.3** Simboli per le dimensioni geometriche

Per anime con irrigidimenti trasversali soltanto agli appoggi e per anime anche con irrigidimenti trasversali intermedi e/o longitudinali, il contributo dell'anima al parametro  $\chi_w$  è dato da:

$$\chi_w = \eta \quad \text{per} \quad \bar{\lambda}_w \leq 0,60 / \eta \quad (5.13a)$$

$$\chi_w = 0,11 + \frac{0,64}{\bar{\lambda}_w} - \frac{0,05}{\bar{\lambda}_w^2} \quad \text{per} \quad \bar{\lambda}_w > 0,60 / \eta \quad (5.13b)$$

Per anime con irrigidimenti trasversali solamente agli appoggi, la snellezza adimensionale  $\bar{\lambda}_w$  deve essere assunta come:

$$\bar{\lambda}_w = \left( \frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon} \right) \quad (5.14)$$

Per anime con irrigidimenti trasversali agli appoggi e con irrigidimenti trasversali e/o longitudinali intermedi, la snellezza adimensionale  $\bar{\lambda}_w$  deve essere assunta come:

$$\bar{\lambda}_w = \left( \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \right) \quad (5.15)$$

dove  $k_\tau$  è il coefficiente d'instabilità per taglio più piccolo per il pannello d'anima. Per anime con irrigidimenti trasversali indeformabili e senza irrigidimenti



longitudinali o con più di due irrigidimenti longitudinali,  $k_\tau$  può essere calcolato come segue:

$$k_\tau = 5,34 + 4,00(h_w/a)^2 + k_{\text{st}} \quad \text{quando} \quad a/h_w \geq 1 \quad (5.16a)$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34(h_w/a)^2 + k_{\text{st}} \quad \text{quando} \quad a/h_w < 1 \quad (5.16b)$$

dove:

$$k_{\text{st}} = 9(h_w/a)^2 \sqrt[4]{\frac{I_{s1}}{t^3 h_w}} \quad \text{ma non meno di} \quad \frac{2,1}{t} \sqrt{\frac{I_{s1}}{h_w}}$$

dove:

$a$  è la distanza fra le mezzerie degli irrigidimenti trasversali, vedi fig. 5.3.

$I_{s1}$  è il momento d'inerzia dell'irrigidimento longitudinale riferito all'asse  $z$

Le equazioni 5.16 si applicano anche a piastre con uno o due irrigidimenti longitudinali se il rapporto  $a/h_w \geq 3$ . Per piastre con uno o due irrigidimenti longitudinali e rapporto  $a/h_w < 3$  bisogna fare riferimento all'Allegato A3 della EN 1993-1-5.

Per semplicità il contributo delle flange  $\chi_f$  può essere trascurato. Tuttavia, se la resistenza della flangia non è completamente utilizzata per contrastare il momento flettente ( $M_{Ed} < M_{f,Rd}$ ) allora il contributo delle flange può essere valutato come segue:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[ 1 - \left( \frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] \quad (5.17)$$

dove:

$b_f$  e  $t_f$  sono presi per la flangia che fornisce la resistenza assiale minore, con  $b_f$  non maggiore di  $15t_f$  sia all'intradosso che all'estradosso

$M_{f,Rd}$  è il momento resistente della sezione trasversale costituita soltanto dall'area efficace delle flange

$$M_{f,Rd} = \frac{M_{f,k}}{\gamma_{M0}}$$

$$c = a \left( 0,17 + \frac{3,5b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right) \quad \text{e} \quad \frac{c}{a} \leq 0,65$$

$f_{yf}$  è la tensione caratteristica di snervamento della flangia

Se è applicata anche una forza assiale  $N_{Ed}$ , il valore di  $M_{f,Rd}$  deve essere ridotto del fattore:

$$\left[ 1 - \frac{N_{Ed}}{(A_{f1} + A_{f2}) \gamma_{M0}} \right] \quad (5.18)$$

dove  $A_{f1}$  e  $A_{f2}$  sono le aree delle flange superiore ed inferiore rispettivamente.

La verifica deve essere condotta come segue:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.19)$$

dove:

$V_{Ed}$  è la forza di taglio di progetto comprensiva del taglio indotto dal momento torcente.

La verifica di una membratura nel caso di flessione biassiale deve essere eseguita come segue:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{y,N}}{f_y W_{y,eff} / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{z,N}}{f_y W_{z,eff} / \gamma_{M0}} \leq 1,0 \quad (5.20)$$

dove:

$A_{eff}$  è l'area efficace della sezione trasversale (cfr. 4.4.1)

$e_{y,N}$  è l'eccentricità dell'asse neutro rispetto all'asse y (cfr. 4.4.1)

$e_{z,N}$  è l'eccentricità dell'asse neutro rispetto all'asse z (cfr. 4.4.1)

$M_{y,Ed}$  è il momento flettente di progetto riferito all'asse y

$M_{z,Ed}$  è il momento flettente di progetto riferito all'asse z

$N_{Ed}$  è la forza assiale di progetto

$W_{y,eff}$  è il modulo efficace della sezione riferito all'asse y (cfr. 4.4.1)

$W_{z,eff}$  è il modulo efficace della sezione riferito all'asse z (cfr. 4.4.1)

Gli effetti dell'azione  $M_{Ed}$  e  $N_{Ed}$  devono includere gli effetti globali del secondo ordine dove rilevanti. La verifica dell'instabilità della piastra del pannello deve essere eseguita per le risultanti delle tensioni ad una distanza di 0,4a o 0,5b, qualunque sia la più piccola, dall'estremità del pannello dove le tensioni sono più alte.

A condizione che  $\bar{\eta}_3$  (vedi sotto) non superi il valore di 0,5, la resistenza di progetto al momento flettente e al carico assiale non deve essere ridotta per tener conto della forza di taglio. Se  $\bar{\eta}_3$  è maggiore di 0,5 gli effetti combinati di flessione e taglio nell'anima di una trave ad I o scatolare devono soddisfare il seguente criterio:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{p1,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{per} \quad \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{p1,Rd}} \quad (5.21)$$

dove:

$M_{f,Rd}$  è il momento resistente plastico di progetto della sezione costituita dall'area efficace delle flange

$M_{p1,Rd}$  è il momento resistente plastico di progetto della sezione costituita dall'area efficace delle flange e dall'area lorda dell'anima indipendentemente dalla sua Classe di appartenenza

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{p1,Rd}} \quad (5.22)$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} \quad (5.23)$$

Le tensioni sono assunte positive.  $M_{Ed}$  e  $N_{Ed}$  devono includere gli effetti del secondo ordine dove rilevanti.

Il criterio dato nell'equazione 5.21 deve essere verificato su tutte le sezioni trasversali tranne quelle posizionate ad una distanza inferiore a  $h_w/2$  da un appoggio con irrigidimento trasversale.

Se è presente un carico assiale  $N_{Ed}$ , allora  $M_{p1,Rd}$  deve essere sostituito dal momento resistente plastico ridotto  $M_{N,Rd}$  secondo la 6.2.9 della EN 1993-1-1 e  $M_{f,Rd}$  deve essere ridotto in accordo all'equazione 5.18. Ci si deve riferire alla EN 1993-1-5 se lo sforzo assiale è così grande che tutta l'anima risulta essere in compressione.

#### 5.4.4 Rottura, deformazione ed instabilità delle anime

Purché le flange siano trattenute lateralmente, la resistenza di un'anima di sezione non irrigidita, soggetta a carichi concentrati o a reazione degli appoggi sarà controllata da uno dei tre possibili seguenti modi di rottura:

- rottura dell'anima in prossimità della flangia con deformazione plastica della flangia;
- deformazione dell'anima sottoforma di instabilità localizzata e rottura dell'anima in prossimità della flangia e con deformazione plastica della flangia;
- instabilità dell'anima per la maggior parte dell'altezza della membratura.

Per sezioni strutturali laminare a freddo possono adottarsi le indicazioni della ENV 1993-1-3 (che sarà sostituita dalla EN 1993-1-3) per gli acciai al carbonio.

Per travi laminare e saldate, si deve adottare il seguente procedimento, basato sulle indicazioni della ENV 1993-1-5 (che sarà sostituita dalla EN 1993-1-5).

Per anime irrigidite o meno la resistenza di progetto all'instabilità locale per applicazione di un carico trasversale è pari a:

$$F_{Rd} = f_{yw} L_{eff} t_w / \gamma_{M1} \quad (5.24)$$

dove:

$L_{eff}$  è la lunghezza efficace di resistenza alle forze trasversali, data da:

$$L_{eff} = \chi_F l_y$$

dove:

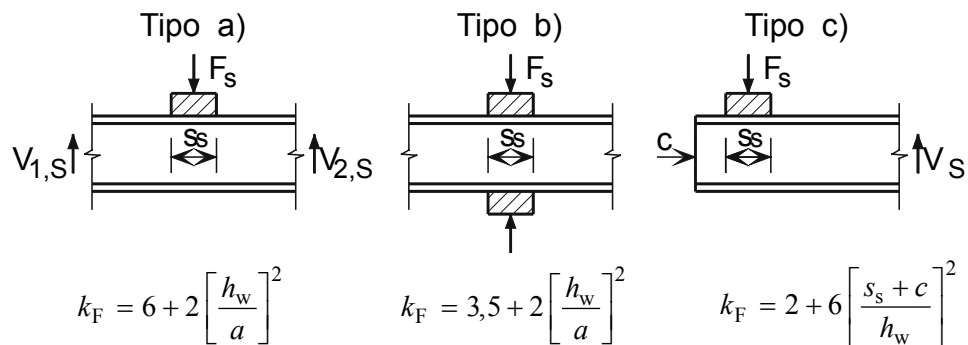
$l_y$  è la lunghezza efficace caricata che dipende dalla larghezza dell'appoggio rigido  $s_s$

$\chi_F$  è il fattore di riduzione per l'instabilità locale

Occorre inoltre considerare l'effetto della forza trasversale sul momento resistente dell'elemento.

Per determinare  $L_{eff}$  si deve distinguere fra tre diversi tipi di forze applicate, e precisamente:

- forze applicate su una flangia e contrastate dalla resistenza al taglio dell'anima (fig. 5.4a);
- forze applicate su una flangia e trasferite direttamente all'altra flangia attraverso l'anima (fig. 5.4b);
- forze applicate su una flangia in prossimità di un appoggio non irrigidito (fig. 5.4c)

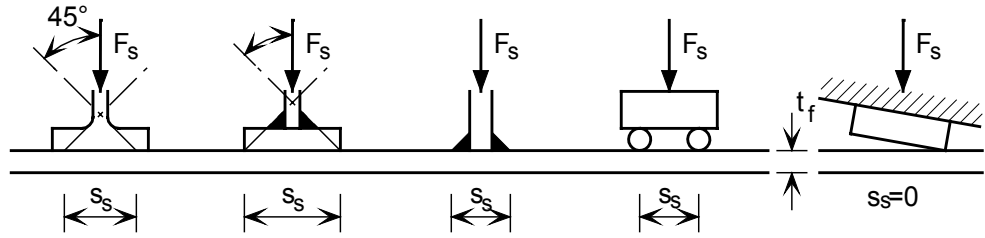


**Figura 5.4** Coefficienti di instabilità per diversi tipi di applicazione di forze sull'anima.

### Lunghezza di appoggio rigido

La lunghezza di un appoggio rigido  $s_s$ , su una flangia, è il tratto su cui è realmente distribuita la forza applicata e può essere determinata, considerando la diffusione del carico nell'acciaio, con una pendenza 1:1, vedi fig.5.5, tuttavia  $s_s$  non può essere maggiore della larghezza dell'anima  $h_w$ .

In presenza di molti carichi concentrati disposti vicini gli uni agli altri, occorre verificare la resistenza per ogni singolo carico, nonché per carico totale con  $s_s$  pari alla distanza da centro a centro fra i carichi più esterni.



**Figura 5.5** Lunghezza di un appoggio rigido

**Lunghezza efficace sotto carico**

La lunghezza efficace caricata,  $l_y$ , deve essere calcolata impiegando due parametri adimensionali,  $m_1$  e  $m_2$ , che si ottengono da:

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \tag{5.25}$$

$$m_2 = 0,02 \left( \frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{per } \bar{\lambda}_F > 0,5 \tag{5.26a}$$

$$m_2 = 0 \quad \text{per } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \tag{5.26b}$$

Per i casi a) e b) in fig. 5.4,  $l_y$  deve essere ricavata con la formula:

$$l_y = s_s + 2t_f \left[ 1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right] \tag{5.27}$$

ma  $l_y$  non deve superare la distanza tra due irrigidimenti trasversali adiacenti.

Per il caso c) in fig. 5.4,  $l_y$  deve ottenersi dal più piccolo dei valori dati dalle formule 5.28 e 5.29. Nella 5.30  $s_s$  deve assumersi nulla se la struttura che genera la sollecitazione non ha la stessa inclinazione della trave, cfr. fig. 5.5.

$$l_y = l_e + t_f \left[ \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left[ \frac{l_e}{t_f} \right]^2} + m_2 \right] \tag{5.28}$$

$$l_y = l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \tag{5.29}$$

dove  $l_e$  è dato da:

$$l_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c \tag{5.30}$$

**Lunghezza resistente efficace**

La lunghezza resistente efficace deve calcolarsi come segue:

$$L_{eff} = \chi_F l_y \tag{5.31}$$

con

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,0 \quad (5.32)$$

$$\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}} \quad (5.33)$$

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad (5.34)$$

dove:

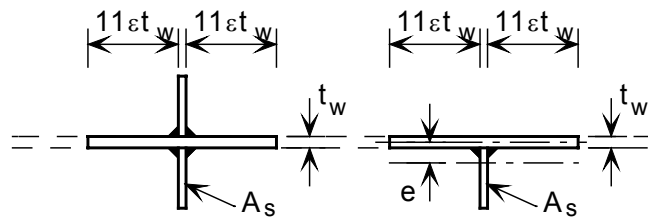
$k_F$  è il coefficiente di instabilità per i diversi modi di applicazione delle forze (fig. 5.4).

Da notare che per calcolare  $m_2$ , deve essere assunto un valore per  $\bar{\lambda}_F$ . Una volta calcolato il valore di  $\bar{\lambda}_F$ , può essere necessario ricalcolare il valore di  $m_2$ .

#### 5.4.5 Irrigidimenti trasversali

Gli irrigidimenti trasversali agli appoggi ed in altre posizioni dove gravano forze esterne significative, devono preferibilmente applicarsi su entrambi i lati e simmetricamente rispetto alla mezzzeria dell'anima. Questi irrigidimenti devono essere verificati a rottura e instabilità delle sezioni trasversali. Gli irrigidimenti intermedi non soggetti a forze esterne devono essere verificati solo all'instabilità.

La sezione trasversale efficace da usare nella verifica all'instabilità deve comprendere una parte dell'anima, come si vede dalla fig. 5.6. In corrispondenza delle estremità della trave o in prossimità di un'apertura nell'anima, la larghezza dell'anima da comprendere nel calcolo della sezione dell'irrigidimento non deve superare quella realmente disponibile.



**Figura 5.6** Sezioni trasversali efficaci degli irrigidimenti per l'instabilità

La resistenza all'instabilità degli irrigidimenti simmetrici può essere determinata come indicato in 5.3.3 assumendo  $\alpha = 0,76$  e  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ . La lunghezza d'instabilità deve essere coerente con le condizioni vincolari, ma non inferiore a  $0,75h_w$  che corrisponde a vincoli di incastro ad entrambe le estremità. Valori maggiori della lunghezza d'instabilità possono essere assunti quando il vincolo agli estremi è meno rigido.

Per rinforzi su un solo lato o altri di tipo non simmetrico, l'eccentricità che ne consegue deve essere determinata come indicato in 5.5.2

Agli appoggi o in posizioni intermedie dove sono applicati carichi considerevoli, la resistenza all'instabilità deve essere superiore alla reazione vincolare o al carico

applicato. In altre posizioni intermedie, lo sforzo di compressione  $N_{Ed}$ , negli irrigidimenti può ricavarsi dalla:

$$N_{Ed} = V_{Ed} - \frac{1}{\lambda_w^2} \frac{f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} \quad (5.35)$$

dove:

$V_{Ed}$  è lo sforzo di taglio di progetto sulla membratura

La precedente espressione va calcolata supponendo che l'irrigidimento in questione sia stato rimosso.

Il momento d'inerzia in un'area di un irrigidimento intermedio,  $I_s$ , deve soddisfare quanto segue:

$$a / h_w < \sqrt{2}, \quad I_s \geq 1,5 h_w^3 t_w^3 / a^2 \quad (5.36)$$

$$a / h_w \geq \sqrt{2}, \quad I_s \geq 0,75 h_w^3 t_w^3 \quad (5.37)$$

#### 5.4.6 Determinazione degli spostamenti

Gli spostamenti vanno determinati in base alla combinazione dei carichi relativa allo stato limite di servizio.

La freccia elastica delle travi (cioè quella che non forma una cerniera plastica) può essere stimata con la normale teoria delle strutture, salvo impiegare il modulo secante di elasticità al posto del modulo di Young. Il modulo secante elastico varia con il grado di sollecitazione ed i suoi valori possono ricavarsi dall'Appendice C. Questo metodo semplificato è accurato nello stimare le frecce quando il modulo secante si basa sulla sollecitazione massima in un elemento e questa non supera il 65% del carico unitario di scostamento dalla proporzionalità dello 0,2%. A livelli di sollecitazione più elevati, il metodo diventa troppo cautelativo ed è preferibile utilizzarne un altro più accurato (ad es. quello che richiede un'integrazione sulla lunghezza dell'elemento).

Nel caso di sezioni trasversali di Classe 4 e/o di elementi soggetti a sforzo di taglio, occorre tener conto nei calcoli di una sezione efficace. Come prima valutazione è opportuno utilizzare la sezione efficace basata sulle larghezze efficaci indicate in 4.4.1 e/o 4.4.2. Per una maggior precisione si può utilizzare una sezione efficace basata su larghezze efficaci all'instabilità determinate sull'effettiva sollecitazione sull'elemento, assumendo  $\varepsilon$  in 4.4.1 (ma non in 4.4.2) come:

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{\sigma} \frac{E}{210000} \right]^{1/2} \quad (5.38)$$

dove:

$\sigma$  è lo sforzo effettivamente agente sulla sezione trasversale efficace dell'elemento

$E$  è il modulo di Young:

## 5.5 Membrature soggette alla combinazione di carichi assiali e momenti flettenti

### 5.5.1 Trazione e flessione

Membrature soggette a trazione e flessione devono essere verificate all'instabilità laterale, secondo 5.4.2 sotto l'effetto del solo momento; esse devono inoltre essere verificate sotto gli effetti combinati di carico assiale e momento nei punti di massimo momento flettente e carico assiale. Deve essere soddisfatta la seguente relazione:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1 \quad (5.39)$$

dove:

$N_{Ed}$  è il carico assiale di progetto agente nella posizione critica della membratura

$N_{Rd}$  è la resistenza di progetto dell'elemento

$M_{y,Ed}$  è il momento di progetto rispetto all'asse principale agente nella sezione critica

$M_{y,Rd}$  è il momento resistente rispetto all'asse principale in assenza di carico assiale e tenendo conto di ogni riduzione dovuta all'azione del taglio (cfr. 4.7.4)

$M_{z,Ed}$  è il momento di progetto rispetto all'asse secondario agente nella sezione critica

$M_{z,Rd}$  è il momento resistente rispetto all'asse secondario in assenza di carico assiale e tenendo conto di ogni riduzione dovuta all'azione del taglio (cfr. 4.7.4).

### 5.5.2 Compressione e flessione

Oltre a rispettare i requisiti di resistenza delle sezioni trasversali (cfr. 4.7.6) in ogni punto della lunghezza dell'elemento e i requisiti di resistenza per le membrature nel loro comportamento globale (cfr. 5.4), si devono considerare gli effetti dovuti alla presenza contemporanea di sforzi di compressione e momenti flettenti.

#### **Compressione assiale e momento secondo l'asse maggiore**

Per evitare lo svergolamento da instabilità rispetto all'asse maggiore, deve essere:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.40)$$

Per evitare lo svergolamento da instabilità rispetto all'asse minore (per elementi soggetti ad instabilità laterale-torsionale) deve essere:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} + k_{LT} \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) \leq 1 \quad (5.41)$$



### Compressione assiale e momento secondo l'asse minore

Per evitare lo svergolamento rispetto all'asse minore, deve essere:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.42)$$

### Compressione assiale e momento secondo entrambi gli assi

Tutti gli elementi devono soddisfare la condizione:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min}} + k_y \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \right) + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.43)$$

Gli elementi potenzialmente soggetti ad instabilità laterale-torsionale devono inoltre soddisfare la condizione:

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} + k_{LT} \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{W,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.44)$$

dove:

$e_{Ny}$  ed  $e_{Nz}$  sono definiti in 4.7.6

$N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$  e  $M_{z,Ed}$  sono i valori di progetto rispettivamente del carico di compressione e dei momenti massimi rispetto agli assi  $y$ - $y$  e  $z$ - $z$  agenti sull'elemento

$(N_{b,Rd})_{\min}$  è il più piccolo valore di  $N_{b,Rd}$  per i seguenti quattro modi di instabilità: flessionale rispetto all'asse  $y$ , flessionale rispetto all'asse  $z$ , torsionale e flessionale-torsionale (cfr. 5.3.3 e 5.3.4)

$(N_{b,Rd})_{\min 1}$  è il più piccolo valore di  $N_{b,Rd}$  per i seguenti tre modi di instabilità: flessionale rispetto all'asse  $z$ , torsionale e flessionale-torsionale (cfr. 5.3.3 e 5.3.4)

$\beta_{W,y}$ ,  $\beta_{W,z}$  sono i valori di  $\beta_W$  determinati per gli assi  $y$  e  $z$  rispettivamente, in cui:

$$\begin{aligned} \beta_W &= 1 \text{ per sezioni trasversali di Classe 1 o 2} \\ &= W_{el}/W_{pl} \text{ per sezioni trasversali di Classe 3} \\ &= W_{eff}, W_{pl} \text{ per sezioni trasversali di Classe 4} \end{aligned}$$

$W_{pl,y}$ , e  $W_{pl,z}$  sono i moduli di plasticità per gli assi  $y$  e  $z$  rispettivamente

$M_{b,Rd}$  è la resistenza di progetto all'instabilità laterale-torsionale (cfr. 5.4.2)

$k_y$ ,  $k_z$ ,  $k_{LT}$  sono i fattori di interazione

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad \text{ma} \quad 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}}$$

$$k_z = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_z - 0,5) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} \quad \text{ma} \quad 1,2 \leq k_z \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}}$$

$$k_{LT} = 1,0$$

Da notare che gli Documenti Nazionali di Applicazione possono indicare altre formule di interazione differenti da quelle sopra indicate.

Da osservare che negli angolari, gli assi  $y$  e  $z$  precedenti devono essere presi rispettivamente come assi  $u$  e  $v$ .

## 6 PROGETTO DEI COLLEGAMENTI

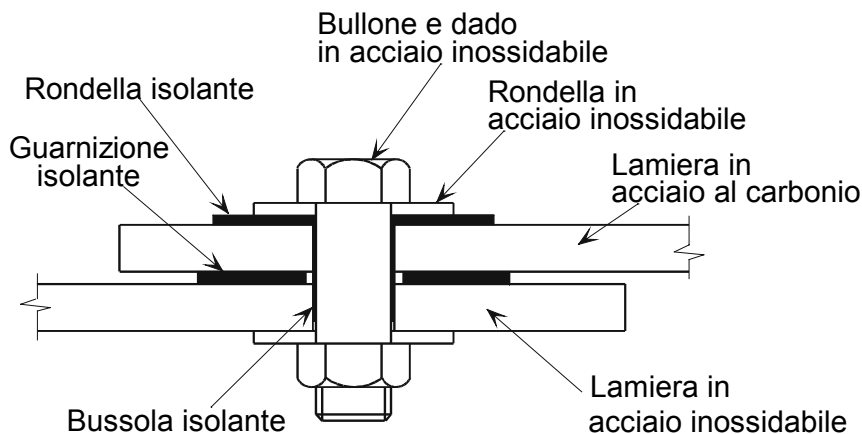
### 6.1 Raccomandazioni generali

#### 6.1.1 Durabilità

La progettazione dei collegamenti richiede speciali attenzioni al fine di preservare il più possibile le proprietà anti-corrosione.

Ciò è particolarmente vero per giunti, che possono inumidirsi in caso di maltempo, spruzzi, immersione, formazione di condense, ecc. E' necessario considerare con attenzione la possibilità di evitare o ridurre i problemi di corrosione connessi, collocando i giunti lontano da fonti di umidità. In alternativa, può essere possibile eliminare tali fonti; ad es., con adeguata ventilazione, nel caso di condense o accertando che la temperatura ambiente all'interno della struttura sia sempre superiore al punto di rugiada.

Quando non è possibile evitare l'umidità per un collegamento fra acciaio inossidabile ed acciaio al carbonio, bisogna impedire la corrosione galvanica, cfr. 3.7.2. Deve sempre essere evitato l'uso di bulloni in acciaio al carbonio per il collegamento di elementi della struttura in acciaio inossidabile. Nei giunti bullonati, per i quali è prevedibile un livello di corrosione inaccettabile, devono essere assolutamente adottate misure per isolare elettricamente gli elementi in acciaio al carbonio da quelli in acciaio inossidabile. Ciò implica l'adozione di rondelle e possibilmente di bussole, isolanti; in fig. 6.1 sono illustrati i tipici dettagli. Per le strutture offshore le autorità preposte alla certificazione talvolta possono richiedere questi provvedimenti, per cui si raccomanda di prendere fin dall'inizio contatti con tali autorità onde stabilire in partenza i precisi requisiti richiesti.



**Figura 6.1** Particolare di un giunto bullonato tra due materiali metallici diversi (contro la corrosione galvanica)

In caso di saldature di parti di acciaio normale con altre in inossidabile, si consiglia generalmente che ogni tipo di verniciatura dell'acciaio al carbonio sia estesa al cordone di saldatura e copra parzialmente l'acciaio inossidabile.

Occorre dedicare particolare cura alla scelta dei materiali in relazione all'ambiente, onde evitare la corrosione interstiziale nei giunti imbullonati (vedi 3.7.2)

Il ciclo di riscaldamento e raffreddamento tipico della saldatura influisce sulla microstruttura di tutti gli acciai inossidabili, in alcuni tipi più che in altri e ciò

assume notevole rilievo nel caso di acciai inossidabili duplex. E' quindi indispensabile l'adozione di tipi di saldatura e di consumabili adatti e che le operazioni relative siano eseguite da saldatori esperti e qualificati. Direttive al riguardo figurano al paragrafo 10.4.

### **6.1.2 Presupposti per la progettazione**

I giunti possono essere progettati distribuendo in maniera realistica forze e momenti interni, tenuto conto della rigidità relativa degli elementi da connettere. Gli sforzi interni ed i momenti devono equilibrare le forze ed i momenti applicati. Ogni elemento considerato, per sopportare il carico presunto, deve essere in grado di resistere alle forze assunte nell'analisi e produrre deformazioni in accordo con la deformabilità dell'elemento.

### **6.1.3 Intersezioni e giunti assiali**

Gli elementi uniti da un giunto sono normalmente disposti in maniera tale che gli assi dei loro baricentri s'intersechino in un punto. Quando si ha eccentricità nell'intersezione, elementi e giunti devono essere progettati per compensare i diversi momenti flettenti. Per angolari bullonati e giunti a T, collegati con almeno due bulloni ad ogni giunto, al posto degli assi dei baricentri, possono adottarsi le linee di posizionamento dei bulloni agli angoli o sulle T, allo scopo di determinare l'intersezione.

I giunti assiali nelle travi devono essere preferibilmente posti nei punti più prossimi al punto di inversione della flessione (valore zero del momento flettente). Per i giunti assiali nei pilastri occorre tener conto di momenti dovuti agli effetti P- $\delta$ .

### **6.1.4 Ulteriori considerazioni generali**

Se un giunto è soggetto ad urti, vibrazioni o a frequenti cambiamenti di segno degli sforzi significativi, è preferibile realizzarlo per saldatura. I giunti così sollecitati devono anche essere verificati a fatica (cfr. 8).

La facilità di fabbricazione e di montaggio sono aspetti da considerare nella progettazione di giunti e di giunti assiali. Occorre prestare attenzione:

- all'uso di particolari standardizzati
- alle tolleranze necessarie per un montaggio in condizioni di sicurezza
- alle tolleranze di serraggio dei bulloni
- alle necessità di accesso per eseguire saldature
- ai requisiti dei procedimenti di saldatura
- agli effetti delle tolleranze angolari e di lunghezza per il montaggio.

Deve osservarsi che le distorsioni causate da saldature si manifestano maggiormente negli acciai inossidabili austenitici rispetto a quelli al carbonio (cfr. 10.4.4). Deve, inoltre, essere dedicata attenzione alle esigenze successive d'ispezione e manutenzione.

## 6.2 Giunti bullonati

### 6.2.1 Generalità

Le raccomandazioni di questo Paragrafo valgono per giunti con bulloni in fori passanti entro le tolleranze dove occorre resistere a taglio, trazione o a taglio e trazione combinati. E' buona pratica usare rondelle sotto la testa della vite e sotto il dado. Indicazioni sui materiali più adatti per bulloni e dadi figurano in 3.1.2 e 10.5.

Gli sforzi di taglio sono trasferiti ai bulloni ed agli elementi connessi. Non viene fornita alcuna raccomandazione per giunti dove il taglio si trasferisce mediante resistenze di attrito (cfr. 6.2.2).

La resistenza di un giunto deve assumersi come la minore tra la resistenza delle parti connesse (cfr. 6.2.3) e quella degli elementi di collegamento (cfr. 6.2.4).

Per limitare le deformazioni irreversibili sui giunti bullonati, gli sforzi sui bulloni e sulle sezioni trasversali nette ai fori dei bulloni, per effetto delle combinazioni di carico caratteristiche, devono avere come limite il valore della resistenza allo snervamento.

### 6.2.2 Bulloni precaricati

I bulloni presollecitati in acciaio inossidabile possono essere usati solo se sono state adottate tecniche idonee di pretensionamento. Se i bulloni in acciaio inossidabile sono eccessivamente serrati, può verificarsi il grippaggio dei filetti. Quando si esegue la presollecitazione, occorre considerare il rilassamento della tensione di serraggio con il passar del tempo. I giunti non devono essere progettati per resistere allo scivolamento agli stati limite ultimi o di servizio, salvo il caso in cui l'accettabilità della particolare soluzione sia confermata da prove.

### 6.2.3 Parti connesse

#### *Fori*

I fori possono essere eseguiti con trapanatura o punzonatura. Tuttavia, l'incrudimento associato alla punzonatura può aumentare la sensibilità alla corrosione e, pertanto, i fori punzonati sono meno adatti in ambienti aggressivi (es. ambienti industriali o marini).

I massimi giochi per i fori standard sono i seguenti:

1 mm per bulloni M12 e M14 (M14 non è una dimensione standard)

2 mm per bulloni da M16 a M24

3 mm per bulloni M27 e maggiori.

#### *Posizione dei fori*

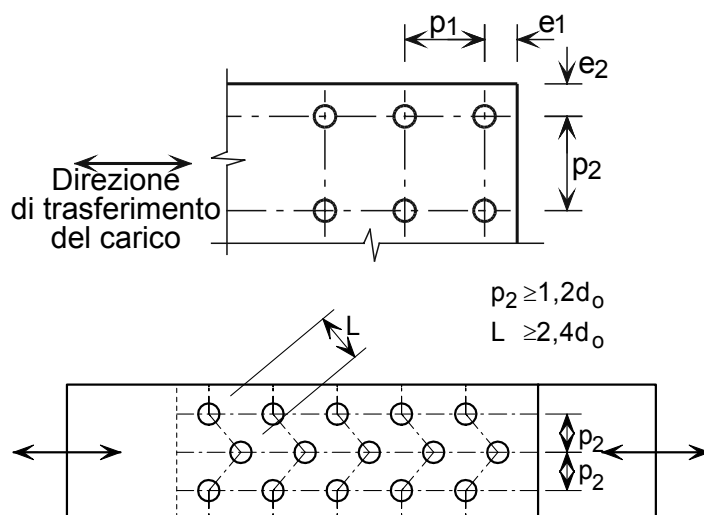
La distanza dal bordo è definita come la distanza dal centro di un foro al bordo adiacente della parte da collegare perpendicolarmente alla direzione del carico; la distanza dall'estremità è definita similmente ma nella direzione in cui la giunzione si sviluppa.

Il valore minimo della distanza dall'estremità,  $e_1$ , o quello della distanza dal bordo,  $e_2$ , (fig. 6.2) deve essere preso pari a  $1,2d_0$ , dove  $d_0$  è il diametro del foro del bullone. Da notare che può essere necessaria una distanza dall'estremità maggiore di questa per fornire una adeguata resistenza portante come di seguito precisato.

Il massimo valore della distanza dal bordo o della distanza dall'estremità deve essere limitato a  $4t + 40\text{mm}$ , dove  $t$  è lo spessore dello strato esterno più sottile.

L'interasse minimo tra i centri dei fori nella direzione del carico ( $p_1$ ) è  $2,2d_0$  (fig. 6.2). La corrispondente distanza minima ortogonale alla direzione di carico ( $p_2$ ), è  $2,4d_0$ .

La distanza massima dei bulloni in ogni direzione deve essere tale che l'instabilità locale a compressione degli elementi sovrapposti sia presa in considerazione, vedere la EN 1993-1-8.



**Figura 6.2** Simboli per la definizione della posizione dei fori

Per file di fori sfalsati, si può usare una spaziatura minima tra le file  $p_2=1,5d_0$  se la distanza minima tra due qualsiasi bulloni in una fila sfalsata è  $L \geq 2,2d_0$ .

### Resistenza portante

La resistenza disponibile di un giunto bullonato in acciaio inossidabile è, di solito, fissata da criteri di servizio, secondo i quali l'allungamento del foro ai carichi di lavoro deve essere limitato. Per evitare lo svolgimento di una verifica di servizio separata, si consiglia di stabilire un limite all'allungamento del foro sotto il carico massimo, adottando un valore ridotto di  $f_{u,red}$ .

Per limitare l'allungamento del foro al carico massimo,  $f_{u,red}$  deve essere ricavato dalla:

$$f_{u,red} = 0.5f_y + 0.6f_u \text{ but } \leq f_u \quad (6.1)$$

La resistenza portante di ogni strato connesso in un giunto deve essere determinata, sommando la resistenza,  $F_{b,Rd}$ , ricavata in ogni posizione dei bulloni. Il valore di  $F_{b,Rd}$  è dato da:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{u,red} dt}{\gamma_{M2}} \quad (6.2)$$

In cui  $\alpha_b$  è il valore più piccolo fra:

- $\alpha_d$
- $f_{ub} / f_{u,red}$
- 1,0

dove:

$d$  è il diametro del bullone

$t$  è lo spessore dello strato connesso

$f_u$  è la resistenza caratteristica a trazione dello strato connesso (di solito presa come il valore minimo specificato della resistenza a trazione, vedere tabella 3.1).

$\alpha_d = e_1 / 3d_0$  per i bulloni di estremità nella direzione di trasferimento del carico

$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$  per i bulloni interni nella direzione di trasferimento del carico

$k_1$  è il valore più piccolo tra  $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$  e 2,5 per i bulloni di bordo nella direzione ortogonale a quella di trasferimento del carico

$k_1$  è il valore più piccolo tra  $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$  e 2,5 per i bulloni interni nella direzione ortogonale a quella di trasferimento del carico

Per giunti a semplice sovrapposizione di piatti con un'unica fila perpendicolare alla direzione dello sforzo, i bulloni devono essere dotati di rondelle sotto testa e sotto il dado e la resistenza portante di ciascun bullone deve essere ulteriormente limitata a:

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 f_{u,red} d t}{\gamma_{M2}} \quad (6.3)$$

La resistenza di un gruppo di bulloni può determinarsi come somma delle resistenze portanti,  $F_{b,Rd}$ , dei singoli bulloni, purché la resistenza al taglio di progetto di ogni singolo bullone,  $F_{v,Rd}$ , sia maggiore o eguale alla resistenza portante di progetto,  $F_{b,Rd}$ . In caso contrario la resistenza di una serie di bulloni deve essere determinata, impiegando la resistenza più bassa dei singoli bulloni moltiplicata per il numero di bulloni.

### **Resistenza a trazione**

La resistenza a trazione delle parti connesse è limitata dalla minore fra:

a) la resistenza plastica di progetto della sezione trasversale lorda:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.4)$$

b) la resistenza ultima della sezione trasversale netta in corrispondenza dei fori:

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.5)$$

i cui simboli sono stati definiti al paragrafo 4.7.2.

Deve essere notato che l'equazione per la resistenza ultima della sezione netta deve essere applicata solamente quando sono presenti rondelle, sia sotto la testa della vite, che sotto il dado.

Se viene richiesto un comportamento duttile, la resistenza plastica della sezione lorda deve essere inferiore alla resistenza ultima della sezione trasversale netta. Requisiti di duttilità e di capacità di rotazione sono presenti nella EN 1993-1-8. I requisiti per la progettazione antisismica sono dati nella EN 1998.

### **Progettazione della resistenza allo strappo**

Valgono le indicazioni di EN 1993-1-8.

### **Angolari connessi lungo un lato ed altri elementi in trazione connessi asimmetricamente**

L'eccentricità dei bulloni nei giunti di estremità e gli effetti degli spazi e delle distanze dell'estremità dei bulloni devono essere tenute in considerazione nella determinazione della resistenza di progetto di elementi asimmetrici, oltre che di elementi simmetrici collegati in maniera asimmetrica, come gli angolari connessi su di un solo lato.

Gli angolari connessi con un'unica fila di bulloni lungo un lato possono essere considerati sollecitati in maniera concentrica; la resistenza ultima di progetto della sezione netta può essere determinata come segue:

$$\text{Con 1 bullone} \quad N_{u,Rd} = \frac{2,0 (e_2 - 0,5d_0) t f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.6)$$

$$\text{Con 2 bulloni} \quad N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.7)$$

$$\text{con 3 bulloni o più} \quad N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.8)$$

in cui:

$\beta_2$  e  $\beta_3$  sono i coefficienti di riduzione dipendenti dal passo  $p_1$  di tabella 6.1. Per valori intermedi di  $p_1$ , il valore di  $\beta$  può essere determinato per interpolazione lineare

$A_{net}$  è l'area netta dell'angolare. Per un angolare a lati diversi collegato lungo il suo lato più corto,  $A_{net}$  deve essere assunta uguale all'area della sezione netta di un angolare equivalente a lati uguali con lunghezza del lato pari a quella del lato più corto.



**Tabella 6.1** Coefficienti di riduzione  $\beta_2$  and  $\beta_3$ 

Tipo di connessione	Factor	Passo, $p_1$	
		$\leq 2,5d_0$	$\geq 5,0d_0$
con 2 bulloni	$\beta_2$	0,4	0,7
con 3 bulloni o più	$\beta_3$	0,5	0,7

### 6.2.4 Elementi di collegamento (viti e bulloni)

#### Aree nette

L'area del bullone da usare nel calcolo dei bulloni in trazione deve essere assunta come area soggetta a trazione, definita nella normativa appropriata del prodotto.

Per bulloni soggetti a taglio, può essere usata la maggiore area del gambo, se si garantisce che la parte filettata sia al di fuori del piano in cui agisce lo sforzo di taglio considerando anche che i bulloni possano essere inseriti da entrambi i versi. Se non si può garantire questa condizione, si deve usare l'area resistente a trazione.

#### Resistenza al taglio

La resistenza al taglio di un bullone dipende dal numero dei piani di azione del taglio e dalla loro posizione lungo il bullone stesso. Per ogni piano di applicazione del taglio, la resistenza del bullone, in assenza di sollecitazioni di trazione, può essere stabilita come segue:

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (6.9)$$

dove:

$A$  è l'area netta come precisato nel precedente paragrafo

$f_{ub}$  è la resistenza ultima del bullone

Il valore di  $\alpha$  può essere definito nel Documento Nazionale di Applicazione. I valori raccomandati sono:

- se il piano di taglio passa per la porzione non filettata del bullone,  $\alpha = 0,6$
- se il piano di taglio passa per la porzione filettata del bullone,  $\alpha = 0,5$

#### Resistenza a trazione

La resistenza a trazione di un bullone è data dalla  $F_{t,Rd}$ :

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (6.10)$$

dove:

$k_2 = 0,63$  per bulloni a testa conica, altrimenti  $k_2 = 0,9$ .

Qualora si progettino bulloni per resistere ad uno sforzo di trazione, essi devono essere proporzionati per resistere anche alla sollecitazione supplementare dovuta ad effetti di leva, qualora questo possa avvenire. Le direttive per tener conto delle forze di strappo sono date in EN 1993-1-8.

### **Trazione e taglio combinati**

Quando un bullone è contemporaneamente soggetto a sforzi di trazione, (compresa quella di strappo),  $F_{t,Ed}$ , e di taglio,  $F_{v,Ed}$ , devono essere considerati gli effetti della loro interazione; ciò si ottiene, applicando la relazione seguente:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.11)$$

dove  $F_{v,Rd}$  e  $F_{t,Rd}$  si ricavano rispettivamente dalle precedenti (6.9) e (6.10). Da notare che le forze esterne di progetto (che includono anche il carico supplementare dovuto ad azione di leva) devono anche essere minori delle resistenze di progetto.

### **Giunti lunghi e lunghezze di aderenza grandi**

Nei giunti particolarmente estesi (ossia con distanza tra primo ed ultimo bullone oltre 500 mm o maggiore 15 volte il diametro dei bulloni), o quando la lunghezza di aderenza (cioè lo spessore complessivo degli strati da unire) è superiore a 5 volte il diametro dei bulloni, la resistenza al taglio deve essere ridotta. In mancanza di dati per acciai inossidabili si consiglia di consultare la normativa per acciai al carbonio nelle stesse condizioni, contenuta nella EN 1993-1-8.

## **6.3 Viti autofilettanti**

Il progetto di connessioni con viti autofilettanti per lamiera di acciaio inossidabile può seguire le indicazioni della EN 1993-1-3, con l'eccezione che la resistenza all'espulsione della vite che dovrebbe essere determinate da opportune prove sperimentali. Per evitare la rottura della vite o della sua filettatura la capacità della vite di forare e filettare lamiera di acciaio inossidabile deve essere dimostrata da opportuni risultati sperimentali. Per la resistenza a trazione delle parti connesse si deve far riferimento al valore ridotto  $f_{u,red}$  secondo l'equazione 6.1.

## **6.4 Giunti saldati**

### **6.4.1 Generalità**

E' indispensabile che le saldature siano eseguite con procedimenti corretti, con l'uso di consumabili compatibili e da saldatori esperti e qualificati, vedi 10.4; tutto ciò, non soltanto per garantire la resistenza delle saldature e per avere un profilo definito per le saldature stesse, ma anche per conservare la resistenza a corrosione della saldatura e del materiale ad essa adiacente.

Le seguenti raccomandazioni valgono per saldature a piena o parziale penetrazione dei giunti di testa e per saldature d'angolo con procedimento di saldatura ad arco, quali:

N° di processo	Nome del processo
111:	Saldatura ad arco con elettrodi rivestiti (saldatura manuale ad arco, SMAW)
121	Saldatura ad arco sommerso con elettrodo a filo (SAW)

- 122: Saldatura ad arco sommerso con elettrodo a piattina
- 131 Saldatura ad arco con elettrodo metallico in atmosfera di gas inerte (MIG)
- 135 Saldatura ad arco con elettrodo metallico in atmosfera di gas attivo (MAG)
- 137 Saldatura ad arco con elettrodo metallico a filo con flusso incorporato
- 141 Saldatura ad atmosfera inerte con elettrodo in tungsteno (TIG)
- 15 Saldatura ad arco a plasma (PAW).

I numeri di processo sono quelli definiti nella EN ISO 4063.

Devono essere utilizzati consumabili compatibili in modo che lo snervamento della saldatura e la resistenza ultima superino quelle del materiale base. La tabella 6.2 indica i consumabili adatti per diversi tipi di acciaio inossidabile mentre la tabella 6.3 fornisce le proprietà meccaniche dei consumabili stessi.

**Tabella 6.2** *Tipi di acciaio inossidabile e relativi elettrodi*

Materiale base	Elettrodi		
	Elettrodi ricoperti EN 1600	Fili e cordoni EN 12072	Elettrodi con flusso incorporato EN 12073
1.4301	E 19 9	G 19 9 L	T 19 9 L
1.4306	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
1.4307	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
1.4318	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
1.4541	E 19 9 Nb	G 19 9 Nb	T 19 9 Nb
1.4401	E 19 12 2	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
1.4404	E 19 12 3 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
1.4571	E 19 12 3 Nb	G 19 12 3 Nb	T 19 12 3 Nb
1.4362	E 25 7 2 N L	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L
1.4462	E 25 7 2 N L	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L

**Tabella 6.3** *Proprietà meccaniche dei consumabili per acciaio inossidabile in accordo con EN 1600, EN 12072 e EN 12073*

Material di apporto	Resistenza allo snervamento N/mm <sup>2</sup>	Resistenza a trazione N/mm <sup>2</sup>
E 19 9	350	550
E/G/T 19 9 L	320	510
E/G/T 19 9 Nb	350	550
E 19 12 2	350	550
E/G/T 19 12 3 L	320	510
E/G/T 19 12 3 Nb	350	550
E 25 7 2 N L	500	700
G 25 7 2 L	500	700
T 22 9 3 N L	450	550

Particolare attenzione merita il caso in cui si utilizzi, come principio di progettazione, il valore del carico convenzionale di scostamento dalla proporzionalità dello 0,2% (cioè la progettazione secondo 3.2.4(ii)). I produttori di acciai inossidabili e di consumabili possono essere di aiuto nella scelta degli consumabili più adatti. Il metallo del cordone di saldatura deve essere almeno altrettanto nobile come il materiale base.

Saldature intermittenti ad angolo e saldature intermittenti di testa a parziale penetrazione devono essere evitate in tutti gli ambienti, salvo in quelli meno predisposti a dare problemi di corrosione. Inoltre le saldature di testa intermittenti devono essere eseguite con particolare attenzione in ambienti litoranei o fortemente inquinati, specie quando può aversi flusso indotto dalla tensione superficiale.

### 6.4.2 Saldature a cordoni d'angolo

#### *Impieghi*

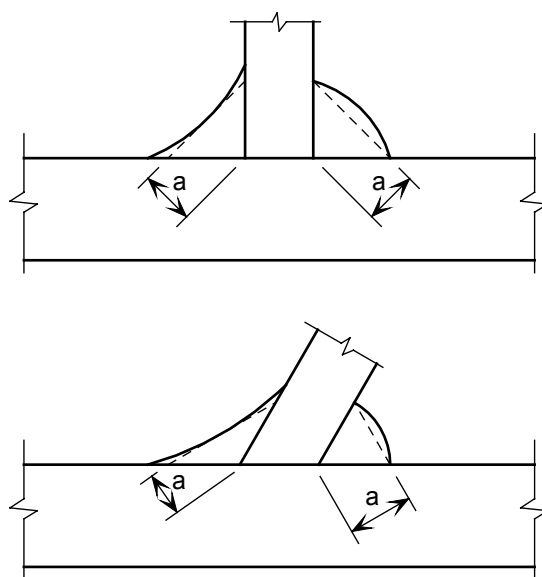
Le saldature ad angolo si eseguono per collegare elementi, quando le facce di fusione formano angoli da  $60^\circ$  a  $120^\circ$ . Per angoli inferiori a  $60^\circ$ , la saldatura ad angolo può essere eseguita ma, ai fini progettuali, devono essere considerate come saldature di testa a parziale penetrazione. Per angoli oltre  $120^\circ$ , questo tipo di saldatura non è affidabile in termini di trasmissione di forze.

Una saldatura ad angolo non deve essere eseguita in condizioni che possono originare un momento flettente rispetto all'asse longitudinale del cordone, nel caso questo dia luogo a tensioni alla radice della saldatura.

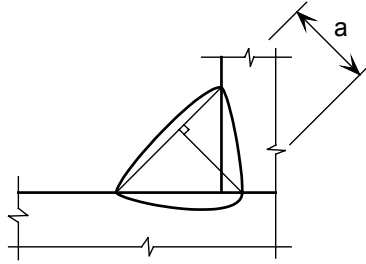
#### *Lunghezza efficace e dimensioni dello spessore di gola*

Per la lunghezza efficace di una saldatura ad angolo si può prendere la lunghezza totale del giunto. Tuttavia, saldature con lunghezza efficace inferiore a 40 mm o a sei volte lo spessore di gola non sono affidabili per quanto riguarda la trasmissione delle forze.

Per lo spessore di gola,  $a$ , di una saldatura ad angolo può essere presa l'altezza del più grande triangolo iscritto (di solito isoscele), misurata perpendicolarmente al lato più esterno del triangolo, vedi fig. 6.3. Si può inoltre beneficiare dello spessore di gola aggiuntivo in una saldatura ad angolo a penetrazione profonda, vedi fig. 6.4, soltanto se le prove dimostrano che la penetrazione richiesta può essere effettivamente raggiunta.



**Figura 6.3** Spessore di gola di una saldatura a cordoni d'angolo



**Figura 6.4** Penetrazione in profondità di una saldatura a cordoni d'angolo

### **Sollecitazione di progetto e resistenza di progetto al taglio**

La sollecitazione di progetto si ottiene come somma vettoriale di tutte le forze e dei momenti trasmessi dalla saldatura. Essa si calcola per la lunghezza efficace e per lo spessore di gola (vedi sopra). La sollecitazione di progetto non deve essere superiore resistenza di progetto al taglio.

La resistenza di progetto della saldatura ad angolo sarà sufficiente se risulteranno soddisfatte entrambe le seguenti condizioni:

$$\left[ \sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2) \right]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (6.12a)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.12b)$$

dove:

$\sigma_{\perp}$  è la tensione normale ortogonale alla sezione di gola

$\tau_{\perp}$  è la tensione di taglio (nel piano della sezione di gola) perpendicolare all'asse della saldatura

$\tau_{\parallel}$  è la tensione di taglio (nel piano della sezione di gola) parallela all'asse della saldatura

$f_u$  è resistenza a trazione caratteristica della parte più debole tra quelle giuntate

$\beta_w$  è presa pari a 1,0 per tutte le classi di resistenza nominale di acciaio inossidabile, a meno che un valore più basso risulti giustificato da prove sperimentali.

In alternativa per calcolare la resistenza di progetto di una saldatura a cordoni d'angolo può essere usato il metodo semplificato riportato in EN 1993-1-8 al paragrafo 4.5.3.3.

### **6.4.3 Giunti di testa**

#### **Saldature di testa a penetrazione completa**

La resistenza di progetto di un giunto di testa a penetrazione completa deve essere assunta uguale alla resistenza di progetto della più debole delle parti saldate, purché la saldatura soddisfi le condizioni suggerite in 6.4.1.

### **Saldature di testa a parziale penetrazione**

Le saldature di testa a parziale penetrazione possono essere eseguite per trasmettere sforzi di taglio. Non sono consigliate, quando possono essere soggette a trazione.

La resistenza di un giunto di testa a parziale penetrazione può essere determinata allo stesso modo delle saldature a cordoni d'angolo a penetrazione profonda. Lo spessore di gola di un giunto di testa a parziale penetrazione può essere assunto come la profondità di penetrazione effettivamente ottenuta durante le qualifiche delle procedure di saldatura. Se queste prove non sono state effettuate, lo spessore di gola può essere calcolato come la profondità di preparazione della saldatura, diminuita di 3 mm.

#### **6.4.4 Saldatura dell'acciaio inossidabile lavorato a freddo**

Gli stessi principi si applicano per saldare l'acciaio inossidabile lavorato a freddo così come per l'acciaio inossidabile ricotto, a condizioni che:

- il giunto saldato sia soggetto a carico assiale,
- il livello di resistenza per lavorazione a freddo non superi CP500 o C850,
- lo spessore del materiale non superi 8,0 mm,
- i consumabili siano scelti in accordo alla tabella 6.2,
- la resistenza del materiale base nelle zone termicamente alterate si basi sulla resistenza a trazione del materiale base ricotto.

Il materiale d'apporto può avere una resistenza più bassa del metallo base, in questo caso la resistenza di progetto della giunzione saldata (a cordoni d'angolo o di testa) deve essere basata sul carico di rottura del materiale di apporto (con  $\beta_w$  pari a 1,0).

# 7 PROGETTO DI STRUTTURE RESISTENTI AL FUOCO

## 7.1 Generalità

Questo capitolo si occupa di strutture in acciaio inossidabile, che, per ragioni di rispetto della sicurezza all'incendio, devono rispettare predeterminate condizioni per evitare il prematuro collasso in caso di esposizione alle fiamme. Le raccomandazioni riguardano esclusivamente metodi passivi di protezione dall'incendio e valgono per i tipi di acciai inossidabili e per le strutture progettate secondo le regole dei capitoli da 1 a 6 di questo Manuale.

In genere, gli acciai inossidabili austenitici, quando sono esposti a temperature elevate, subiscono una minore riduzione dei livelli di resistenza (quando la temperatura supera i 550°C circa) e rigidità (per tutte le alte temperature) rispetto agli acciai al carbonio.

La EN 1991-1-2 precisa le azioni termiche e meccaniche su strutture esposte al fuoco. Il fuoco è indicato negli Eurocodici come un carico accidentale di progetto. La EN 1990 indica le combinazioni delle azioni accidentali di progetto e consiglia di assumere uguali a 1,0 i coefficienti parziali moltiplicatori delle azioni sopra citate. La EN 1993-1-2 raccomanda che il coefficiente parziale di sicurezza del materiale,  $\gamma_{M,fi}$ , sia posto uguale a 1,0 in caso di incendio.

I requisiti prestazionali di una struttura in acciaio inossidabile, soggetta a carico accidentale d'incendio, non sono diversi da quelli previsti per strutture di acciaio al carbonio, e precisamente:

- Se il tipo di struttura richiede una certa resistenza in caso di incendio, la struttura deve essere progettata e costruita in modo da conservare la sua capacità portante durante l'esposizione alle fiamme;
- Qualora il buon funzionamento delle protezioni antincendio o degli elementi taglia-fuoco sia dipendente dalle deformazioni della struttura portante, devono essere applicati criteri per il calcolo delle deformazioni causate dall'incendio. Tuttavia, non è necessario considerare la deformazione della struttura portante, se la resistenza al fuoco degli elementi taglia-fuoco si basa sulla curva standard d'incendio.

## 7.2 Proprietà meccaniche ad elevata temperatura

La tabella 7.1 precisa i valori dei coefficienti di conservazione di resistenza e rigidità (rispetto ai valori appropriati a 20°C) e del parametro  $g_{2,\theta}$  per 4 tipi di acciaio inossidabile ad alta temperatura. Questi coefficienti sono necessari per stabilire la relazione sforzo/deformazione ad elevate temperature e sono definiti come segue:

$k_{0,2proof,\theta}$  Carico unitario di scostamento dalla proporzionalità dello 0,2% alla temperatura  $\theta$ , rispetto al valore di progetto a 20°C, ossia  $f_{0,2\ proof, \theta} / f_y$

$g_{2,\theta}$  Parametro usato per il calcolo di  $f_{2,\theta}$

$f_{2,\theta}$  resistenza al 2% di deformazione totale alla temperatura  $\theta$ , si ricava mediante la seguente espressione:

$$f_{2,\theta} = f_{0,2proof,\theta} + g_{2,\theta}(f_{u,\theta} - f_{0,2proof,\theta}) \quad (7.1)$$

$k_{u,\theta}$  resistenza a trazione alla temperatura  $\theta$ , rispetto alla resistenza a trazione a 20°C, ossia  $f_{u,\theta}/f_u$

$k_{E,\theta}$  pendenza del tratto lineare elastico alla temperatura  $\theta$ , rispetto alla pendenza a 20°C, ossia  $E_\theta/E$

in cui :

$E$  modulo di Young a 20°C (= 200 000 N/mm<sup>2</sup>)

$f_y$  resistenza caratteristica allo snervamento a 20°C definita in 3.2.4

$f_u$  resistenza a trazione a 20°C, definita in 3.2.4.

Nel determinare la resistenza strutturale al fuoco di membrature in acciaio inossidabile, devono essere utilizzati i seguenti parametri come resistenza caratteristica del materiale:

Pilastri  $f_{0,2proof,\theta}$  (sezioni trasversali di tutte le Classi)

Travi vincolate  $f_{2,\theta}$  (sezioni trasversali di Classe 1, 2 o 3)

$f_{0,2proof,\theta}$  (sezioni trasversali di Classe 4)

Travi non vincolate  $f_{0,2proof,\theta}$  (sezioni trasversali di tutte le Classi)

Membrature a trazione  $f_{2,\theta}$  (sezioni trasversali di tutte le Classi)

Nel determinare la resistenza al fuoco di, anziché la resistenza caratteristica a snervamento a temperatura ambiente,  $f_y$ , si adotta la resistenza caratteristica della deformazione totale al 2%,  $f_{2,\theta}$ .

Tuttavia per travi vincolate ed elementi tesi delle Classi 1, 2 e 3, in casi nei quali si devono considerare criteri di deformazione, si consiglia di usare la resistenza ad una deformazione totale di 1,0%,  $f_{1,\theta}$ , anziché  $f_{2,\theta}$ . Il valore di  $f_{1,\theta}$  deve calcolarsi con la relazione seguente:

$$f_{1,\theta} = f_{0,2proof,\theta} + 0,5g_{2,\theta}(f_{u,\theta} - f_{0,2proof,\theta}) \quad (7.2)$$

I valori di  $f_{0,2proof,\theta}$  sono ottenibili dalla tensione unitaria di scostamento dalla proporzionalità dello 0,2% a 20°C, mediante il coefficiente di correzione  $k_{0,2proof,\theta}$  in tabella 7.1



**Tabella 7.1** *Coefficienti di conservazione della resistenza e della rigidità e parametro  $g_{2,\theta}$  ad alte temperature*

Temperatura $\theta$ (°C)	Fattore di conservazione $k_{0,2proof,2}$	Parametro $g_{2,\theta}$	Fattore di conservazione $k_{u,\theta}$	Fattore di conservazione $k_{E,\theta}$
<b>Tipo 1.4301</b>				
20	1,00	0,26	1,00	1,00
100	0,82	0,24	0,87	0,96
200	0,68	0,19	0,77	0,92
300	0,64	0,19	0,73	0,88
400	0,60	0,19	0,72	0,84
500	0,54	0,19	0,67	0,80
600	0,49	0,22	0,58	0,76
700	0,40	0,26	0,43	0,71
800	0,27	0,35	0,27	0,63
900	0,14	0,38	0,15	0,45
1000	0,06	0,40	0,07	0,20
1100	0,03	0,40	0,03	0,10
1200	0,00	0,40	0,00	0,00
<b>Tipo 1.4401</b>				
20	1,00	0,24	1,00	1,00
100	0,88	0,24	0,93	0,96
200	0,76	0,24	0,87	0,92
300	0,71	0,24	0,84	0,88
400	0,66	0,21	0,83	0,84
500	0,63	0,20	0,79	0,80
600	0,61	0,19	0,72	0,76
700	0,51	0,24	0,55	0,71
800	0,40	0,35	0,34	0,63
900	0,19	0,38	0,18	0,45
1000	0,10	0,40	0,09	0,20
1100	0,05	0,40	0,04	0,10
1200	0,00	0,40	0,00	0,00
<b>Tipo 1.4571</b>				
20	1,00	0,25	1,00	1,00
100	0,89	0,25	0,88	0,96
200	0,83	0,25	0,81	0,92
300	0,77	0,24	0,80	0,88
400	0,72	0,22	0,80	0,84
500	0,69	0,21	0,77	0,80
600	0,66	0,21	0,71	0,76
700	0,59	0,25	0,57	0,71
800	0,50	0,35	0,38	0,63
900	0,28	0,38	0,22	0,45
1000	0,15	0,40	0,11	0,20
1100	0,075	0,40	0,055	0,10
1200	0,00	0,40	0,00	0,00
<b>Tipo 1.4462</b>				
20	1,00	0,35	1,00	1,00
100	0,91	0,35	0,93	0,96
200	0,80	0,32	0,85	0,92
300	0,75	0,30	0,83	0,88
400	0,72	0,28	0,82	0,84
500	0,65	0,30	0,71	0,80
600	0,56	0,33	0,57	0,76
700	0,37	0,40	0,38	0,71
800	0,26	0,41	0,29	0,63
900	0,10	0,45	0,12	0,45
1000	0,03	0,47	0,04	0,20
1100	0,015	0,47	0,02	0,10
1200	0,00	0,47	0,00	0,00

**Tabella 7.1** (continua) Coefficienti di conservazione della resistenza e della rigidità e parametro  $g_{2,\theta}$  ad alte temperature

Temperatura $\theta$ (°C)	Fattore di conservazione $k_{0,2proof,2}$	Parametro $g_{2,\theta}$	Fattore di conservazione $k_{u,\theta}$	Fattore di conservazione $k_{E,\theta}$
<b>Tipo 1.4318</b>				
20	1.00	0.25	1.00	1.00
100	0.78	0.25	0.74	0.96
200	0.65	0.25	0.73	0.92
300	0.57	0.25	0.64	0.88
400	0.51	0.25	0.60	0.84
500	0.48	0.25	0.55	0.80
600	0.46	0.27	0.52	0.76
700	0.40	0.27	0.40	0.71
800	0.27	0.26	0.26	0.63
<b>Tipo 1.4318 C850</b>				
20	1.00	0.21	1.00	1.00
100	0.86	0.24	0.71	0.91
200	0.77	0.25	0.61	0.88
300	0.69	0.24	0.60	0.84
400	0.68	0.24	0.57	0.80
500	0.65	0.25	0.53	0.76
600	0.54	0.25	0.45	0.72
700	0.40	0.26	0.34	0.67
800	0.23	0.25	0.24	0.52
900	0.11	0.25	0.10	0.35
<b>Tipo 1.4571 C850</b>				
20	1.00	0.36	1.00	1.00
100	0.96	0.36	0.94	0.96
200	0.95	0.36	0.88	0.92
300	0.92	0.36	0.84	0.88
400	0.89	0.36	0.82	0.84
500	0.83	0.36	0.79	0.80
600	0.81	0.36	0.72	0.76
700	0.60	0.37	0.53	0.71
800	0.35	0.39	0.38	0.63
900	0.10	0.40	0.20	0.45

## 7.3 Proprietà termiche ad elevata temperatura

### 7.3.1 Dilatazione termica

La dilatazione termica lineare di acciai inossidabili austenitici,  $\Delta l/l$ , può calcolarsi con la :

$$\Delta l/l = (16 + 4,79 \times 10^{-3} \theta_a - 1,243 \times 10^{-6} \theta_a^2) \times (\theta_a - 20) 10^{-6} \quad (7.3)$$

dove:

$l$  è la lunghezza a 20°C;

$\Delta l$  è l'allungamento dovuto alla temperatura;

$\theta_a$  è la temperatura [°C] dell'acciaio

### 7.3.2 Calore specifico

Il calore specifico  $c_a$  di un acciaio inossidabile può ricavarsi dalla:

$$c_a = 450 + 0,280 \times \theta_a - 2,91 \times 10^{-4} \theta_a^2 + 1,34 \times 10^{-7} \theta_a^3 \text{ J/kgK} \quad (7.4)$$

dove:

$\theta_a$  è definito in 7.3.1

### 7.3.3 Conducibilità termica

La conducibilità termica di un acciaio inossidabile  $\lambda_a$  può determinarsi dalla:

$$\lambda_a = 14,6 + 1,27 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK} \quad (7.5)$$

dove:

$\theta_a$  è definito in 7.3.1

## 7.4 Determinazione della resistenza al fuoco delle strutture

La resistenza al fuoco di una struttura può essere determinata con uno dei tre metodi seguenti:

- metodo semplice di calcolo applicato a tutti i singoli elementi;
- metodi approfonditi di calcolo;
- mediante prove dirette.

Il metodo semplice di calcolo si fonda su presupposti cautelativi. I metodi approfonditi di calcolo in fase di progetto tengono conto in modo realistico di principi d'ingegneria applicati a specifici casi. Quando non sia possibile applicare il metodo di calcolo semplice, occorre avvalersi di uno degli altri due metodi.

***I metodi approfonditi di calcolo sono oggetto del Commento alle Raccomandazioni di questo manuale (cfr. Premessa).***

### 7.4.1 Classificazione delle sezioni trasversali

Nel progettare strutture resistenti al fuoco, si deve adottare il metodo di classificazione di sezioni trasversali del Cap. 4, usando le proprietà di progetto a temperatura ambiente.

### 7.4.2 Membrane soggette a trazione

La resistenza di progetto  $N_{fi,0,Rd}$  di un elemento soggetto a trazione alla temperatura uniforme  $\theta_a$  deve essere determinata con:

$$N_{fi,0,Rd} = k_{2,\theta} N_{Rd} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] \quad (7.6)$$

dove:

$k_{2,\theta} = f_{2,\theta} / f_y$ , è il coefficiente di conservazione della resistenza al 2% della deformazione totale alla temperatura  $\theta_a$  ;

$N_{Rd}$  è la resistenza di progetto della sezione trasversale  $N_{pl,Rd}$  a temperatura ambiente, secondo il Paragrafo 4.7.2.

$\gamma_{M,0}$  e  $\gamma_{M,fi}$  sono fattori parziali di sicurezza, vedi tabella 2.1.

In caso di disuniformità nella temperatura degli elementi, la resistenza di progetto è data da:

$$N_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i k_{2,\theta,i} f_y / \gamma_{M,fi} \quad (7.7)$$

dove:

$A_i$  è l'area della sezione trasversale dell'elemento a temperatura uniforme

$\theta_i$  è la temperatura dell'elemento con area  $A_i$

$k_{2,\theta,i}$  è il coefficiente di conservazione della resistenza al 2% di deformazione alla temperatura  $\theta_i$  (cfr. 7.2)

In alternativa, la resistenza di progetto  $N_{fi,t,Rd}$  al tempo  $t$  di una membratura soggetta a trazione con distribuzione non uniforme della temperatura, può assumersi prudenzialmente uguale alla resistenza di progetto  $N_{fi,\theta,Rd}$  della stessa membratura soggetta a trazione ma a temperatura uniforme,  $\theta_a$ , pari alla massima temperatura  $\theta_{a,max}$  raggiunta al tempo  $t$ .

### 7.4.3 Membrature soggette a compressione

Le seguenti raccomandazioni si applicano a pilastri con sezioni trasversali delle Classi 1, 2, 3 o 4 che sono:

- formate a freddo, aperte (non saldate), es. a C o angolari;
- formate a freddo, cave (saldate o non), es. profilati tonde o rettangolari cavi.

La resistenza di progetto all'instabilità,  $N_{b,fi,t,Rd}$ , al tempo  $t$  di una membratura compressa a temperatura uniforme,  $\theta_a$ , è data dalle

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A K_{0,2,proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{per le sezioni di Classe 1, 2 o 3} \quad (7.8)$$

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A_{eff} K_{0,2,proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{per le sezioni di Classe 4} \quad (7.9)$$

dove:

$K_{0,2,proof,\theta}$  è il coefficiente di conservazione della resistenza allo 0,2% di scostamento dalla proporzionalità, alla temperatura  $\theta_a$  (cfr. 7.2)

$\chi_{fi}$  è il coefficiente di riduzione per instabilità flessionale in presenza di incendio, data da:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \quad \text{ma comunque} \quad \chi_{fi} \leq 1 \quad (7.10)$$

dove:

$$\varphi_\theta = 0,5 \left[ 1 + \alpha (\bar{\lambda}_\theta - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_\theta^2 \right] \quad (7.11)$$

in cui  $\alpha$  e  $\bar{\lambda}_0$  sono i coefficienti di instabilità a temperatura ambiente dati nella tabella 5.1.

La snellezza adimensionale modificata  $\bar{\lambda}_\theta$  alla temperatura  $\theta$  è data da

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[ \frac{k_{0,2,proof,\theta}}{k_{E,\theta}} \right] \quad \text{per le sezioni trasversali di tutte le Classi} \quad (7.12)$$

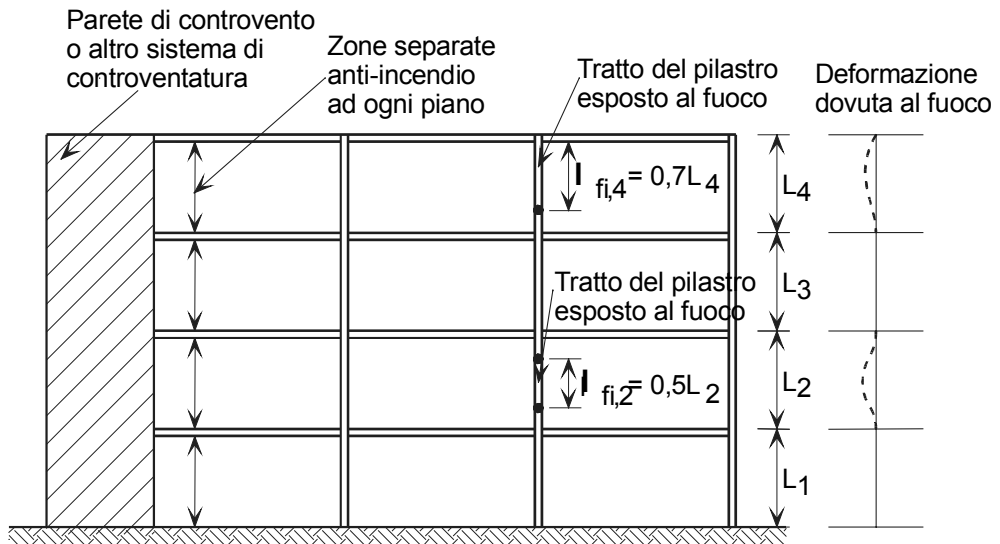
dove:

$k_{E,\theta}$  è il coefficiente di conservazione della pendenza del tratto lineare elastico alla temperatura  $\theta$  (cfr. 7.2)

Se la temperatura di un elemento non è uniforme, la resistenza a compressione può valutarsi prudenzialmente, supponendo una temperatura uniforme uguale alla temperatura massima dell'elemento.

In caso di progettazione al fuoco, la lunghezza d'inflessione  $l_{fi}$  di un pilastro deve essere determinata come nel caso di progettazione a temperatura ambiente. Tuttavia, per un telaio controventato, la lunghezza d'inflessione  $l_{fi}$  può ricavarsi considerando il pilastro incastrato in corrispondenza delle giunzioni colonna-colonna dei compartimenti inferiore e superiore. Questo vale unicamente se gli elementi strutturali che separano i compartimenti hanno una resistenza al fuoco non inferiore a quella del pilastro.

Nel caso di un telaio controventato, in cui ogni piano è dotato di compartimenti antincendio con sufficiente resistenza al fuoco, la lunghezza d'inflessione di un pilastro ad un piano intermedio è data da:  $l_{fi} = 0,5L$  e, al piano più alto, è data da:  $l_{fi} = 0,7L$ , dove  $L$  è l'altezza del piano corrispondente (vedi fig.7.1).



**Figura 7.1** Lunghezze d'inflessione dei pilastri in strutture controventate

#### 7.4.4 Travi vincolate lateralmente

Il momento resistente di progetto  $M_{fi,\theta,Rd}$  di una sezione trasversale a temperatura uniforme  $\theta_a$  deve essere determinato mediante le:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{2,\theta} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] M_{Rd} \quad \text{per sezioni di Classe 1, 2 o 3} \quad (7.13)$$

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{0,2,proof,\theta} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] M_{Rd} \quad \text{per sezioni di Classe 4} \quad (7.14)$$

dove:

$M_{Rd}$  è il momento resistente plastico della sezione trasversale lorda  $M_{pl,Rd}$  (di Classe 1 o 2), il momento resistente elastico della sezione trasversale lorda  $M_{el,Rd}$  (Classe 3) o il momento resistente elastico della sezione trasversale efficace  $M_{eff,Rd}$  (Classe 4) calcolati a temperatura ambiente.

$k_{2,\theta}$  e  $k_{0,2proof,\theta}$  sono definiti in 7.4.3

Se occorre considerare gli effetti del taglio, si deve adottare il momento resistente ridotto di progetto a temperatura normale secondo 4.7.6.

Il momento resistente di progetto,  $M_{fi,t,Rd}$ , al tempo  $t$ , di una sezione trasversale di una membratura, con distribuzione non uniforme di temperatura, può essere determinata cautelativamente mediante la:

$$M_{fi,t,Rd} = M_{fi,\theta,Rd} / \kappa_1 \kappa_2 \quad (7.16)$$

in cui:

$M_{fi,\theta,Rd}$  è il momento resistente di progetto della sezione trasversale (o della sezione trasversale efficace per Classe 4) alla temperatura uniforme  $\theta_a$  eguale alla temperatura massima della sezione in questione

$\kappa_1$  è un coefficiente di adattamento per temperatura disuniforme nella sezione trasversale, vedi tabella 7.2

$\kappa_2$  è un coefficiente di adattamento per temperatura disuniforme lungo la trave, vedi tabella 7.2.

**Tabella 7.2** Coefficienti di adattamento

Condizioni di esposizione	$\kappa_1$
Trave esposta all'incendio su tutti e 4 i lati	1,0
Trave senza protezione antincendio esposta su 3 lati e con una soletta di calcestruzzo sul quarto lato	0,70
Trave con protezione antincendio esposta su 3 lati e con una soletta di calcestruzzo sul quarto lato	0,85
	$\kappa_2$
Agli appoggi di una trave staticamente indeterminata	0,85
In tutti gli altri casi	1,0

Il taglio resistente di progetto  $V_{fi,t,Rd}$  al tempo  $t$  di una sezione trasversale, con distribuzione non uniforme della temperatura deve determinarsi mediante le:

$$V_{fi,t,Rd} = k_{2,\theta,web} V_{Rd} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] \quad \text{per sezioni trasversali di Classe 1, 2 o 3} \quad (7.16)$$

$$V_{fi,t,Rd} = k_{0,2proof,\theta,web} V_{Rd} [\gamma_{M,0} / \gamma_{M,fi}] \quad \text{per sezioni trasversali di Classe 4} \quad (7.17)$$

dove:

$V_{Rd}$  è il taglio resistente di progetto di una sezione trasversale lorda a temperatura ambiente, secondo 4.7.5.

$\theta_{web}$  è la temperatura dell'anima della sezione.

#### 7.4.5 Travi non vincolate lateralmente

Il momento resistente di progetto all'instabilità  $M_{b,fi,t,Rd}$  al tempo  $t$  di una trave non vincolata lateralmente deve determinarsi mediante le:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{p1,y} k_{0,2proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{per sezioni di Classe 1 e 2} \quad (7.18)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{el,y} k_{0,2proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{per sezioni di Classe 3} \quad (7.19)$$

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{eff,y} k_{0,2proof,\theta} f_y / \gamma_{M,fi} \quad \text{per sezioni di Classe 4} \quad (7.20)$$

dove:

$\chi_{LT,fi}$  è il coefficiente di riduzione per instabilità flessio-torsionale in presenza di incendio, dato da:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\varphi_{LT,\theta} + \sqrt{\varphi_{LT,\theta}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2}} \quad (7.21)$$

e

$$\varphi_{LT,\theta} = 0,5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT,\theta} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT,\theta}^2 \right] \quad (7.22)$$

in cui  $\alpha_{LT}$  è il fattore di imperfezione a temperatura ambiente dato nel paragrafo 5.4.2.

$k_{0,2proof,\theta}$  è il coefficiente di conservazione definito nel paragrafo 7.2 alla temperatura massima  $\theta$  raggiunta in qualsiasi punto della sezione.

La snellezza adimensionale  $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$  alla temperatura  $\theta$  è data da:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \left[ \frac{k_{0,2proof,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad \text{per sezioni trasversali di tutte le Classi} \quad (7.23)$$

dove:

$k_{E,\theta}$  è il coefficiente di conservazione definito nel paragrafo 7.2 alla temperatura  $\theta$ .

#### 7.4.6 Elementi soggetti a compressione assiale e flessione

Gli effetti combinati dei carichi di compressione e dei momenti flettenti deve essere verificato secondo le seguenti espressioni onde evitare l'instabilità secondo gli assi maggiore e minore e le instabilità laterali-torsionali:

a) Per sezioni trasversali di Classe 1, 2 o 3

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed}}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (7.24)$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min1,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed}}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (7.25)$$

dove:

$N_{fi,Ed}$ ,  $M_{y,fi,Ed}$  e  $M_{z,fi,Ed}$  sono il carico assiale ed i momenti flettenti in presenza d'incendio

$M_{y,fi,\theta,Rd}$  e  $M_{z,fi,\theta,Rd}$  sono definiti in 7.4.4

$k_{2,\theta}$  è il coefficiente di conservazione alla temperatura  $\theta$ , definito in 7.2

$\chi_{\min,fi}$  è il più piccolo coefficiente di riduzione per instabilità flessionale (rispetto ad entrambi gli assi), torsionale e flessio-torsionale alla temperatura  $\theta$ , definito in 7.4.3

$\chi_{\min1,fi}$  è il più piccolo coefficiente di riduzione per instabilità flessionale rispetto all'asse  $z$ , torsionale e flessio-torsionale alla temperatura  $\theta$ , definito in 7.4.3

$\chi_{LT,fi}$  è il coefficiente di riduzione per l'instabilità laterale-torsionale alla temperatura  $\theta$ , definite in 7.4.5

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 1 \quad (7.26)$$

$$\mu_{LT} = 0,15 \bar{\lambda}_{z,\theta} \beta_{M,LT} - 0,15 \leq 0,9 \quad (7.27)$$

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (7.28)$$

$$\mu_y = (1,2 \beta_{M,y} - 3) \bar{\lambda}_{y,\theta} + 0,44 \beta_{M,y} - 0,29 \leq 0,8 \quad (7.29)$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} A k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} \leq 3 \quad (7.30)$$

$$\mu_z = (2 \beta_{M,z} - 5) \bar{\lambda}_{z,\theta} + 0,44 \beta_{M,z} - 0,29 \leq 0,8 \quad \text{e} \quad \bar{\lambda}_{z,\theta} \leq 1,1 \quad (7.31)$$

$\beta_M$  è il fattore di momento uniforme equivalente (vedi tabella 7.3).

b) Per sezioni trasversali di Classe 4:

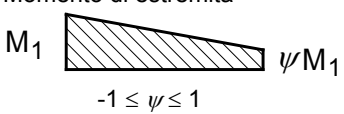
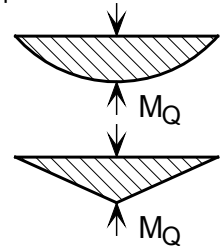
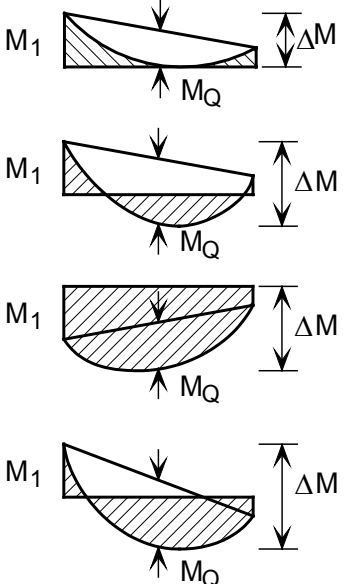
$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{\min,fi} A_{eff} k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_y M_{y,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_y}{M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Ed} + N_{fi,Ed} e_z}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (7.32)$$

$$\frac{N_{fi,Sd}}{\chi_{\min1,fi} A_{eff} k_{0,2proof,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}}} + \frac{k_{LT} M_{y,fi,Sd} + N_{fi,Sd} e_y}{\chi_{LT,fi} M_{y,fi,\theta,Rd}} + \frac{k_z M_{z,fi,Sd} + N_{fi,Sd} e_z}{M_{z,fi,\theta,Rd}} \leq 1 \quad (7.33)$$

in cui i simboli sono stati definiti al punto (a) precedente, salvo che nel calcolo di  $k_y$ ,  $k_z$  e  $k_{LT}$  per i quali l'area lorda  $A$  deve essere sostituita con l'area efficace  $A_{eff}$  e  $k_{2,\theta}$  con  $k_{0,2proof,\theta}$  (definito in 7.2).



**Tabella 7.3** Fattori del momento equivalente uniforme  $\beta_M$

Diagramma del momento	Fattore $\beta_M$
<p>Momento di estremità</p>  <p><math>M_1</math> <math>\psi M_1</math> <math>-1 \leq \psi \leq 1</math></p>	$\beta_{M,\psi} = 1,8 - 0,7\psi$
<p>Momento dovuto a carichi laterali nel piano</p>  <p><math>M_Q</math> <math>M_Q</math></p>	$\beta_{M,Q} = 1,3$  $\beta_{M,Q} = 1,4$
<p>Momento dovuto alla sovrapposizione di carichi laterali nel piano momento alle estremità</p>  <p><math>M_1</math> <math>M_Q</math> <math>\Delta M</math>  <math>M_1</math> <math>M_Q</math> <math>\Delta M</math>  <math>M_1</math> <math>M_Q</math> <math>\Delta M</math>  <math>M_1</math> <math>M_Q</math> <math>\Delta M</math></p>	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ <p><math>M_Q =  \max M </math> dovuto al solo carico laterale</p> <p>diagramma del momento senza cambio di segno:  <math>\Delta M =  \max M </math></p> <p>diagramma del momento con cambio di segno:  <math>\Delta M =  \max M  +  \min M </math></p>

### 7.4.7 Calcolo dell'aumento della temperatura negli acciai inossidabili

Il metodo per calcolare l'aumento di temperatura negli acciai al carbonio può applicarsi agli acciai inossidabili.

L'aumento della temperatura in un profilato nudo di acciaio inossidabile uniformemente riscaldato nell'intervallo di tempo  $t$  si ricava dalla:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (7.34)$$

dove:

$c_a$  è il calore specifico (in J/kgK) dell'acciaio inossidabile come fornito da 7.3.2

$\rho_a$  è la densità (in kg/m<sup>3</sup>) dell'acciaio inossidabile, indicata in Tabella 3.5 (di solito considerata indipendente dalla temperatura)

$A_m/V$  è il fattore di sezione per membrature non protette in acciaio

$A_m$  è l'area dell'elemento per lunghezza unitaria

$V$  è il volume dell'elemento per lunghezza unitaria

$$\begin{aligned} \dot{h}_{\text{net,d}} & \text{ è il valore di progetto del flusso netto di calore per area unitaria} \\ & = h_{\text{net,c}} + h_{\text{net,r}} \end{aligned} \quad (7.35)$$

dove:

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c (\theta_g - \theta_a) \quad (7.36)$$

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \phi \varepsilon_{\text{res}} 5,67 \times 10^{-8} [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \quad (7.37)$$

$\alpha_c$  è il coefficiente di scambio termico per convezione (di solito assunto come 25W/m<sup>2</sup>K)

$\theta_g$  è la temperatura dei gas d'incendio nell'ambiente di esposizione dell'elemento (in °C) data dalla curva temperatura nominale-tempo

$\theta_a$  è la temperatura (in °C) della sezione di acciaio, che si ritiene uniforme al tempo  $t$

$\phi$  è il fattore di configurazione

$\varepsilon_{\text{res}}$  è l'emissività risultante

Il parametro  $\varepsilon_{\text{res}}$  rappresenta la radiazione trasmessa dalle fiamme alla superficie in acciaio inossidabile e la sua grandezza dipende dal grado di esposizione diretta dell'elemento alle fiamme. Un valore minore di  $\varepsilon_{\text{res}}$  si avrà per elementi parzialmente schermati contro gli effetti dell'irradiazione da parte del fuoco; cautelativamente il parametro  $\varepsilon_{\text{res}}$  deve essere assunto pari a 0,2.

La precedente espressione di incremento della temperatura (7.34) può essere utilizzata per determinare le temperature dell'acciaio per integrazione incrementale, se è nota la variazione della temperatura d'incendio nel tempo. La curva temperatura nominale - tempo per un incendio di materiale cellulosico è data nella EN 1991-1-2 come:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (7.38)$$

dove

$t$  è il tempo trascorso (minuti).

## 8 FATICA

Nelle strutture, in tutto o in parte sottoposte a significative sollecitazioni variabili, particolare attenzione deve dedicarsi al fenomeno della fatica. In genere ciò non è necessario per strutture di edifici, salvo che per gli elementi di sostegno di ascensori e montacarichi, macchinari vibranti, carichi mobili e per gli elementi soggetti ad oscillazioni per effetto del vento.

Analogamente alle strutture in acciaio al carbonio, la presenza concomitante di sollecitazioni severe e giunti saldati con inevitabile presenza di difetti (porosità, piccoli intagli) comporta in questi punti una probabilità di rottura per fatica maggiore rispetto alle altre parti della struttura. Per gli acciai inossidabili valgono le stesse direttive seguite per gli acciai al carbonio nella valutazione della resistenza a fatica, vedi EN 1993-1-9.

Per ridurre la vulnerabilità di una struttura nei confronti della fatica, molto può essere ottenuto adottando corrette pratiche di progettazione, che implicano una giudiziosa selezione della configurazione strutturale ed una accurata scelta dei dettagli costruttivi resistenti a fatica. Già nelle prime fasi della progettazione bisogna tener conto degli effetti della fatica. Se gli effetti della fatica vengono analizzati solo in seguito alla valutazione degli altri aspetti della progettazione, si possono ottenere realizzazioni non adeguate o eccessivamente costose. È importante considerare, allo stesso tempo, le esigenze dei fornitori e dei costruttori. A tal proposito si raccomanda di prevedere tempestive consultazioni tecniche con i fornitori ed i costruttori per evidenziare le zone più sensibili della struttura verso le rotture a fatica, per concordare precauzioni particolari ed essere al corrente di eventuali problemi di fabbricazione e di montaggio. In particolare, occorre tenere conto, nella valutazione della resistenza a fatica, della presenza di fori o di attacchi per il sollevamento per agevolare il montaggio della struttura.

Eventuali problemi di fatica possono essere eliminati con opportuni accorgimenti nei dettagli costruttivi ed evitando:

- bruschi cambiamenti delle sezioni trasversali e, in generale, zone di concentrazione delle sollecitazioni;
- disallineamenti ed eccentricità;
- piccole discontinuità dei materiali, come scalfitture e marcature da rettifica;
- saldature non strettamente necessarie di elementi secondari, ad es. per la movimentazione delle strutture;
- saldature a penetrazione parziale, a cordoni d'angolo, intermittenti, e con barrette di sostegno;
- schizzi delle saldature ad arco.

Nonostante le tecniche di saldatura perfezionate, come quella con controllo del cordone, la molatura del piede del cordone, e la martellatura, possano migliorare la resistenza alla fatica dei giunti, i dati disponibili sono insufficienti per quantificare gli eventuali vantaggi per gli acciai inossidabili. Occorre inoltre tener presente che per le tecniche sopra citate, è necessario operare, per ottenere i massimi benefici, con personale tecnico specializzato ed esperto.

## 9 PROVE

### 9.1 Generalità

Le prove su elementi fabbricati e membrature in acciaio inossidabile possono essere richieste per numerose ragioni:

- se il progetto deve essere basato sui dati effettivi del materiale (cfr. 3.2.4);
- se si vuole tener conto del miglioramento della resistenza agli angoli di elementi formati a freddo (cfr. 3.2.2 e 4.7.1);
- se le dimensioni di un elemento vanno oltre i limiti ammessi (come quelli forniti in 4.2);
- se alcune strutture o loro componenti devono basarsi sui risultati delle prove di un prototipo;
- se è richiesta la conferma del rispetto nella produzione di caratteristiche precedentemente concordate.

Per gli acciai inossidabili valgono le stesse precauzioni e gli stessi requisiti delle procedure di prova e di valutazione dei risultati che si applicano per gli acciai al carbonio. Si raccomanda a tale proposito di consultare l'Allegato D della EN 1990. Esistono, comunque, determinati aspetti sul comportamento degli acciai inossidabili che richiedono una progettazione più accurata delle prove rispetto a quella effettuata per gli acciai al carbonio. Viene fornita qui di seguito una breve rassegna orientativa.

### 9.2 Determinazione della curva sforzo/deformazione

La Norma Europea da applicare per le prove sui materiali è la EN 10002-1 *Materiali metallici - Prove di trazione - Metodo di prova (a temperatura ambiente)*. Questa norma non fornisce dettagli sulle modalità di realizzazione ed afferraggio dei provini, nonostante i diagrammi suggeriscano che le estremità debbano essere serrate. Si raccomanda, comunque, che il carico sia applicato tramite perni passanti attraverso le estremità di un campione e di area sufficiente per resistere allo sforzo di taglio durante la prova. Questo per garantire che il carico sul provino sia applicato assialmente, permettendo così di ricavare l'effettivo andamento della curva sforzo/deformazione senza alcun effetto secondario dovuto ad un prematuro snervamento per l'eccentricità del carico. L'assialità del carico può essere verificata da prove in campo elastico con un estensimetro disposto a varie orientazioni rispetto al campione.

Occorre tener conto degli effetti della velocità di deformazione, cfr. 3.2.2.

### 9.3 Prove sulle membrature

Si raccomanda che le prove sulle membrature siano in piena scala, o quanto più prossime ad essa, in relazione alla disponibilità di apparecchiature, e che i campioni siano ricavati con gli stessi processi di fabbricazione degli elementi che costituiranno la struttura definitiva. Se i componenti sono saldati, il campione prototipo deve essere stato saldato con la stessa tecnica.

Poiché l'acciaio inossidabile può presentare anisotropia si raccomanda che i provini siano ottenuti da lamiere e nastri orientati nello stesso verso (ossia, trasversalmente o parallelamente alla direzione di laminazione) dei materiali che

verranno utilizzati per la struttura definitiva. Se l'orientamento finale non è noto o non può essere garantito, può essere necessario eseguire prove sia in direzione parallela, sia trasversale ed adottare per i calcoli i valori meno favorevoli ottenuti.

Gli acciai inossidabili presentano duttilità ed incrudimento superiori a quelli degli acciai al carbonio e perciò potrebbe essere necessario che le attrezzature di prova siano di prestazioni superiori rispetto a quelle per gli elementi in acciaio al carbonio di equivalente resistenza allo snervamento. Ciò vale non solamente per la capacità di applicazione del carico delle apparecchiature, ma anche per l'ampiezza delle deformazioni dei provini da esse causate.

Va osservato che, sotto carichi più elevati sui provini, gli effetti dello scorrimento si manifestano maggiormente, di conseguenza le letture delle deformazioni e degli spostamenti non si stabilizzano entro intervalli di tempo ragionevoli.

Per materiali incruditi, la resistenza a trazione e a compressione deve essere determinata nella direzione dell'incrudimento. La valutazione dei risultati delle prove deve essere effettuata facendo riferimento alla resistenza corrispondente.

# 10 ASPETTI DELLA FABBRICAZIONE

## 10.1 Introduzione

Questo capitolo intende approfondire, a beneficio dei progettisti, particolari aspetti della fabbricazione degli acciai inossidabili, con una serie di raccomandazioni per la "buona pratica di fabbricazione"; intende inoltre stabilire le modalità di accertamento preliminare dell'idoneità di un produttore.

L'acciaio inossidabile non è un materiale di difficile lavorazione, sebbene sia per molti aspetti diverso dall'acciaio al carbonio e deve quindi essere trattato conseguentemente. Molti processi di fabbricazione e di giunzione sono simili a quelli degli acciai al carbonio, ma le caratteristiche differenti degli acciai inossidabili richiedono attenzione speciale in molti aspetti di tali processi. E' quindi essenziale che si stabiliscano opportuni contatti fra progettisti e produttori fin dalle prime fasi della progettazione per assicurare che siano adottati i metodi di produzione più indicati.

Un obiettivo irrinunciabile è il mantenimento delle proprietà anticorrosione. E' indispensabile adottare le opportune cautele in tutte le fasi di immagazzinamento, movimentazione e formatura per ridurre al minimo le possibili cause di compromissione della formazione dello strato auto passivante. Particolare attenzione deve essere posta nel ristabilire la completa resistenza alla corrosione delle zone saldate. Sebbene fondamentali, le precauzioni sono semplici e, in linea di massima, fanno parte della "buona pratica" di progetto.

E' importante preservare un buon aspetto delle superfici dell'acciaio inossidabile in ogni fase della fabbricazione. I difetti superficiali sono non solo esteticamente poco gradevoli, ma in linea di massima inaccettabili, dal momento che rimediarsi richiede sovente tempo ed un imprevisto impegno economico. Mentre normalmente i difetti di strutture in acciaio al carbonio sono nascosti dalla verniciatura, questa può avvenire solo di rado per le strutture in acciaio inossidabile.

La forma di una struttura può essere dettata dal tipo di materiale disponibile; al riguardo si deve riconoscere che la disponibilità di elementi in acciaio inossidabile laminati a caldo è assai inferiore a quella degli acciai al carbonio con un conseguente uso più vasto di elementi formati a freddo e saldati. Inoltre, date le usuali dimensioni delle presse, si ottengono elementi relativamente più corti che implicano un maggior numero di giunti assiali. Nel dettaglio dei giunti, va tenuto conto delle tolleranze per i bulloni in prossimità dei raggi di piegatura e del probabile manifestarsi di problemi dovuti alle distorsioni causate dalle saldature.

Il progetto di norma europeo per la fabbricazione ed il montaggio di strutture in acciaio e acciaio inossidabile è la prEN 1090, *Esecuzione di strutture in acciaio e strutture in alluminio*. La Norma relativa alla saldatura di acciai inossidabili è la EN 1011-3 *Saldatura. Raccomandazioni per la saldatura di materiali metallici. Saldatura ad arco di acciai inossidabili*.

## 10.2 Immagazzinamento e movimentazione

Generalmente in fase di immagazzinamento o di movimentazione degli acciai inossidabili occorre una maggior cura rispetto agli acciai al carbonio, allo scopo di

non danneggiare la loro finitura superficiale (specie le superfici a ricottura brillante o levigate) e di impedire contaminazione con ghisa o acciaio al carbonio. Le procedure di stoccaggio e di movimentazione devono essere concordate fra gli interessati, definite in anticipo rispetto ad ogni ciclo di fabbricazione e dettagliate sufficientemente per soddisfare esigenze speciali. Tali procedure ad es. prevedono che:

- l'acciaio sia controllato per verificare l'assenza di danni superficiali immediatamente dopo la consegna;
- l'acciaio può essere rivestito con plastica o altro materiale, che deve essere lasciato per il tempo più lungo possibile prima del processo di lavorazione/fabbricazione. Il rivestimento di protezione deve, all'occorrenza, essere preteso negli ordini di acquisto (es., in caso di finitura brillante);
- si eviti l'immagazzinamento in atmosfere saline umide; le rastrelliere di deposito non devono presentare superfici ruvide in acciaio al carbonio e devono perciò essere ricoperte da listelli o guaine di legno, gomma o plastica. Fogli e lamiere devono essere preferibilmente accatastati in verticale; se disposti orizzontalmente, i fogli possono spostarsi con rischio di essere contaminati da acciai al carbonio e di subire danni in superficie;
- elementi di sollevamento in acciaio al carbonio, tipo catene, ganci, supporti, siano evitati; anche in questo caso, l'impiego di materiali isolanti o di ventose impedisce all'acciaio inossidabile di essere contaminato con acciaio al carbonio; le forche dei carrelli a forza devono essere protette;
- si impedisca il contatto con prodotti chimici, compresi lubrificanti (oli e grassi che potrebbero danneggiare determinati tipi di finitura);
- idealmente, i locali in cui è presente acciaio inossidabile dovrebbero essere distinti da quelli destinati agli acciai al carbonio; per la lavorazione degli acciai inossidabili dovrebbero essere usati solo utensili dedicati (ciò vale in maniera particolare per le mole e per le spazzole metalliche). Da notare che queste ultime, e la cosiddetta "lana d'acciaio", devono essere in acciaio inossidabile e generalmente di qualità simili sotto il profilo della resistenza a corrosione (in altri termini, non adoperare spazzole in acciaio inossidabile ferritico su acciai inossidabili austenitici);
- a titolo precauzionale, in fase di fabbricazione e di montaggio, ci si assicuri di asportare ogni bava a spigolo vivo, dovuta alle operazioni eseguite con cesoie;
- sia data la debita importanza ad ogni esigenza di protezione della finitura del materiale durante il trasporto.

## **10.3 Operazioni di formatura**

### **10.3.1 Taglio**

L'acciaio inossidabile è un materiale relativamente più costoso rispetto ad altri metalli e deve essere posta cura per evitare sfridi eccessivi nelle operazioni di taglio. Va fatto notare che si potranno verificare maggiori sfridi se il materiale ha una satinatura (o un motivo monodirezionale) che occorre conservare in fase di fabbricazione. Alcune tracce lasciate da matite o penne per la marcatura dell'acciaio sono difficili da eliminare o danno luogo a macchie se apposte direttamente sulla superficie (e non su un qualunque film protettivo); occorre perciò prestare particolare cura in merito.

L'acciaio inossidabile può essere tagliato con i metodi classici, come mediante cesoie e seghe; ma la potenza richiesta, a causa dell'incrudimento, è maggiore rispetto a quella che occorre per un acciaio al carbonio. Se possibile, il taglio (e in generale ogni lavorazione su macchina utensile) deve eseguirsi su materiale ricotto per limitare l'incrudimento e l'usura degli utensili.

Per tagliare secondo linee diritte sono largamente impiegate cesoie a ghigliottina. Usando ghigliottine ad estremità aperte, può eseguirsi un taglio continuo in lunghezza maggiore delle lame taglienti, sebbene si corra il rischio di avere gradini sul bordo tagliato.

Si applicano anche tecniche ad arco plasma che si dimostrano particolarmente utili per tagliare lastre spesse e profilati i cui bordi devono essere lavorati a macchina, ad es. per poter essere saldati. Il taglio a fiamma ossiacetilenica non è adatto per gli acciai inossidabili, a meno che non si operi con una polvere flussante per saldatura.

### **10.3.2 Formatura a freddo**

L'acciaio inossidabile si può modellare rapidamente con metodi usuali di formatura a freddo, tipo piegatura, imbutitura, pressatura e stampaggio profondo. Per impieghi in edilizia la piegatura su pressa è la tecnologia maggiormente applicata, sebbene per forti quantitativi di prodotti sottili, la formatura a rulli possa essere più economica.

Anche in questo caso, a causa dell'incrudimento, la potenza necessaria per piegare un acciaio inossidabile è superiore a quella necessaria per la piegatura di un acciaio al carbonio (circa il 50% in più per gli inossidabili austenitici, o addirittura oltre per i duplex). Inoltre, l'acciaio inossidabile deve essere deformato in maniera tale da contrastare l'effetto del ritorno elastico, accorgimento non necessario nel caso dell'acciaio al carbonio. Per sezioni trasversali di geometria complessa è opportuno interessare il fornitore o il produttore fin dall'inizio.

L'elevata duttilità dell'acciaio inossidabile permette la formatura a raggi di curvatura ridotti, probabilmente fino alla metà dello spessore nel caso di materiale ricotto. Comunque, si suggerisce genericamente di adottare i seguenti raggi interni minimi:

$2t$  per gli austenitici;

$2,5t$  per i duplex;

dove  $t$  è lo spessore del materiale.

Per la piegatura degli elementi tubolari, possono applicarsi le seguenti indicazioni:

- il rapporto fra diametro esterno del tubo e spessore della parete non deve essere superiore a 15 (per evitare costose lavorazioni con gli utensili);
- il raggio di piegatura (rispetto alla mezzeria del tubo) non deve superare  $2,5d$ , dove  $d$  è il diametro esterno;
- ogni cordone di saldatura deve essere depositato in vicinanza dell'asse neutro per ridurre le sollecitazioni di piegatura alla saldatura.

### **10.3.3 Fori**

I fori possono essere ricavati a trapano o a punzone. Nella foratura deve essere conservato il senso positivo del taglio per evitare incrudimento; ciò implica punta aguzza con angolo di spoglia e velocità di taglio appropriati. Non è consigliato l'impiego di punzoni tondi a punta centrale in quanto causano incrudimento delle superfici. Sia il trapano che il punzone devono essere di tipo a punta triangolare. I



fori a punzone su acciaio inossidabile austenitico possono essere ricavati fino ad una profondità di 20 mm; la maggior durezza dei tipi duplex riduce questa profondità. Il diametro minimo di foro a punzone è di 2 mm maggiore dello spessore del foglio. I fori a punzone devono evitarsi in ambienti corrosivi in quanto presentano incrudimento ai bordi.

## 10.4 Saldatura

### 10.4.1 Introduzione

La saldatura degli acciai inossidabili austenitici e duplex è effettuata largamente con successo tramite i normali trattamenti che risultano soddisfacenti, purché si impieghino consumabili adatti. Pulizia generale ed assenza di contaminazione sono i requisiti fondamentali per ottenere una saldatura di buona qualità. Bisogna eliminare ogni traccia di oli, residui di idrocarburi, marcature con lapis a cera, ecc. per evitare la loro decomposizione ed il rischio che apportino carbonio. Il cordone deve essere privo di zinco, compreso quello contenuto in prodotti galvanizzati, e di rame e delle sue leghe (occorre dedicare attenzione quando si impieghino barre di appoggio in rame; deve essere ricavata una gola nella barra immediatamente prossima all'area di fusione).

Per gli acciai inossidabili è molto più importante, rispetto agli acciai al carbonio, ridurre i punti in cui può aver inizio la corrosione interstiziale (cfr. 3.7.2). Difetti di saldatura, come incisioni marginali, scarsa penetrazione, spruzzi, inclusioni di scoria, archi secondari sono tutte potenziali cause di corrosione e devono quindi essere ridotte al minimo. Archi secondari o funzionamento dell'arco con messa a terra mal collegata possono pure rovinare il film superficiale e potenzialmente essere causa di corrosione preferenziale con conseguente degrado dell'aspetto di una struttura.

Nei casi in cui l'aspetto di una saldatura è importante, il tecnico deve precisarne il profilo e le condizioni superficiali desiderate. Ciò può influire sul tipo di saldatura scelta e sul trattamento post-saldatura. Si deve inoltre tener conto della posizione delle saldature, ponendosi la domanda se sia possibile eseguire l'idoneo trattamento post-saldatura.

Devono essere controllati l'apporto termico e la temperatura di interpass per ridurre al minimo le distorsioni (vedi 10.4.4) e per evitare eventuali problemi di carattere metallurgico (vedi 10.4.5).

La saldatura deve essere eseguita con un procedimento approvato secondo una normativa come la EN ISO 15609-1 *Specifiche e qualificazione delle procedure di saldatura per materiali metallici - Specifiche della procedura di saldatura. Saldatura ad arco*. I saldatori devono essere qualificati secondo la EN 287-1 *Prove di qualificazione dei saldatori - Saldatura per fusione. Acciai*. Le procedure di saldatura comprendono i seguenti elementi:

- verifica del metodo di saldatura con particolare attenzione alle ragioni della scelta e dei requisiti di prova della procedura di saldatura stessa
- qualifica dei saldatori
- controllo delle operazioni di saldatura nelle fasi di: preparazione, saldatura e trattamento post-saldatura
- livello dell'ispezione e delle tecniche non distruttive da applicare

- criteri di accettazione per il livello accettabile dei difetti di saldatura.

Non dovrebbero sussistere problemi di saldatura negli acciai inossidabili purché si seguano procedure adatte; comunque un tecnico deve ricordare che negli acciai inossidabili la distorsione dovuta ad una saldatura è in genere maggiore di quella che si riscontra negli acciai al carbonio, vedi 10.4.4.

Non è mai permesso saldare le viti ai loro dadi, in quanto i materiali sono stati realizzati esclusivamente per offrire resistenza e non per essere saldati a fusione.

### 10.4.2 Metodi di saldatura

Come ricordato in precedenza, per gli acciai inossidabili si possono usare i normali metodi di saldatura per fusione. La tabella 10.1 specifica quali sono i più adatti a seconda degli spessori, ecc.

**Tabella 10.1** *Procedimenti di saldatura e loro idoneità per gli acciai inossidabili*

Tecnica di saldatura (EN ISO 4063)	Forma di prodotto adatta	Tipo di giunto saldato	Range di spessori saldabile	Posizione di saldatura	Condizioni di cantiere/ officina necessarie
111 Saldatura ad arco con elettrodi rivestiti (SMAW)	Tutte escluse le lamiere	Tutte	3 mm <sup>(1)</sup> o più	Tutte	Tutte
131 Saldatura ad arco in atmosfera di gas inerte con elettrodo metallico (MIG)	Tutte	Tutte	2 mm <sup>(1)</sup> o più	Tutte	Tutte <sup>(2)</sup>
141 Saldatura ad arco in atmosfera di gas inerte con elettrodo in tungsteno (TIG)	Tutte	Tutte	Fino a 10 mm	Tutte	Tutte <sup>(2)</sup>
121/122 Saldatura ad arco sommerso	Tutte escluse le lamiere	Tutte	3 mm <sup>(1)</sup> o più	Solo posizione sottotesta	Tutte
2 Saldatura per resistenza	Solo le lamiere	Tutte	Fino a 3 mm circa	Tutte	Tutte

Note:

(1) dipende dal tipo di giunto da realizzare.

(2) più sensibile alle condizioni climatiche dunque è necessaria una migliore protezione dell'ambiente.

### 10.4.3 Consumabili

I consumabili sul mercato sono stati formulati per assicurare saldature di resistenza equivalente e di caratteristiche anticorrosione analoghe a quelle dei metalli su cui sono depositati e per ridurre al minimo il rischio di cricche in fase di solidificazione. In caso di applicazioni particolari, come in ambienti insolitamente aggressivi o dove sia richiesta l'assoluta assenza di proprietà magnetiche, si devono sempre consultare i produttori di acciai e di consumabili.

Tutti i prodotti di consumo devono osservare i requisiti della prEN 1090; è indispensabile che essi siano tenuti esenti da inquinanti ed immagazzinati secondo le istruzioni dei loro fabbricanti.

#### **10.4.4 Distorsioni causate dalla saldatura**

Al pari degli altri metalli, gli acciai inossidabili sono soggetti alle stesse distorsioni in fase di saldatura (piegamenti, inarcamenti, restringimenti, ecc.) tipiche delle strutture in acciaio al carbonio. Quelle degli acciai inossidabili, specie se austenitici, sono maggiori per effetto del maggior grado di dilatazione termica e della minore conducibilità termica (che causa gradienti termici più elevati) degli acciai inossidabili rispetto agli acciai al carbonio (cfr. 3.3).

Queste distorsioni possono essere tenute sotto controllo; ma non essere eliminate del tutto. Progettisti e montatori devono preoccuparsi di quanto segue:

##### ***Progettisti***

- Ridurre al minimo le saldature da eseguire;
- Ridurre le dimensioni;
- Ridurre le aree da saldare; ad es., negli elementi spessi specificare la preparazione a doppio V, a U semplice o doppia, anziché a V;
- Adottare giunti simmetrici;
- Progettare in modo da poter accettare tolleranze dimensionali maggiori;

##### ***Costruttori***

- Usare efficaci attrezzature a morsa; se possibile l'attrezzatura deve essere dotata di parti in rame o in alluminio che accrescono la dispersione termica dell'area saldata;
- Se queste attrezzature non sono disponibili, usare una saldatura d'imbastitura a spaziatura stretta;
- Prima di saldare, accertare l'ottimizzazione di giunti ed allineamenti;
- Adottare il minimo apporto termico ammissibile per il metodo di saldatura prescelto;
- Fare passate bilanciate in appropriata sequenza (ad es., deposito a gradini successivi e simili).

#### **10.4.5 Osservazioni metallurgiche**

Non è possibile qui analizzare completamente la metallurgia degli acciai inossidabili, salvo alcuni aspetti di maggior rilievo.

##### ***Formazione di precipitati nei tipi austenitici***

Negli inossidabili austenitici non si ha eccesso di crescita delle dimensioni dei grani né di precipitazione di fasi fragili ed intermetalliche nella zona termicamente alterata. Le procedure di saldatura sono solitamente orientate al controllo del tempo in cui la zona della saldatura resta nell'intervallo delle tipiche temperature di precipitazione (450-900°C). Una riparazione eccessiva della saldatura accresce naturalmente il tempo di permanenza ed è perciò limitata a tre riparazioni rilevanti.

La formazione di precipitati di carburi di cromo e la susseguente perdita di proprietà anticorrosive sono state illustrate in 3.2.6 *Corrosione intergranulare*; in tale occasione si è ricordato che il fenomeno non è preoccupante nel caso di acciai inossidabili austenitici a basso contenuto di carbonio (cioè i tipi 1.4307 e 1.4404). Tuttavia gli effetti del degrado da saldatura possono manifestarsi nei tipi a contenuto standard di carbonio in strutture con spessore di piastra superiore a 10 mm circa.

### ***Cricche di solidificazione nei tipi austenitici***

Si evita la formazione di cricche di solidificazione se il cordone di saldatura contiene circa il 5% di ferrite. L'industria siderurgica opera in maniera da equilibrare la composizione ed i trattamenti termici dei tipi comuni di acciai inossidabili austenitici per garantire che essi, alla consegna non contengano virtualmente ferrite, ma che ne formeranno un quantitativo sufficiente in un cordone di saldatura autogena (cioè, senza aggiunta di apporti). Anche così, per ridurre il rischio di cricche, è prudente ridurre l'apporto termico, la temperatura di interpass e l'entità dei vincoli quando si esegue una saldatura autogena. Nei particolari di maggior spessore si aggiunge metallo di apporto e l'impiego di consumabili di buona qualità assicura la formazione della quantità di ferrite occorrente. Di solito non serve misurare la quantità esatta di ferrite formatasi; metodi adatti di saldatura e consumabili idonei riducono i rischi di formazione di cricche in fase di solidificazione.

### ***Fragilità degli acciai inossidabili duplex***

Gli inossidabili duplex sono sensibili alla fragilità a 475°C e da fase  $\sigma$ . La prima si ha quando l'acciaio è tenuto troppo a lungo fra 550 e 400°C, o raffreddato troppo lentamente fra i due valori di temperatura sopra citati; il fenomeno dà origine ad un aumento della resistenza a trazione e di durezza contemporaneamente ad una riduzione della duttilità a trazione ed alla resistenza agli urti. La fragilità dovuta alla fase  $\sigma$  può manifestarsi dopo una lunga esposizione a temperature fra 565 e 900°C, ma può verificarsi in solo mezz'ora in presenza di condizioni appropriate (che dipendono dalla composizione e dalle condizioni termo-meccaniche dell'acciaio). Gli effetti della fragilità in fase  $\sigma$  sono maggiori a temperatura ambiente, Entrambi i tipi di fragilità pregiudicano la resistenza alla corrosione e la tenacità.

Entrambe le forme di fragilità possono essere tenute adeguatamente sotto controllo adottando metodi di saldatura idonei; si consiglia una temperatura di interpass di 200°C massima per le passate intermedie. Particolare cura va riservata alla saldatura di elementi pesanti.

Per evitare fragilità, si devono evitare prolungate esposizioni a temperature oltre i 300°C.

### **10.4.6 Trattamento dopo saldatura**

E' consigliabile fabbricare una struttura per saldatura sia dal punto di vista tecnico, che economico. Un trattamento post-saldatura è generalmente necessario, specialmente se si tratta di processi di saldatura ad arco, come si vedrà nell'immediato seguito. E' importante che questi trattamenti siano definiti onde evitare costi supplementari gravosi ed eventuali deficienze in tema di prestazioni. Le tecniche di finitura comuni a tutti i tipi di struttura, sono illustrate in 10.6.

Il trattamento usuale per rifinire i cordoni è quello di utilizzare spazzole metalliche o mole abrasive. I montatori della struttura devono limitare al massimo le molature e, se possibile, ricorrere esclusivamente alle spazzole metalliche, perché il calore sviluppato da una mola può pregiudicare la resistenza alla corrosione. Deve essere tenuto presente che abrasivi e spazzole metalliche devono essere d'acciaio inossidabile (cfr. 10.2).

Costituisce una buona pratica asportare ogni traccia di colorazione termica. Tuttavia, una colorazione giallognola è ammissibile se l'acciaio inossidabile assicura un buon margine di resistenza alle particolari condizioni ambientali. Quando ciò non si verifica, o se per motivi estetici la colorazione deve essere

eliminata, il trattamento da effettuare è il decapaggio (cfr. 10.6) o la sabbiatura con vetro. Il decapaggio può effettuarsi per immersione in apposito bagno (cfr. 10.6) o mediante paste decapanti secondo le istruzioni dei fornitori.

Il martellamento della superficie di un cordone di saldatura è un trattamento post saldatura che produce specifici vantaggi: introduce infatti tensioni interne di compressione che migliorano la resistenza alla fatica, alla tenso corrosione e l'aspetto estetico. La martellatura comunque non può giustificare una modifica della verifica a fatica.

L'asportazione di metallo, durante lavorazioni onerose su macchine utensili, comporta un rilascio delle tensioni interne e la formazione di distorsioni delle strutture saldate. Nei casi in cui la distorsione non rispetti le tolleranze dimensionali, deve essere eseguito un apposito trattamento termico. Di massima, ciò vale soltanto come opzione per componenti di piccole dimensioni e soltanto per i tipi poco soggetti alla sensibilizzazione (cfr. 3.7.2), come gli acciai inossidabili a basso tenore di carbonio, 1.4307 e 1.4404 o gli stabilizzati 1.4541 e 1.4571.

### 10.4.7 Controllo delle saldature

La tabella 10.2 illustra le ispezioni normalmente eseguite sulle saldature di acciai inossidabili e di acciai al carbonio.

I metodi si adottano a seconda delle necessità in funzione del livello di integrità strutturale e di corrosione richiesto per l'ambiente in questione. In ogni modo, controlli a vista devono essere effettuati in ogni fase di una saldatura per evitare l'insorgere di problemi che potrebbero diventare seri ed influenti se trascurati mentre la costruzione va avanti. L'importanza delle ispezioni delle superfici in acciaio inossidabile rispetto a quelle di solito effettuate per superfici in acciaio al carbonio, deriva dal fatto che l'acciaio inossidabile è usato principalmente per resistere alla corrosione e anche un piccolo difetto superficiale può esporlo ad attacchi corrosivi.

**Tabella 10.2** *Metodi di controllo delle saldature*

Tipo NDT	Acciai inossidabili austenitici	Acciai inossidabili duplex	Acciai al carbonio
Superfici	Visivo DPI	Visivo DPI	Visivo DPI  MPI
Volume	Raggi X Raggi gamma	Raggi X Raggi gamma	Raggi X Raggi gamma Ultrasuoni

NDT – Prove non distruttive

DPI – Ispezione con liquidi penetranti

MPI – Ispezione con particelle magnetiche

Le ispezioni con particelle magnetiche non possono essere prese in considerazione per gli inossidabili austenitici che sono non magnetici. I metodi agli ultrasuoni non sono largamente impiegati per il controllo delle saldature a causa della difficoltà di una loro corretta interpretazione; possono comunque essere usati sul materiale base. La radiografia a raggi gamma non è in grado di rilevare cricche o carenza di fusione in particolari di acciaio inossidabile di spessore inferiore a 10 mm.

## 10.5 Grippaggio

Quando superfici sono sotto carico e in moto l'una rispetto all'altra, può verificarsi un grippaggio a causa dell'aderenza localizzata e rottura delle superfici. In alcuni casi possono verificarsi connessioni per saldatura e grippaggio. Per evitare i problemi di grippaggio possono usarsi i metodi seguenti:

- Usare tipi standard diversi di acciaio inossidabile (che differiscono per composizione, tasso di incrudimento e durezza). Ad es. combinazioni vite-dado A2-C2, A4-C4 o A2-A4 come indicato in EN ISO 3506;
- In casi critici, si può usare come componente un tipo brevettato di acciaio inossidabile ad elevato incrudimento o applicare rivestimenti superficiali duri;
- Ricorrere ad agenti antigrippaggio.

Va sottolineato che se si impiegano acciai o rivestimenti dissimili, è indispensabile garantire l'ottenimento del livello voluto di resistenza alla corrosione. Ingrassare i bulloni può essere vantaggioso ma può causare contaminazione da sporcizia e difficoltà di immagazzinamento .

Si raccomanda che il materiale avvitabile sia stato formato a freddo con classe di resistenza minima 70 (vedi tab. 3.3). Esso non deve inoltre essere utilizzato allo stato ricotto poiché suscettibile al grippaggio. E' preferibile sostituire filettature ottenute a rullatura a filetti prodotti su macchina utensile a causa della sua propensione al grippaggio; inoltre filettature a passo corto e di forma adatta con un serraggio deciso riducono la possibilità di grippaggi.

## 10.6 Finitura

La finitura delle superfici in acciaio inossidabile è un aspetto importante della progettazione e deve essere chiaramente precisata a seconda delle esigenze architettoniche o funzionali. Tanto più raffinata è la finitura, tanto più è alto il suo costo. E' questo un punto che, considerato in anticipo, evita notevole spreco di tempo e di denaro. La programmazione iniziale è sostanziale nel ridurre le spese. Ad es., se una saldatura tra due tubolari contigui di un corrimano di scala o di una balaustra è celata all'interno di un montante, le spese di finitura superficiale saranno ridotte e l'aspetto definitivo dei particolari ne trarrà notevole giovamento.

La superficie in acciaio deve essere riportata alla sua originaria resistenza alla corrosione asportando ogni traccia di scorie e di contaminazione. Il decapaggio in bagno acido stacca qualsiasi scoria, che può essere eliminata con una successiva passata con spazzola di setola, ed asporta inoltre ogni particella incorporata di acciaio al carbonio o di ferro.

I trattamenti abrasivi, come molatura, levigatura e lucidatura danno finiture unidirezionali e quindi mischiare i cordoni può non essere facile su lamiere/fogli a superfici laminate normalmente. Serve un certo grado di sperimentazione per stabilire nel dettaglio il procedimento più adatto per la finitura desiderata.

La lucidatura elettrolitica asporta un sottile strato superficiale; è possibile ottenere un'ampia gamma di finiture, da quella opaca alla brillante, dipendenti in notevole misura dalle condizioni originali del materiale.

Sono noti altri trattamenti (elettrodeposizione, barilatura, incisione, colorazione e brunitura), che non sono comunque comuni per l'acciaio inossidabile strutturale e quindi non verranno qui descritti.

E' opportuno sottolineare ancora una volta che la superficie deve essere esente da qualsiasi contaminazione quando è assemblata. Particolare attenzione occorre dedicare alle possibili contaminazioni causate dalla vicinanza di lavorazioni a base di acciai al carbonio, specie se da polvere di molatura. In queste condizioni i materiali in acciaio inossidabile immagazzinati devono essere protetti da pellicole di plastica, ovvero nel contratto deve figurare una clausola per la completa ripulitura una volta completata la struttura.





## **APPENDICE A**

### **Relazione fra le designazioni degli acciai inossidabili**

Nella tabella A1, sono riportate le conversioni tra le designazioni della EN 10088 e quelle tedesche, britanniche, francesi, italiane, svedesi, spagnole e statunitensi.

**Tabella A.1** Relazione fra le designazioni degli acciai inossidabili

Tipo di acciaio secondo EN 10088		Germania (DIN)		Regno Unito	Francia	Italia	Svezia	Spagna	Stati Uniti	
Designazione	No.	Designazione	No.						AISI	UNS
X5CrNi18-10	1.4301	X5 CrNi 18 10	1.4301	BSI 304 S 15 304 S 16 304 S 31	AFNOR Z 6 CN 18-09	UNI X5 CrNi 18 10	SIS 2332 2333	UNE 3504	304	S 30400
X2CrNi19-11	1.4306	X2 CrNi 19 11	1.4306	304 S 11	Z 2 CN 18-10	X2 CrNi 18 11	2352	3503	304 L	S 30403
X2CrNi18-9	1.4307	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X6CrNiTi18-10	1.4541	X6 CrNiTi 18 10	1.4541	321 S 31	Z 6 CNT 18-10	X6 CrNiTi 18 11	2337	3523	321	S 32100
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	X5CrNiMo 17 12 2	1.4401	316 S 31	Z 6 CND 17-11	X5 CrNiMo 17 12	2347	3534	316	S 31600
X5CrNiMo17-12-2	1.4404	X2CrNiMo 17 13 2	1.4404	316 S 11	Z 2 CND 17-12	X2 CrNiMo 17 12	2348	3533	316L	S 31603
X2CrNiMo17-12-3	1.4432	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	X2 CrNiMo 18 14 3	1.4435	316 S 13	Z 2 CND 17-13	X2 CrNiMo 17 13	2353	3533	316 L	S 31603
X1NiCrMoCu25-20-5	1.4539	X1 NiCrMoCuN 25 20 5	1.4539	-	Z 1 CNDU 25-20	-	2562	-	904 L	N 08904
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	X6 CrNiMoTi 17 12 2	1.4571	320 S 31	Z 6 CNDT 17-12	X6 CrNiMoTi 17 12	2350	3535	316 Ti	S 31635
X2CrNi18-10	1.4311	X2 CrNiN 18 10	1.4311	304 S 61	Z 2 CN 18-10 Az	-	2371	-	304 LN	S 30453
X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	X2 CrNiMoN 17 12 2	1.4406	316 S 62	Z 2 CND 17-12 Az	-	-	-	316 LN	S 31653
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	X2 CrNiMoN 17 13 5	1.4439	-	-	-	-	-	317 LMN	S 31726
X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529	X1 NiCrMoCuN 25 20 6	1.4529	-	-	-	-	-	-	-
X2CrNi18-7	1.4318	X2 CrNiN 18 7	1.4318	-	-	-	-	-	301 LN (302 LN)	-
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	X2 CrNiMoN 22 5 3	1.4462	Duplex 2205	Z 2 CND 22-5 Az	-	2377	-	-	S 31803

## APPENDICE B

### Snellezza $\lambda_{LT}$ per instabilità laterale-torsionale

#### B.1 Caso Generale

Il momento elastico critico per instabilità laterale-torsionale  $M_{cr}$  per una trave di sezione uniforme è dato dalla:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left( \left[ \left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{1/2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right)$$

dove:

$C_1, C_2$  e  $C_3$  sono coefficienti dipendenti dalle condizioni di carico e di vincolo, vedi tabelle B.1 e B.2.

$I_t$  è la costante di torsione

$I_w$  è la costante di ingobbamento

$I_z$  è il momento d'inerzia dell'area rispetto all'asse minore

$k, k_w$  sono coefficienti di lunghezza efficace.

$L$  è la lunghezza della trave fra i punti vincolati lateralmente

$z_g = z_a$  &  $z_s$

$z_a$  è la coordinata del punto di applicazione del carico

$z_s$  è la coordinata del centro di taglio

$$z_j = z_s - \frac{\int z (y^2 + z^2) dA}{2 I_y}$$

Nella valutazione di  $z_j$ ,  $z$  è negativo per la flangia compressa,  $z_j$  è positivo quando la flangia, con il valore più alto di  $I_z$  è compressa nel punto ove si ha momento massimo. Notare che  $z_j = 0$  per qualunque sezione a flangie uguali, compresi profilati a C e profili a Z.

Per carichi di gravità,  $z_g$  è negativo per carichi applicati al di sopra del centro di taglio. Nel caso generale,  $z_g$  è negativo per carichi che agiscono verso il centro di taglio dai rispettivi punti di applicazione del carico. Notare che se al carico si impedisce di spostarsi lateralmente con la trave, allora  $z_g = 0$ .

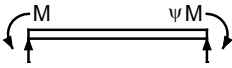








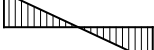
I fattori di lunghezza efficace  $k_z$  e  $k_w$  variano da 0,5 per incastro completo, a 1,0 per mancanza di incastro, con 0,7 nel caso di un estremo fisso ed uno libero. Le normali condizioni di vincolo a ciascuna estremità sono:

$$k_z = k_w = 1,0$$

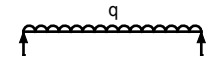

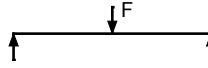
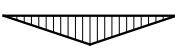
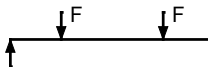

- vincolato per movimenti laterali, libero di ruotare nel piano
- vincolato per rotazioni attorno all'asse longitudinale, libero di ingobbarsi.

Il fattore  $k_z$  si riferisce alla rotazione dell'estremità su di un piano. E' analogo al rapporto  $l/L$  per una membratura in compressione. Il fattore  $k_w$  si riferisce all'ingobbamento di un'estremità. Tranne che in condizioni particolari di stabilità all'ingobbamento,  $k_w$  deve essere preso pari a 1,0.

**Tabella B.1** Valori dei coefficienti  $C_1$  e  $C_3$  corrispondenti ai valori del fattore di lunghezza efficace  $k_z$ : momenti agenti alle estremità

Momenti alle estremità e condizioni di appoggio	Diagramma del momento flettente	Valore di $k_z$	Valore dei fattori		
			$C_1$	$C_3$	
				$\psi_f \leq 0$	$\psi_f > 0$
	 $\psi = +1$	1,0	1,00	1,000	
		0,5	1,05	1,019	
	 $\psi = +3/4$	1,0	1,14	1,000	
		0,5	1,19	1,017	
	 $\psi = +1/2$	1,0	1,31	1,000	
		0,5	1,37	1,000	
	 $\psi = +1/4$	1,0	1,52	1,000	
		0,5	1,60	1,000	
	 $\psi = 0$	1,0	1,77	1,000	
		0,5	1,86	1,000	
	 $\psi = -1/4$	1,0	2,06	1,000	0,850
		0,5	2,15	1,000	0,650
	 $\psi = -1/2$	1,0	2,35	1,000	$1,3 - 1,2\psi_f$
		0,5	2,42	0,950	$0,77 - \psi_f$
	 $\psi = -3/4$	1,0	2,60	1,000	$0,55 - \psi_f$
		0,5	2,57	0,850	$0,35 - \psi_f$
 $\psi = -1$	1,0	2,60	$-\psi_f$	$-\psi_f$	
	0,5	2,45	$0,125 - 0,7\psi_f$	$-0,125 - 0,7\psi_f$	

**Tabella B.2** Valori dei coefficienti  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  corrispondenti ai valori del fattore di lunghezza efficace  $k_z$ : casi di carico trasversale

Carico e condizioni agli appoggi	Diagramma del momento flettente	Valore di $k_z$	Valore dei fattori		
			$C_1$	$C_2$	$C_3$
		1,0 0,5	1,12 0,97	0,45 0,36	0,525 0,478
		1,0 0,5	1,35 1,05	0,59 0,48	0,411 0,338
		1,0 0,5	1,04 0,95	0,42 0,31	0,562 0,539

Da notare che le tabelle B.1 e B.2 si possono usare solo nel caso di profili ad I monosimmetrici per i quali  $-0,9 \leq \psi_f \leq 0,9$

dove:

$$\psi_f = \frac{I_{fc} - I_{ft}}{I_{fc} + I_{ft}}$$

in cui:

$I_{fc}$  è il momento d'inerzia dell'area della flangia in compressione attorno all'asse minore della sezione

$I_{ft}$  è il momento d'inerzia dell'area della flangia in tensione attorno all'asse minore della sezione

$\psi_f = 0$  per sezioni bisimmetriche

$\psi_f > 0$  per sezioni monosimmetriche, quando la flangia maggiore è in compressione

$\psi_f < 0$  per sezioni monosimmetriche, quando la flangia minore è in compressione

Si possono usare per  $z_j$  le seguenti approssimazioni:

$$z_j = 0,8\psi_f \frac{h_s}{2} \quad \text{quando } \psi_f \geq 0$$

$$z_j = \psi_f \frac{h_s}{2} \quad \text{quando } \psi_f < 0$$

dove:

$h_s$  è la distanza tra i centri di taglio delle flangie

## B.2 Casi particolari

### B.2.1 Sezioni bisimmetriche

Il momento elastico critico per instabilità laterale-torsionale di una trave di sezione uniforme e simmetrica con flangie uguali,  $z_j=0$  è:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left( \left[ \left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]^{1/2} - C_2 z_g \right)$$

Per carico con momento d'incastro e carichi trasversali applicati al centro di taglio  $C_2 z_g=0$ . In questi casi si ha:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(k_z L)^2} \left[ \left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} \right]^{1/2}$$

Per condizioni normali di vincolo a ciascuna estremità,  $k_z=k_w=1,0$ :

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \left[ \frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} \right]^{1/2}$$

## APPENDICE C

### Caratteristiche dei materiali per il calcolo degli spostamenti

Il modulo secante,  $E_S$ , da impiegare nei calcoli per la determinazione degli spostamenti, (vedi 5.4.6) deve essere accertato per le membrature rispetto al senso di laminazione. Se l'orientamento non è noto, o non può essere garantito, si deve usare il valore per la direzione longitudinale.

Il valore del modulo secante può ricavarsi come segue:

$$E_S = (E_{S1} + E_{S2})/2$$

dove:

$E_{S1}$  è il modulo secante corrispondente alla sollecitazione nella flangia soggetta a trazione

$E_{S2}$  è il modulo secante corrispondente alla sollecitazione nella flangia soggetta a compressione

I valori dei moduli secanti  $E_{S1}$  e  $E_{S2}$  per l'appropriato orientamento e le sollecitazioni di progetto previste per l'esercizio, possono essere valutati secondo l'equazione seguente adottando le costanti date in tabella C.1. In alternativa, i valori per i tipi 1.4301, 1.4401 e 1.4462 possono essere ricavati dalla tabella C.2, interpolando linearmente all'occorrenza.

$$E_{S,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left( \frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n} \quad \text{e } i = 1,2$$

dove:

$\sigma_{i,Ed,ser}$  è la sollecitazione di progetto allo stato limite di servizio nelle flange in trazione o in compressione

$$E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$$

Per semplificare, la variazione di  $E_S$  lungo la membratura può essere trascurata e si può usare per tutta la lunghezza il minimo valore di  $E_S$  per questo elemento (che corrisponde al massimo valore delle sollecitazioni  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  nell'elemento stesso).

**Tabella C.1** Valori delle costanti da usare per la determinazione del modulo secante

Tipo	$f_y$ N/mm <sup>2</sup>	n	
		Direzione longitudinale	Direzione trasversale
1.4301	210		
1.4307	200	6,0	8,0
1.4541	200		
1.4318	330		
1.4401	220		
1.4404	220	7,0	9,0
1.4571	220		
1.4362	400	5,0	5,0
1.4462	460		

**Tabella C.2** Moduli secanti per calcoli degli spostamenti per i tipi 1.4301, 1.4401 e 1.4462

Rapporto delle sollecitazioni ( $\sigma/f_y$ )	Modulo secante (kN/mm <sup>2</sup> )				
	Tipo 1.4301		Tipo 1.4401		Tipo 1.4462
	Direzione longitudinale	Direzione trasversale	Direzione longitudinale	Direzione trasversale	Qualsiasi direzione
0,00	200	200	200	200	200
0,20	200	200	200	200	200
0,25	200	200	200	200	199
0,30	199	200	200	200	199
0,35	199	200	199	200	197
0,40	198	200	199	200	196
0,42	197	199	198	200	195
0,44	196	199	197	199	194
0,46	195	199	197	199	193
0,48	194	198	196	199	191
0,50	192	198	194	199	190
0,52	190	197	193	198	188
0,54	188	196	191	197	186
0,56	185	195	189	197	184
0,58	183	194	187	195	182
0,60	179	192	184	194	180
0,62	176	190	181	192	177
0,64	172	187	178	190	175
0,66	168	184	174	188	172
0,68	163	181	170	185	169
0,70	158	177	165	181	165
0,72	152	172	160	177	162
0,74	147	167	154	172	159
0,76	141	161	148	166	155



## PARTE II – ESEMPI DI PROGETTAZIONE

Questa parte fornisce dieci esempi di progettazione che illustrano l'applicazione delle regole di progetto. Gli esempi sono:

**Esempio di progettazione 1** - Colonna a sezione circolare cava soggetta a compressione assiale.

**Esempio di progettazione 2** - Colonna saldata con una sezione trasversale ad H di Classe 4, soggetta ad una combinazione di compressione assiale e flessione.

**Esempio di progettazione 3** - Lamiera grecata con sezione trasversale di Classe 4 per un tetto, soggetta a flessione.

**Esempio di progettazione 4** - Resistenza a fatica di un giunto saldato tra profilati cavi.

**Esempio di progettazione 5** - Progetto di un giunto saldato.

**Esempio di progettazione 6** - Progetto di un giunto bullonato.

**Esempio di progettazione 7** - Trave alta con sezione trasversale di Classe 4, soggetta a flessione. La resistenza allo sforzo di taglio è critica.

**Esempio di progettazione 8** - Trave alta con sezione trasversale di Classe 4, soggetta a flessione. La resistenza ai carichi trasversali è critica.

**Esempio di progettazione 9** - Profilato a C formato a freddo la flangia in compressione vincolata lateralmente. L'instabilità laterale-torsionale tra i vincoli laterali intermedi è critica.

**Esempio di progettazione 10** - Profilato cavo rettangolare soggetto a compressione assiale e flessione con resistenza al fuoco di 30 minuti.

**Esempio di progettazione 11** - Dimensionamento della lamiera grecata per una copertura a due luci. Confronto tra livello d'incrudimento CP500 e materiale ricotto.

**Esempio di progettazione 12** - Trave a C formata a freddo CP500 per una pavimentazione esterna: verifica dell'instabilità laterale-torsionale.

**Esempio di progettazione 13** - Travatura reticolare composta da elementi cavi: verifica allo SLU e all'incendio. Confronto tra livello d'incrudimento CP460 e materiale ricotto.

Le travi alte negli esempi 7 e 8 sono in tipo duplex 1.4462. Le membrature degli altri esempi sono nei tipi austenitici 1.4301 o 1.4401.

I riferimenti al margine degli esempi di progettazione rinviano a paragrafi di testo o ad espressioni/equazioni di questa pubblicazione, tranne specifica indicazione.

